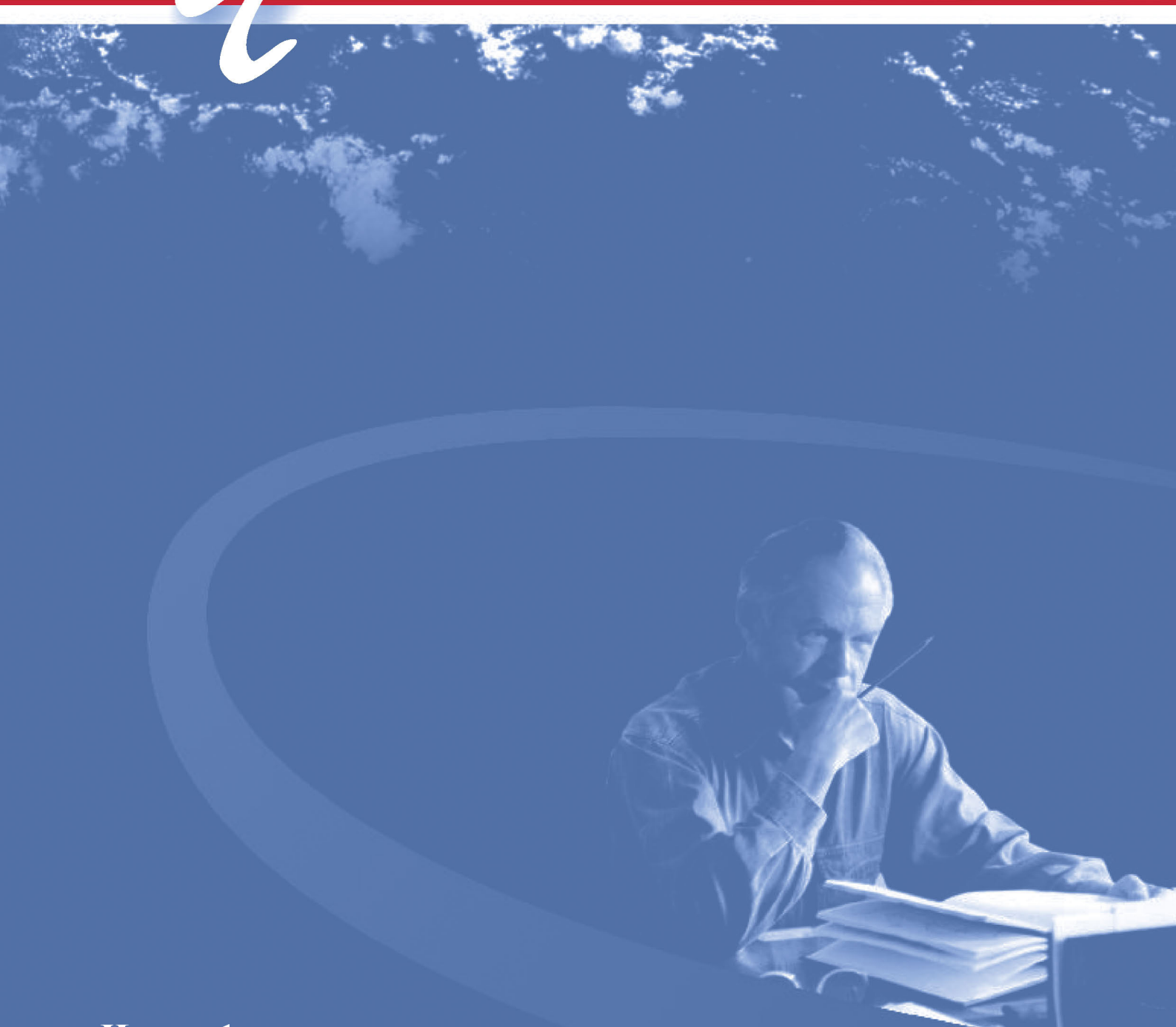


# Д Т У ЕШЕТНЕВСКИЕ ТЕНИЯ



Часть 1  
•  
XXII

Красноярск • 2018

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  
ТЕННИЯ**

---

*Материалы XXII Международной научно-практической конференции,  
посвященной памяти генерального конструктора  
ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева  
(12–16 ноября 2018, г. Красноярск)*

В 2 ЧАСТЯХ. ЧАСТЬ 1

Электронное издание

Красноярск 2018

© СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2018

УДК 629.7  
ББК 30 + 2  
Р47

**Редакционная коллегия:**

Ю. Ю. ЛОГИНОВ (председатель), Ю. Д. АЛАШКЕВИЧ, Е. В. БЕЛЯКОВА,  
В. Г. БОНДАРЕНКО, Е. Н. ГОЛОВЕНКИН, В. В. ДВИРНЫЙ, С. П. ЕРЕСКО, Л. В. ЕРЫГИНА,  
В. В. ЗОЛОТАРЕВ, И. Н. КАРЦАН, А. А. КИШКИН, В. А. ЛЕВКО, М. В. ЛУКЬЯНЕНКО,  
М. А. МАСЮК, А. В. МЕДВЕДЕВ, П. В. МИРОНОВ, А. Е. МИХЕЕВ, А. В. МУРЫГИН,  
В. П. НАЗАРОВ, В. И. ОРЛОВ, М. В. ОСТРОУШЕНКО, А. С. ПАРШИН, О. Е. ПОДВЕРБНЫХ,  
В. В. ПРОЦЕНКО, Л. В. РУЧКИН, М. В. САВЕЛЬЕВА, К. В. САФОНОВ, С. И. СЕНАШОВ, А. А. СТУПИНА,  
О. В. ТАСЕЙКО, 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 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. – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 24,7 МБ). – Систем. требования : Internet Explorer; Acrobat Reader 7.0 (или аналогичный продукт для чтения файлов формата .pdf) ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2018. Ч. 1. – Режим доступа: <https://reshetnev.sibsau.ru/page/materialy-konferentsii>. – Загл. с экрана.

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

Подписано к использованию: 08.11.2018. Объем: 24,7 МБ. С 291/18.

Корректоры *Т. Л. Патюкова, 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 XXII Международной  
научно-практической конференции «Решетневские чтения»!**

В XXI веке освоение и использование околоземного пространства стало одним из ключевых факторов, определяющих благополучие государства и высокий уровень жизни его граждан. В настоящее время в России продолжается реформирование военно-промышленного комплекса, действуют федеральные программы по развитию национальной орбитальной группировки космических аппаратов навигации и связи.

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

Михаил Федорович Решетнев – ярчайший представитель той плеяды учёных и организаторов производства, которых в нашей стране принято называть первопроходцами космических трасс. Михаил Федорович остался в нашей памяти как величайший ученый современности, как человек, внесший неоценимый вклад в развитие общества. Он был талантливейшим организатором, автором множества работ и открытий в области спутниковых коммуникаций, признанным мировым авторитетом.

В настоящее время большую значимость приобретает развитие высоких технологий, направленных на модернизацию экономики страны. На конференции студенты профильных направлений, специалисты-практики, представители базовых предприятий и научного сообщества могут обменяться опытом в области высоких технологий, обсудить перспективы дальнейшей работы, начать совместные проекты. За 22 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 621.77.04

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ

Р. В. Алякрецкий<sup>1</sup>, А. Е. Михеев<sup>1</sup>, Г. Г. Крушенко<sup>1,2\*</sup>, С. Н. Решетникова<sup>1</sup>, Г. В. Двирный<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>Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44  
E-mail: genry@icm.krasn.ru

*С целью повышения надежной длительной эксплуатации машин и механизмов применяются различные способы и средства повышения качества высоконагруженных поверхностей контактирующих деталей, входящих в их конструкции. В частности, к таким технологиям относятся микродуговое оксидирование и электроискровое легирование.*

*Ключевые слова: металлоизделия, качество поверхности, микродуговое оксидирование, электроискровое легирование.*

## IMPROVING THE QUALITY OF METAL SURFACES

R. V. Alyakretskii<sup>1</sup>, A. E. Mikheev<sup>1</sup>, G. G. Krushenko<sup>1,2\*</sup>, S. N. Reshetnikova<sup>1</sup>, G. V. Dvirnyi<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>Institute Computational Modeling SB RAS  
44 build, 50, Academgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
E-mail: genry@icm.krasn.ru

*In order to improve the reliable long-term operation of machines and mechanisms, various methods and means of improving the quality of high-loaded surfaces of the contacting parts included in their design are used. In particular, such technologies include micro-arc oxidation and electro-spark doping.*

*Keywords: product from metal, surface quality, micro-arc oxidation, electro-spark alloying.*

**Введение.** Одной из наиболее важных проблем космической отрасли сейчас является продление срока службы космических аппаратов (КА) [1]. Повышение качества деталей КА представляется возможным с использованием для этой цели высококонцентрированных потоков энергии [2].

**Микродуговое оксидирование (МДО).** Ужесточение требований по массе, энерговооруженности, и повышение требований к ресурсу и надежности КА [3] приводят к уплотнению его компоновочной схемы. При этом возрастает эрозионное воздействие стационарных плазменных двигателей (СПД) на конструкции КА путем уноса материала в результате длительной бомбардировки ионами газа, что приводит к загрязнению внешних поверхностей КА, что может привести к изменению коэффициентов пропускания оптики оборудования КА и защитных стекол солнечных батарей, коэффициентов поглощения и излучения терморегулирующих покрытий, что может привести к сбоям и отказам в функционировании систем КА. Еще одно негативное воздействие плазменных струй СПД проявляется с эрозией электропроводящего слоя с терморегулирующих покрытий КА, что приводит к накоплению статического заряда и возникновению электропробоев на поверхности КА.

В данной работе для нанесения защитных покрытий на алюминиевые конструкции КА с необходимыми свойствами применяли МДО [4; 5]. Покрытия на-

носились на установке ИАТ-Т. В качестве подложки использовали фольгу (60×130×100 мм) из сплава АД. МДО проводили в слабощелочных водных электролитах составов: № 1: NaOH (5 г/л) + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (10 г/л); № 2: KOH (5 г/л) + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (10 г/л). Покрытия формировали при различных соотношении  $I_k / I_a$  (от 0,6 до 1,4), плотностях тока (от 10 до 40 А/дм<sup>2</sup>) в течение 10–60 мин. Толщину покрытий измеряли толщиномером ТТ260 и на поперечных шлифах при помощи оптического микроскопа. Микроструктуру изучали с использованием металлографического исследовательского комплекса SIAM на базе оптического микроскопа.

В результате проведенного исследования было установлено [6], что на твердость покрытий существенную роль оказывает соотношение катодной и анодной составляющих тока. Износостойкость покрытия на сплаве Д16Т в 50 раз превышает этот параметр для закаленной стали У8 (HRC = 65), на сплаве АМг6 – в 20...25 раз, на сплаве АК9ч – в 10...12 раз. При этом была создана классификация способов нанесения покрытий, основным критерием которой являются наиболее значимые показатели качества получаемых защитных слоев – адгезионная ( $\sigma_a$ ) и когезионная ( $\sigma_k$ ) прочности, что облегчает выбор защитного материала и метода создания необходимых эксплуатационных свойств рабочих поверхностей.

**Электроискровое легирование.** С целью упрочнения поверхности изделий из алюминиевых сплавов применяли электроискровое легирование (ЭИЛ) с использованием нанопорошков (НП) нитрида кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и нитрида титана  $\text{TiN}$  [7] электроискрового легирования (ЭИЛ). Положительный эффект применения НП при производстве металлоизделий подробно описан в работе [8]. Технологию упрочнения обрабатывали на алюминиевом сплаве Д1, в поверхность которого втирали НП. Затем с помощью установки «Эмитрон-14» при использовании графитового электрода  $\varnothing 6$  мм производили ЭИЛ поверхности. Из упрочненных заготовок вырезали цилиндрические образцы  $\varnothing 10$  мм и высотой 15 мм. На приборе ПМТ-3 измеряли микротвердость упрочненной поверхности. Испытания на износ проводили на машине МТ-2. Износ определяли по потере массы образцов путем их взвешивания на аналитических весах ВЛА-200 до и после испытания.

Установлено, что ЭИЛ образцов из сплава Д1 графитовым электродом повышает ее микротвердость в 1,8 раза по сравнению с необработанным сплавом (с 200 до 360 ед. HV), обработка НП  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с последующим ЭИЛ графитовым электродом – в 1,87 раза (до 374 ед. HV) и обработка НП  $\text{TiN}$  и ЭИЛ графитовым электродом – в 2,26 раза (до 453 ед. HV). При этом износ упрочненной поверхности уменьшился соответственно в 1,84; 2,3 и в 4 раза.

**Выводы.** В результате применения микродугового окисления и электроискрового легирования было повышено качество поверхности изделий из алюминиевых сплавов.

#### Библиографические ссылки

1. ГОСТ Р 56526–2015. Национальный стандарт Российской Федерации. Требования надежности и безопасности космических систем, комплексов и автоматических космических аппаратов единичного (мелкосерийного) изготовления с длительными сроками активного существования. М. : Стандартинформ, 2015. 46 с.

2. Воздействие высококонцентрированных потоков энергии на материалы с целью изменения их физико-химических свойств и улучшения эксплуатационных характеристик. ИТПМ СО РАН Сибирское отделение РАН в 2007 году. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2008. С. 138–139.

3. Крушенко Г. Г., Назаров В. П., Исева О. А., Двирный Г. В. Улучшение массогабаритных характеристик конструкций летательных аппаратов с применением нанопорошковых технологий // Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической техники и подготовки инженерных кадров для авиакосмической отрасли : материалы XII Всерос. науч. конф. Омск : ОмГТУ, 2018. С. 44–50.

4. Микродуговое окисление (обзор) / И. В. Суминов, А. В. Эвельфельд, В. Б. Людин и др. М. : ЭКОМЕТ, 2005. 368 с.

5. Krivonosova E., Gorchakov A. Micro-arc oxidation as efficient technology of increasing of wear resistance of aluminum alloy // *Elektrotechnica&Electronica*. 2013. № 5, 6. P. 57–59.

6. Алякретский Р. В., Карчевный М. Ю., Зоммер С. и др. Исследование влияния режимов плазменного напыления на термостойкость покрытия // Решетневские чтения : материалы XIX Междунар. науч.-практич. конф. В 2 ч. Ч. 1 / СибГАУ. Красноярск, 2015. С. 6–7.

7. Крушенко Г. Г., Василенко З. А. Повышение износостойкости сплава Д1 электроискровым легированием с применением ультрадисперсных порошков химических соединений // *Сварочное производство*. 1995. № 2. С. 26–27.

8. Москвичев В. В., Крушенко Г. Г., Буров А. Е. и др. Нанопорошковые технологии в машиностроении. Красноярск : СФУ, 2013. 186 с.

#### References

1. GOST R 56526–2015. *Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Trebovaniya nadezhnosti i bezopasnosti kosmicheskikh sistem, kompleksov i avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov edinichnogo (melkoseriynogo) izgotovleniya s dlitel'nymi srokami aktivnogo sushchestvovaniya*. [State Standard R 56526-2015. Requirements of reliability and safety of space systems, complexes and automatic spacecrafts of single (small-scale) production with long terms of active existence. M. : Standartinform Publ., 2015. 46 p.

2. Impact of highly concentrated energy flows on materials in order to change their physical and chemical properties and improve performance. ITPM SB of RAS. Siberian branch of the Russian Academy of Sciences in 2007. Novosibirsk : Publishing house of SB RAS, 2008. P. 138–139.

3. Krushenko G. G., Nazarov V. P., Iseeva O. A., Dvirnyy G. V. [Improved mass-dimensional characteristics of airplane structures with the use of nanopowder technology]. *Problemy razrabotki, izgotovleniya i ekspluatatsii raketno-kosmicheskoy tekhniki i podgotovki inzhenernykh kadrov dlya aviakosmicheskoy otrasli: materialy XII Vseros. nauch. konf.* Omsk : OmGTU. P. 44–50 (In Russ.)

4. Suminov I. V., Evel'fel'd A. V., Lyudin V. B. i dr. [Microarc oxidation (review)]. M. : EKOMET, 2005. 368 p.

5. Krivonosova E., Gorchakov A. Micro-arc oxidation as efficient technology of increasing of wear resistance of aluminum alloy // *Elektrotechnica&Electronica*, 2013. № 5, 6. P. 57–59.

6. Alyakretskiy R. V., Karchebnyy M. Yu., Zommer S. i dr. [Investigation of the effect of plasma spraying modes on the thermal stability of the coating]. *Reshetnevskie chteniya: Materialy XIX Mezhdunarodnoy nauchno-praktich. konf. V 2 ch. Ch. 1* / SibGAU. Krasnoyarsk, 2015. P. 6–7.

7. Krushenko G. G., Vasilenko Z. A. [Investigation of the effect of plasma spraying modes on the thermal stability of the coating]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1995. № 2. P. 26–27.

8. Moskvichev V. V., Krushenko G. G., Burov A. E. i dr. *Nanopoproskovyye tekhnologii v mashinostroenii*. [Nanopowder technologies in mechanical engineering]. 2013. 186 p.

© Алякретский Р. В., Михеев А.Е., Крушенко Г. Г., Решетникова С. Н., Двирный Г. В., 2018

УДК 621.791

## РАЗРАБОТКА ГОЛОВКИ ДЛЯ ОРБИТАЛЬНОЙ СВАРКИ НЕПОВОРОТНЫХ СТЫКОВ ИЗДЕЛИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

В. В. Ананьев<sup>1</sup>, Р. В. Зайцев<sup>1</sup>, В. Ю. Гусев<sup>1</sup>, А. И. Демченко<sup>2</sup>, И. А. Скачков<sup>1</sup>

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

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

*Разработана модульная сварочная головка закрытого типа для сварки неповоротных стыков изделий цилиндрической формы с жидкостным охлаждением рабочей зоны.*

*Ключевые слова: орбитальная сварка, неповоротный стык, герметичное соединение.*

## DEVELOPMENT OF THE HEAD FOR ORBITAL WELDING OF NON-TURNED CUSHIONS OF CYLINDRICAL FORM PRODUCTS

V. V. Ananev<sup>1</sup>, R. V. Zaitsev<sup>1</sup>, V. Y. Gusev<sup>1</sup>, A. I. Demchenko<sup>2</sup>, I. A. Skachkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: ananevvv@iss-reshetnev.ru

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

*A modular welding head of a closed type for welding non-rotating joints of cylindrical products with liquid cooling of the working zone was developed.*

*Keywords: orbital welding, non-turning joint, hermetically sealed connection.*

В настоящее время лидерами в области орбитальной сварки являются зарубежные производители «Polysoude» (Франция), «Аххаиг» (Франция), «ESAB» (Швеция), «Arc Machine Inc.» (США), отечественных аналогов крайне мало и зачастую Российские головки уступают по качеству и функциям. При этом стоимость головок зарубежного производителя очень высока, ремонт сложен и так же требует значительных затрат. Так же, в рамках политики импортозамещения, существует острая необходимость разработки Российского, конкурентоспособного аналога, не уступающего по функциям и возможностям.

В АО «ИСС» орбитальная сварка применяется для изготовления и монтажа системы терморегулирования (СТР) изделия, для сварки гермоводов и сварки в изделие герметичных соединителей. Так как сварка СТР производится в монтажных условиях, по сложным схемам и в ограниченном пространстве, существует необходимость применения головок для орбитальной сварки закрытого типа, компактных размеров.

Исходя из представленной проблемы, основной целью проектирования была разработка компактной

закрытой головки для орбитальной сварки, с широко доступными составными частями, простой в обслуживании и ремонте.

Сварочные головки орбитальной сварки закрытого типа всех производителей схожи по конструкции и отличаются лишь исполнением крепежного механизма. Поэтому за основу предложенной разработки было решено взять стандартный тип корпуса с двумя откидными креплениями с обеих сторон (рис. 1).

Разработана сварочная головка закрытого типа (рис. 2), которая отличается от аналогов схемой размещения элементов подачи сварочного тока, использованием шагового двигателя (взамен сервопривода) (рис. 3).

Разработан новый принцип подачи защитного газа в газовую камеру (рис. 4), что значительно экономит внутреннее пространство.

Спроектирована система жидкостного охлаждения (рис. 5), что позволяет избежать выгорания элементов, расположенных в непосредственной близости к зоне сварки и увеличивает срок службы головки, конструкция является модульной, что позволяет получить легкий доступ к любой составляющей головки.



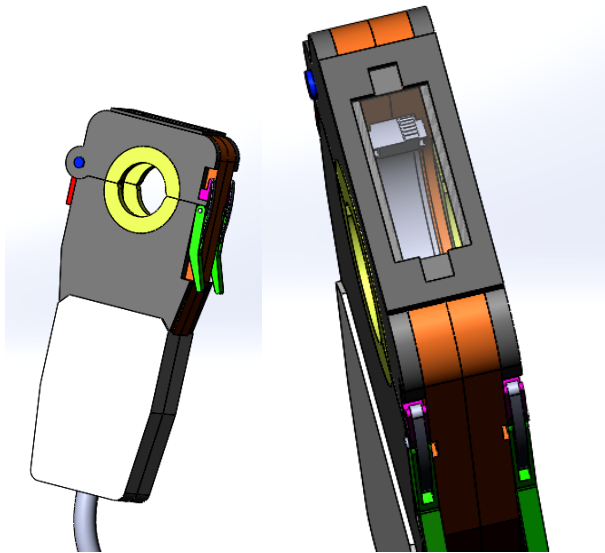


Рис. 1. Корпус разработанной головки

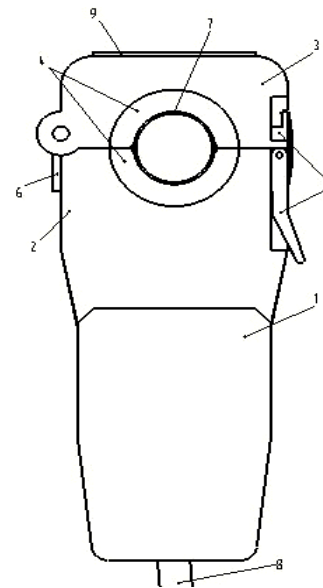


Рис. 2. Общий вид:

1 – корпус головки; 2 – нижняя облицовочная пластина; 3 – верхняя облицовочная пластина; 4 – фиксатор; 5 – замок; 6 – блок поворотного крепления; 7 – изделие (труба); 8 – шланг подачи; 9 – верхняя пластина со смотровым стеклом)

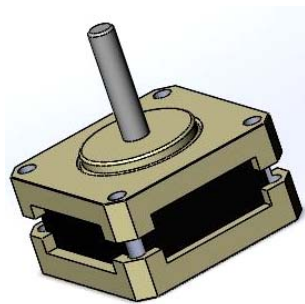


Рис. 3. Шаговый двигатель

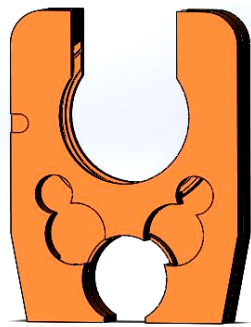


Рис. 4. Газовая камера

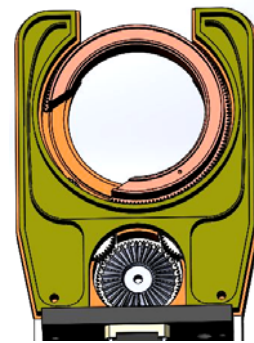


Рис. 5. Система жидкостного охлаждения

© Ананьев В. В., Зайцев Р. В., Гусев В. Ю., Демченко А. И., Скачков И. А., 2018

УДК 629.7

## КОНСТРУИРОВАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ МОНТАЖА СТАБИЛИЗАТОРОВ МОДЕЛИ РАКЕТЫ

Р. С. Брылев, М. С. Руденко, С. А. Пикулин, 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: 19pikulin@mail.ru

*Рассмотрены основные проблемы приклеивания стабилизаторов и их последствия, разработан стапель для приклейки, выявлены преимущества и недостатки его конструкции, указаны пути дальнейшего улучшения процесса сборки.*

*Ключевые слова: устойчивость, стабилизаторы, стапель, клеевое соединение.*

## DESIGNING A UNIVERSAL DEVICE FOR THE INSTALLATION OF STABILIZERS OF ROCKET MODEL

R. S. Brylev, M. S. Rudenko, S. A. Pikulin, V. V. Kolga

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: 19pikulin@mail.ru

*In the article are main problems of the gluing of stabilizers and its consequences, the assembly jig for the gluing is designing, advantages and disadvantages of its construction are revealed, ways to further improve the assembly process are indicated.*

*Keywords: stability, stabilizers, assembly jig, adhesive bond.*

Устойчивость и вертикальность полета – главные условия безопасного запуска неуправляемой модели ракеты. Вертикальность запуска обеспечивается направляющими стартового стола [1]. Устойчивость же проще всего обеспечить с помощью стабилизаторов. Плоские стабилизаторы позволяют сместить вниз центр давления ракеты, увеличивая запас статической устойчивости, и оказывают незначительное влияние на аэродинамические характеристики [2]. Достаточную прочность контакта стабилизаторов с корпусом и точность их позиционирования обеспечить сложно. Но при правильном расположении и надежном приклеивании, возможно добиться вертикальности полета и уменьшения величины колебаний относительно центра масс ракеты, что снизит нежелательные потери энергии и позволит достичь необходимой высоты.

Также, как и в ракетостроении, при создании моделей ракет для решения такого рода проблем возможно использование разнообразных шаблонов, фиксирующих устройств и стапелей. При выполнении клеевых соединений они обеспечивают постоянство величины зазора между скрепляемыми деталями [3].

Погрешности приклейки (рассмотрены в статье [4]) имеют различные последствия: одни приводят к увеличению сопротивления воздуха и нагрузки на место приклейки, другие уменьшают устойчивость,

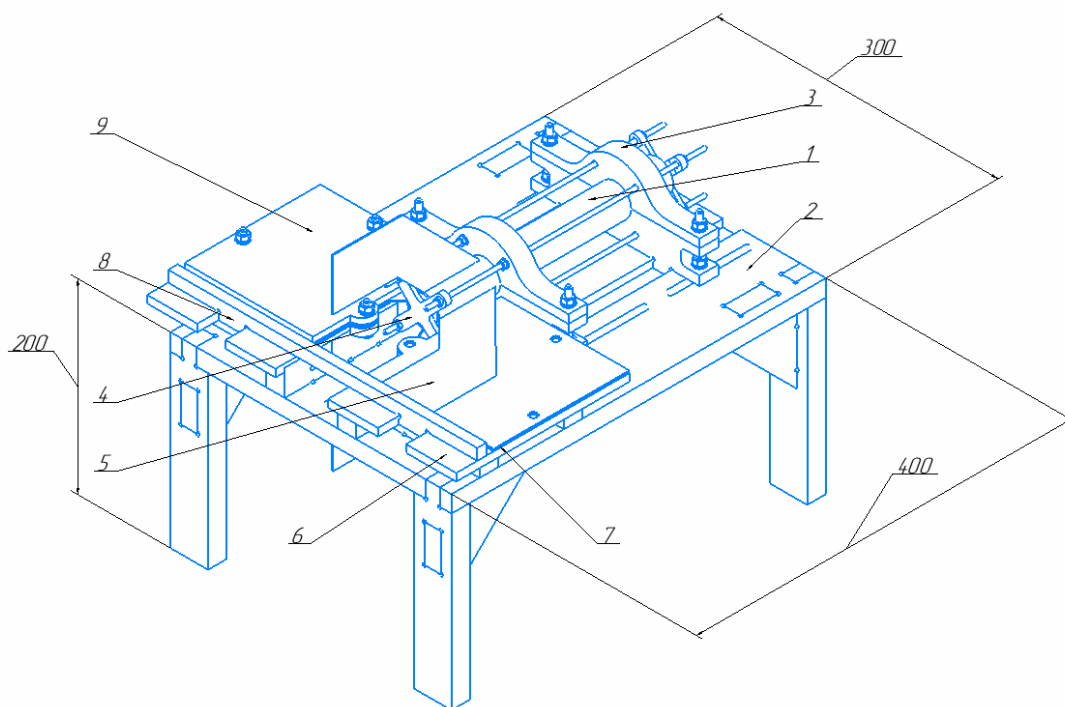
третьи изменяют расчетное положение центра давления.

Для надежной фиксации во время приклейки необходимо наложить на конструкцию следующие ограничения: исключить перемещения корпуса и его вращение; средняя плоскость стабилизатора должна быть перпендикулярна поверхности корпуса; все стабилизаторы должны быть расположены симметрично относительно оси корпуса на необходимом расстоянии от его задней кромки.

Для выполнения всех перечисленных условий был разработан, собран и испытан стапель, представленный на рисунке.

Все детали изготовлены из фанеры на фрезерном станке. В зависимости от детали и ее функции толщина отличается, обеспечивая необходимую жесткость конструкции. Стапель позволяет приклеивать стабилизаторы различных размеров, с размахом до 300 мм, а при замене стоек с крышками использовать корпус различных диаметров (30–50 мм). С учетом возможного изменения длин корпуса и стабилизаторов некоторые фиксирующие элементы сделаны подвижными.

Фиксация корпуса 1, представляющего собой тонкостенный цилиндр, и установка его параллельно относительно плиты 2 осуществляется с помощью подвижных креплений 3, устанавливающих корпус в удобном для приклейки положении.



Стапель

Осевое перемещение и вращение устраняются за счет крестообразных креплений 4. Стабилизатор 5 укладывается на столик 6. При необходимости можно отрегулировать его положение (по высоте) относительно линии приклеивания с помощью прокладок 7, и планки 8 (относительно оси корпуса). Далее поверхности приклейки корпуса и стабилизатора смазываются эпоксидной смолой и стабилизатор прижимается к корпусу, а прижим 9 фиксируется болтами.

Таким образом, приклеиваются за раз только два стабилизатора. Для приклейки оставшихся конструкция разбирается и корпус устанавливается в крепления так чтобы один из стабилизаторов попал в прорезь в плите. Далее он закрепляется в строго вертикальном положении. Затем производится приклейка оставшихся стабилизаторов.

Такой способ приклейки обеспечивает фиксированное положение стабилизаторов и корпуса и позволяет достаточно точно устанавливать их друг относительно друга. Однако данная конструкция имеет и свои недостатки: достаточно сложно точно отрегулировать положение стабилизатора по высоте; прижатие к корпусу трудно осуществимо из-за формы стабилизаторов; достаточно большое время сборки и процесса приклеивания из-за большого количества резьбовых соединений; возможность приклейки только двух стабилизаторов за раз.

В дальнейшем улучшение качества приклейки и позиционирования возможно за счет пазов в корпусе, позволяющих точно установить и прижать стабилизаторы. Конструкция должна стать более универсальной и точной за счет применения металлических деталей сложной формы, которые нельзя изготовить на простых фрезерных станках.

#### Библиографические ссылки

1. Савченко А. М. Конструирование стартового стола для моделей ракет. // Актуальные проблемы авиации и космонавтики [Электронный ресурс] : тезисы XII междунар. науч.-практ. конф. творческой молодежи (10–14 апреля 2017 г., Красноярск) : в 3 т. Т. 1. Технические науки. Информационные технологии. Сообщения школьников / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017. С. 90–91.
2. Авилов М. Н. Модели ракет (проектирование и полет). М. : ДОСААФ, 1968. С. 34.
3. Гардымов Г. П., Парфенов Б. А., Пчелинцев А. В. Технология ракетостроения : учеб. пособие. СПб. : Специальная литература, 1997. С. 136.
4. Минимизация возникновения дефектов при монтаже стабилизаторов неуправляемых ракет / М. С. Руденко, П. А. Орлин, А. С. Тимохович и др. // Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. науч. конф. (08–11 ноября 2017, г. Красноярск) : в 2 ч., часть 1 / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017. С. 41–42.

#### References

1. Savchenko A. M. [Construction of the launch pad for the model rockets]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики: tezisy XII mezhdunar. nauch.-prakt. konf. tvorcheskoy molodezhi (10–14 aprelya 2017 g., Krasnoyarsk): v 3 t. T. 1. Tekhnicheskie nauki. Informatsionnye tekhnologii. Soobshheniya shkol'nikov* / pod obshh.red. Yu. Yu. Loginova. [Actual problems of aviation and Astronautics: proceedings of the XII Intern. scientific.-prakt. Conf. creative youth (10–14 April 2017, Krasnoyarsk): in 3 T. P. 1. Technical science. Information

technology. Messages students) / under Ls. ed. Yu. Loginov;]. Krasnoyarsk, 2017. P. 90–91 (in Russ).

2. Avilov M. N. *Modeli raket (proektirovanie i polet)*. [Rocket models (design and flight)]. Moscow, DOSAAF, 1968. P. 34

3. Gardymov G. P., Parfenov B. A., Pchelintsev A. V. *Tekhnologiya raketostroeniya: Uchebnoe posobie*. [Rocket technology: educational textbook]. St. Petersburg, Spetsial'naya literatura, 1997. P. 136.

4. Rudenko M. S., Orlin P. A., Timokhovich A. S. et al. [Mitigation of defects during installation stabilizers

of undeclared rockets]. *Reshetnevskie chteniya: materialy XXI Mezhdunar. nauch. konf. (08–11 noyabrya 2017, g. Krasnoyarsk): v 2 ch., chast' 1 / pod obshh. red. Yu. Yu. Loginova*. [Reshetnev reading: proceedings of the XXI Intern. scientific. Conf. (08–11 November 2017, Krasnoyarsk): 2 T. P. 1 / under the General ed. Yu. Loginov]. Krasnoyarsk, 2017. P. 41–42 (in Russ).

© Брылев Р. С., Руденко М. С.,  
Пикулин С. А., Кольга В. В., 2018

УДК 621.9.02

## АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ФОРМОВАНИЯ РАЗМЕРОСТАБИЛЬНЫХ РЕФЛЕКТОРОВ АНТЕНН КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

М. А. Гордовенко, М. М. Михнёв

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

*Представлены результаты теоретического расчета деформаций оправки, подставки и приспособления под собственным весом в зависимости от различной конструкции и материала подставок. Расчет позволяет оптимизировать конструкцию приспособления и гарантированно изготавливать размеростабильные рефлектора антенн космического аппарата из полимерных композиционных материалов с заданной точностью.*

*Ключевые слова: деформации, приспособление для формования, рефлектор, космический аппарат, антенна.*

## THE STRUCTURAL ANALYSIS OF THE WORK TOOL FOR THE MOULDING HIGH STABILITY DIMENSION REFLECTORS FOR THE SPACECRAFT ANTENNA

M. A. Gordovenko, M. M. Mikhnev

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: gordovenko@iss-reshetnev.ru

*The article presents the results of theoretical calculation the displacement a die-mould, support work tool by gravity as function of different constructs and material. The calculation allow optimize a construction of the work tool and guaranteed manufacture to the specified accuracy from polymer composite material of the high stability dimension reflectors for the space craft antenna.*

*Keywords: displacement, work tool for moulding, reflector, spacecraft; antenna.*

Наиболее сложным элементом антенны космического аппарата (КА) связи с точки зрения изготовления и поведения в условиях космоса является рефлектор. Требования, предъявляемые к зеркальным антеннам, устанавливаемым на космических аппаратах, вынуждают прибегать к использованию самых современных конструкций, технологий и материалов. Одной из наиболее технически сложных проблем является обеспечение прецизионной точности и качества состояния отражающей поверхности углепластиковых рефлекторов зеркальных антенн, особенно для антенн, работающих в Ka, Q-диапазонах. Крупногабаритные размеростабильные рефлектора антенн КА из полимерных композиционных материалов изготавливаются методом вакуумного формования, на формообразующей оснастке, которая должна обеспечить прочностные свойства, точность и шероховатость поверхности будущего зеркала отражателя антенны [1].

На точность рефлектора, влияют следующие факторы:

- физико-механические характеристики полимерного композиционного материала (модуль упругости, прочности при растяжении, сжатии, изгибе, плотность, теплопроводность и т. д.) зависящие от материала волокна и связующего, схема армирования, количество слоев, толщина и ширина препрега, направление волокон в препреге;

- конструкция и габариты рефлектора;

- режимы полимеризации приспособления и рефлектора (температура, давление, скорость нагрева и охлаждения и т. д.);

- физико-механические характеристики материала приспособления для формования;

- конструкция приспособления для формования;

- остаточные напряжения и деформации в конструкции отражателя после изготовления, связанные с процессом полимеризации, нагревом и последующим охлаждением отражателя и оснастки.

- погрешность (точность) изготовления формообразующей поверхности оправки.

Таким образом, уменьшение отклонения рабочей поверхности формообразующей оправки от теоретически заданной, составляет один из основных резервов повышения точности изготовления крупногабаритных размеростабильных рефлекторов антенн КА из ПКМ.

Следовательно, одной из актуальных задач в настоящее время становится разработка оптимальной конструкции оправки и внедрение технологического процесса изготовления высокоточных приспособлений для формования рефлекторов антенн КА [2].

Формообразующая поверхность оправки описывается уравнением, в соответствии с поверхностью (формой) и системой координат изготавливаемого рефлектора. Формообразующая поверхность оправок может быть осесимметричной (параболоид вращения полного профиля), неосесимметричной (вырезкой из

параболоида вращения, в т. ч. эллиптическая вырезка) и со специальным профилем (контурные) [3; 4].

Материал приспособления для формования оказывает значительное влияние на точность изготавливаемого рефлектора. Процесс полимеризации, связанный с нагревом и последующим охлаждением рефлектора и оснастки, является одной из основных причин появления в рефлекторе остаточных напряжений и деформаций (коробления) после процесса полимеризации. Таким образом, коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР) материала оснастки и композита должен быть близок по величине, особенно если ее линейные размеры велики.

В качестве материала оправок можно использовать инварные сплавы, высокоплотный мелкозернистый графит, эвкрипитбетон, стеклокерамику, композиционные материалы.

Наиболее часто используется инварный сплав (33 НКУЛ) 33%Ni. Сплав обладает низким ТКЛР в расширенном интервале температур: средний КЛТР в интервалах температур от минус 60 до +200 °С не превышает  $3,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [5].

Методом конечных элементов при помощи ПО MSC Patran в следующей последовательности выполнен расчёт:

- деформаций конструкции оправки под собственным весом из материала 33НКУЛ исходя из толщины свода формообразующей поверхности оправки равной 20 мм;
- деформаций конструкций подставок под весом оправки из материала 33НКУЛ и СЧ20;
- деформации конструкции приспособления для формования рефлекторов из материала подставки СЧ20.

Исходные данные для расчёта приведены в табл. 1.

На рисунке показана деформация приспособления для формования рефлектора диаметром 1500 мм, для подставки из материала серый чугун марки СЧ20.

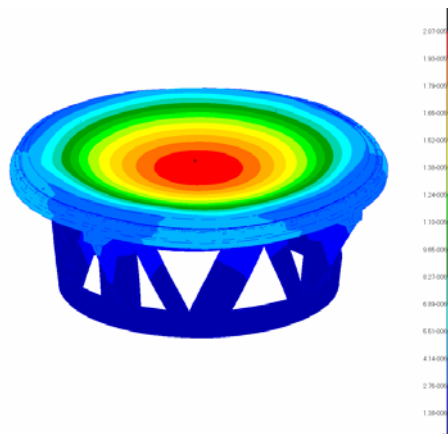
Максимальная деформация оправки с подставкой составляет 20,7 мкм, при этом остаточной (пластической) деформации не наблюдается.

В табл. 2 систематизированы результаты деформаций конструкций подставок и приспособления в зависимости от материала.

Таблица 1

Данные для расчёта деформаций

Параметр	Материал		Примечание
	33НКУЛ	СЧ20	
Модуль упругости, ГПа	125	110	–
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7700	7100	–
Коэффициент Пуассона	0,25–0,28	0,23–0,27	–
Масса оправки, кг	582	–	Для оправки рабочим диаметром 1500 мм
Масса подставки (конструкция 1), кг	850	782	
Масса подставки (конструкция 2), кг	552	509	



Деформации приспособления для формования рефлектора диаметром 1500 мм на подставке конструкция № 1 из материала подставки СЧ20

Таблица 2

Результаты деформаций конструкций подставок и приспособления в зависимости от материала

Наименование ДСЕ	Материал подставки	Перемещение, мкм
Оправка	33НКУЛ	6,9
Подставка (конструкция № 1)	34НКУЛ	36,5
	СЧ20	42,5
Подставка (конструкция № 2)	34НКУЛ	10,3
	СЧ20	11,5
Приспособление для формования конструкция № 1	СЧ20	20,7

**Выводы.**

1. В связи с тем, что механические свойства применяемых материалов практически совпадают разница между деформациями (перемещениями) одинаковых конструкций подставок и оправок незначительна, характер деформаций идентичный.

2. Предварительные результаты расчета деформаций оправок под собственным весом показывают, что максимальное перемещение возникает в центральной области приспособления. Максимальные напряжения возникают на концах ребер в месте соединения с плоскостью оправки, возникшие напряжения не достигают значений пластической деформации, таким образом, остаточные напряжения в конструкции оправки отсутствуют.

3. Наибольший интерес представляет расчет температурных деформаций приспособлений, так как основной операцией изготовления рефлекторов является процесс полимеризации. Оптимальная конструкция оправки (толщина свода формообразующей поверхности) совместно с оптимальными режимами дают возможность уменьшить напряженно-деформированное состояние рефлектора, следовательно, возможно уменьшить отклонения рефлектора от теоретической поверхности.

4. Необходимо продолжить расчет приспособлений для формования, варьируя конструкцией оправки (в том числе толщиной свода), подставки, применяемого материала для поиска оптимальной конструкции с минимальной деформацией.

5. Для увеличения точности расчетов необходимо:

– максимальное приближение разработанной математической модели конструкции приспособления (3D модели) с реальной конструкцией приспособления;

– определить и применить реальные значения основных физико-механических характеристик ( $E$ ,  $\delta$ ,  $\alpha$ ,  $\sigma$  и др.) применяемых материалов.

**Библиографические ссылки**

1. Способ изготовления оправок для формования размеростабильных углепластиковых рефлекторов антенн КА / В. В. Злотенко, А. Г. Масанов, М. А. Гордовенко и др. // Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем :

материалы науч.-техн. конф. мол. спец. ОАО «ИСС» им. акад. М. Ф. Решетнева, посвящённой 50-летию полёта в космос Ю. А. Гагарина ; под общ. ред. Н. А. Тестоедова ; ОАО «ИСС». Железногорск, 2012. С. 299–301.

2. Способ изготовления рефлектора : пат. 2563198 Рос. Федерация: № 2013155354/08 ; заявл. 12.12.2013 ; опубл. 20.09.2015, Бюл. № 26. 6 с.

3. Айзенберг Г. З., Ямпольский В. Г., Терешин О. Н. Антенны УКВ / под ред. Г. З. Айзенберга. В 2 ч. Ч. 1. М. : Связь, 1977.

4. Устройство для формования изделий сложной формы из полимерных композиционных материалов : заявка на изобретение 21613378 Рос. Федерация.

5. Формообразующая оснастка из литейных инваров в технологии ПКМ / А. Р. Ушаков, М. М. Михнев, В. И. Череменский и др. // Композитный мир. 2013. № 6 (51). С. 32–33.

**References**

1. Zlotenko V. V., Masanov A. G., Gordovenko M. A. i dr. Sposob izgotovlenija opravok dlja formovanija razmerostabil'nyh ugleplastikovyh reflektorov antenn KA/Razrabotka, proizvodstvo, ispytaniya i jekspluatacija kosmicheskikh apparatov i system : Materialy nauch.-tehn. konf. mol. spec. ОАО "ISS" im. ak. M. F. Reshetneva", posvjashhjonnoj 50-letiju poljota v kosmos Ju. A. Gagarina / pod obshh. Red. N. A. Testoedova ; ОАО «ISS». Zheleznogorsk, 2012. P. 299–301 (In Russ.)

2. Sposob izgotovlenija reflektora: pat. 2563198 Ros. Federacija: № 2013155354/08, zajavl. 12.12.2013; opubl. 20.09.2015, Bjul. № 26. 6 p.

3. Ajzenberg G. Z., Jampol'skij V. G., Tereshin O. N. Antenny UKV. Pod red. G. Z. Ajzenberga. V 2 ch. Ch. 1. M. : Svjaz', 1977.

4. Ustrojstvo dlja formovanija izdelij slozhnoj formy iz polimernyh kompozicionnyh materialov : zajavka na izobrenie 21613378 Ros. Federacija.

5. Formoobrazujushhaja osnastka iz litejnyh invarov v tehnologii PKM / A. R. Ushakov, M. M. Mihnev, V. I. Cheremenskij i dr. // Kompozitnyj mir. 2013, № 6 (51). P. 32–33 (In Russ.)

© Гордовенко М. А., Михнев М. М., 2018

УДК 629.764.7

## ТРОСОВАЯ СИСТЕМА, ПРИМЕНИМАЯ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛИФТОВ И ОРБИТАЛЬНЫХ ПЕРЕЛЕТОВ

Л. С. Едигеева

Научный руководитель – А. А. Авраменко

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

*Рассмотрено равновесное положение лунного космического лифта, трос которого имеет переменное сечение. Используется в качестве долговременной космической станции, остающейся неподвижной относительно Земли и Луны.*

*Ключевые слова: космический лифт, Земля, Луна, Kevlar 49, трос, станция.*

## CABLE SYSTEM APPLICABLE FOR SPACE ELEVATORS AND ORBITAL FLIGHTS

L. S. Edigeeva

Scientific Supervisor – A. A. Avramenko

Korolev Samara National Research University  
34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation  
E-mail: liana.edigeeva@mail.ru

*In this paper we consider the equilibrium position of the lunar space Elevator, the cable of which has a variable cross section. Such an Elevator can be used as a long-term space station that remains stationary relative to the Earth and the moon.*

*Keywords: space Elevator, earth, Moon, Kevlar 49, cable, station.*

Исследование космического лифта рядом ученых показало, что постройка космического лифта на Земле невозможна в связи с отсутствием подходящего по прочности материала. Однако требования к прочности материала значительно снижаются при рассмотрении лифта, связанного с Луной. В данной статье изучена модель Ф. А. Цандера. Рассмотрен трос, протянутый с поверхности Луны в сторону Земли за точку либрации L1, связывающий Луну с КС и удерживаемый от падения на поверхность Луны притяжением Земли. Получена модель лифта, которая может быть создана из существующих на данный момент материалов.

Для вычислений был выбран Kevlar-49 – материал с высоким модулем упругости, имеющий плотность 1,44 г/см<sup>3</sup> и прочность на растяжение около 3 620 МПа. В результате найдено подходящее сечение и масса КС. Приводятся результаты исследования. Также для сравнения были приведены расчеты системы

Фобос–Марс. Масса космической станции для системы Фобос–Марс составила 10 тонн. В результате расчетов легко увидеть, что создание троса для системы Фобос–Марс более выгодно системы Земля–Луна.

В результате предложен проект размещения долговременной станции, остающейся в одной и той же точке относительно Марса и Фобоса, а также относительно Земли и Луны. Такой лифт сможет радикально сократить расходы. Данная станция может быть применима как перегрузочная для перелетов с Земли на Луну и с Фобоса на Марс, а также для проведения различных исследований. Лифт сможет исполнять роль центра связи и управления всеми операциями вблизи Луны и Фобоса. Космическая станция может быть использована для межпланетных перелетов, так как требования к прочности материала при сборке аппарата на Земле высокие.

Предлагаемые модели (рис. 1–4).

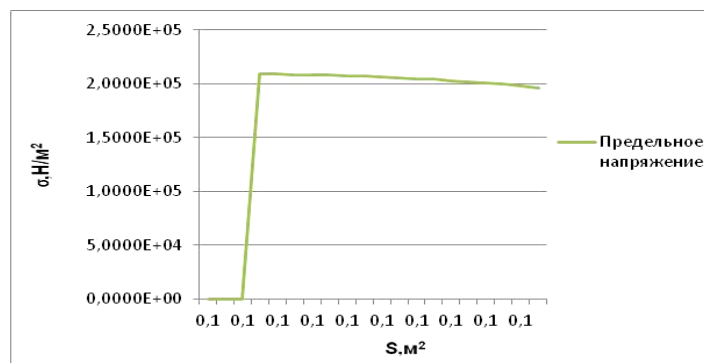


Рис. 1. Предельное напряжение троса системы Фобос–Марс





Рис. 2. Предельное напряжение троса системы Земля–Луна

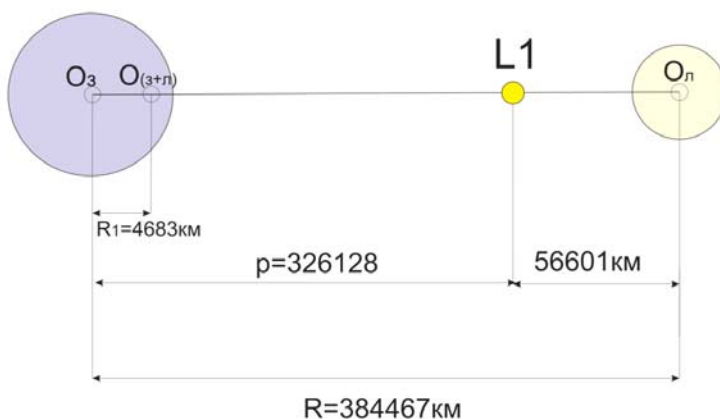


Рис. 3. Модель лифта Земля-Луна

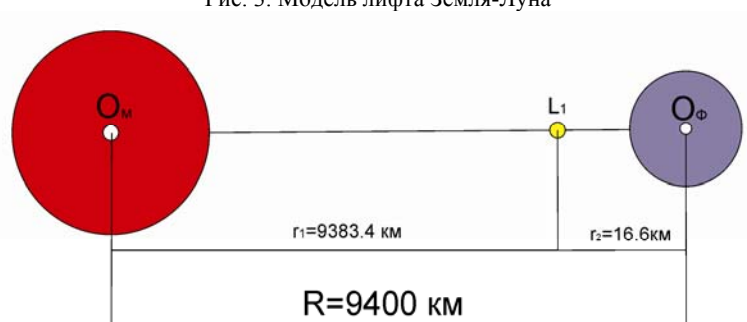


Рис. 4. Модель лифта Фобос-Марс

### Библиографические ссылки

### References

1. Первушин А. Космическое противостояние. Ч. II [Электронный ресурс]. URL: [www.e-reading.club/book.php?book=86954](http://www.e-reading.club/book.php?book=86954) (дата обращения: 25.03.2018).
2. Багров А. В. Космический лифт «Земля–Луна» как космическая транспортная система [Электронный ресурс]. URL: <http://spacecolonization.info> (дата обращения: 25.03.2018).
3. Арцутанов Ю. Н. В космос – на электровозе // Комсомольская Правда. 1960. 31 июля (воскресное приложение).
4. Коровин В. В. Статика лунного космического лифта постоянного сечения // Инновационная наука : междунар. науч. журн. 2017. № 03-1.

1. Pervushin A. Kosmicheskoye protivostoyaniye. CH. II. Available at: [www.e-reading.club/book.php?book=86954](http://www.e-reading.club/book.php?book=86954) (accessed: 25.03.2018).
2. Bagrov A. V. Kosmicheskiiy lift “Zemlya–Luna”, kak kosmicheskaya transportnaya sistema. Available at: <http://spacecolonization.info> (accessed: 25.03.2018)
3. Artsutanov Yu. N. V kosmos – na elektrovoze // Komsomol'skaya Pravda. 1960. 31 iyulya (voskresnoye prilozheniye).
4. Korovin V. V. Statika lunnogo kosmicheskogo lifta postoyannogo secheniya // Innovatsionnaya nauka : mezhdunar. nauch. zhurn. 2017. № 03-1.

УДК 629.764.7

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ АНИЗОГРИДНОГО АДАПТЕРА ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Д. А. Замятин

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

*Рассмотрена конструкция и конечно-элементная математическая модель адаптера для крепления тяжёлого космического аппарата информационного обеспечения к разгонному блоку ракеты-носителя.*

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

## DESIGN OF ANISOGRID ADAPTER FOR SPACECRAFT

D. A. Zamyatin

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

*This article describes the design and finite-element mathematical model of the adapter for fastening heavy information support spacecraft to upper stage of carrier rocket.*

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

В настоящее время для крепления космических аппаратов, как правило, используются адаптеры анизогридной конструкции; основание адаптера геометрически представляет собой усечённый конус, на котором расположены либо крепёжные элементы для одного космического аппарата, либо цилиндрическая часть, также анизогридной конструкции, для крепления нескольких КА, для группового запуска [1; 2].

В обоих случаях одной из ключевых задач проектирования адаптера является обеспечение диапазона частот колебаний, в котором отклонения адаптера и размещённых на нём космических аппаратов от продольной оси ракеты-носителя минимальны, с целью предотвращения соударения КА друг с другом и с обтекателем РН, а также во избежание нарушения целостности конструкции адаптера.

Особенно актуальна проблема минимизации амплитуды колебаний для крупногабаритных космических аппаратов, закреплённых непосредственно на коническом основании адаптера. Это обусловлено тем, что для крепления такого КА может быть использована только нижняя его часть, при котором закрепление будет консольным, и центр масс крупногабаритного полезного груза может быть расположен на достаточно большом удалении от места крепления. Всё это может привести к значительному росту амплитуды колебаний КА относительно продольной оси.

Проблема может быть частично решена путём использования для крепления к адаптеру силового каркаса самого космического аппарата, что повысит жёсткость связи КА со ступенью ракеты-носителя или разгонным блоком, приведя к росту частоты колебаний, а, следовательно, и к снижению их амплитуды.

Логично предположить, что для дополнительного повышения частоты и снижения амплитуды колебаний полезного груза целесообразно применение ка-

кой-либо дополнительной внешней конструкции, ограничивающей возможность отклонения КА от продольной оси РН. Такая конструкция должна фиксировать КА в верхней и средней его частях, благодаря чему консольное закрепление будет дополнено независимым подвесом.

Рассмотрим вариант крепления космического аппарата при помощи внешнего опоясывающего каркаса, представляющей собой ферму, оболочку, сетчатую анизогридную конструкцию, либо оптимальное сочетание этих силовых элементов. Подобная система крепления может быть выполнена из композиционных материалов и иметь относительно небольшую массу, обладая при этом достаточно высокой прочностью и эффективно справляясь с задачей снижения амплитуды колебаний закреплённого на ней груза, рассеивая вибрации при помощи многочисленных стержневых или сетчатых элементов.

Исходной точкой для проектирования усиленной системы крепления космического аппарата служит классическая конструкция анизогридного адаптера, имеющая форму усечённого конуса, но в данном случае расширяющаяся к верхней части, для эффективной поддержки торцевой грани КА, диаметр описанной окружности которой превышает диаметр платформы РБ.

Снаружи КА поддерживается анизогридной оболочкой, состоящей из двух частей – конической и цилиндрической, в сборе представляющих собой подобие корзины.

Для параметрической генерации конечно-элементной модели адаптера используется ряд программ, написанных на внутреннем языке программного пакета COSMOS/M GeoSTAR 2010, и позволяющих вносить оперативные изменения в значения проектных параметров и выполнять перестроения модели в автоматическом режиме [3; 4].

## Значения геометрических параметров модели адаптера

Основная анизогридная коническая опора для установки космического аппарата	
нижний диаметр	3 000 мм
верхний диаметр	3 600 мм
высота конструкции	1 350 мм
количество спиральных ребер	36 шт.
угол наклона спиральных ребер	17°
высота профиля ребра	60
ширина профиля ребра	20
Внешняя коническая анизогридная оболочка	
нижний диаметр	3 000 мм
верхний диаметр	4 800 мм
высота конструкции	3 100 мм
количество спиральных ребер	36 шт.
угол наклона спиральных ребер	17°
высота профиля ребра	50
ширина профиля ребра	10
Внешняя цилиндрическая анизогридная оболочка	
диаметр	4 800 мм
высота конструкции	4 700 мм
количество спиральных ребер	36 шт.
угол наклона спиральных ребер	20°
высота профиля ребра	50
ширина профиля ребра	10

В основе создания математических моделей анизогридных конструкций в настоящее время лежат методы численного моделирования, такие, как метод конечных элементов. Суть метода заключена в его названии. Область, в которой ищется решение дифференциальных уравнений, разбивается на конечное количество подобластей (элементов). В каждом из элементов произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции. В простейшем случае это полином первой степени. Вне своего элемента аппроксимирующая функция равна нулю. Значения функций на границах элементов (в узлах) являются решением задачи и заранее неизвестны. Коэффициенты аппроксимирующих функций обычно ищутся из условия равенства значения соседних функций на границах между элементами. Затем эти коэффициенты выражаются через значения функций в узлах элементов. Составляется система линейных алгебраических уравнений. Количество уравнений равно количеству неизвестных значений в узлах, на которых ищется решение исходной системы, прямо пропорционально количеству элементов. Так как каждый из элементов связан с ограниченным количеством соседних, система линейных алгебраических уравнений имеет разреженный вид, что существенно упрощает её решение.

Конечно-элементная модель адаптера служит основным объектом для всестороннего анализа технических характеристик конструкции. Грамотный подход к проектированию позволяет получить, зарегистрировать и проанализировать все интересующие теоретические данные с высокой степенью их точности и достоверности.

## Библиографические ссылки

1. Адаптер в виде сетчатой оболочки вращения конической формы из полимерных композиционных материалов : патент РФ 2350818 [Электронный ре-

сурс]. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2350818> (дата обращения: 14.04.2018).

2. Адаптер и способ его изготовления [Электронный ресурс]. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/220/2209162.html> (дата обращения: 14.04.2018).

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

4. Замятин Д. А., Кольга В. В., Нестеров В. А. Проектирование адаптера космического аппарата информационного обеспечения // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : материалы IV Междунар. науч. конф. : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2018.

## References

1. Adapter v vide setchatoy obolochki vrashcheniya konicheskoy formy iz polimernykh ompozitsionnykh materialov – patent RF 2350818 [Adapter in the form of a grid shell of rotation of the conical form from polymeric composite materials-the patent of the Russian Federation 2350818] (In Russ.). Available at: <http://www.freepatent.ru/patents/2350818> (accessed 14.04.2018).

2. Adapter i sposob ego izgotovleniya [Adapter and method of its manufacture] (In Russ.). Available at: <http://www.findpatent.ru/patent/220/2209162.html> (accessed 14.04.2018).

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

4. Замятин Д. А., Кольга В. В., Нестеров В. А. The design of the adapter of the information support spacecraft // Актуальные проблемы авиации и космонавтики ; Sib. gos. aehrokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2018

## ОСОБЕННОСТИ КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Д. А. Замятин, Е. Г. Баранова

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

*Рассмотрены особенности проектирования космического аппарата, выполняющего роль узла компьютерной сети.*

*Ключевые слова: компьютерная сеть, космический аппарат, орбита Земли, серверный комплекс, передача данных.*

### INFORMATION SUPPORT SPACE PLATFORM SPECIFICS

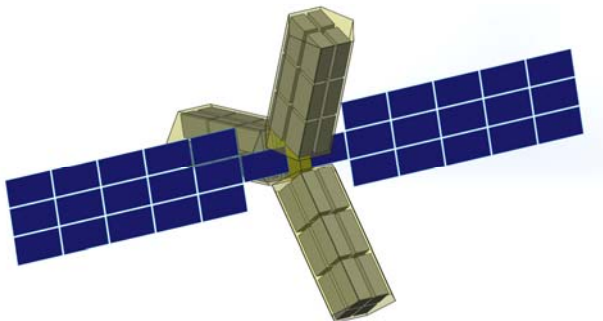
D. A. Zamyatin, E. G. Baranova

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

*This article describes the design features of the computer network host spacecraft.*

*Keywords: computer network, spacecraft, Earth orbit, the server complex data transfer.*

Космическая платформа, выполняющая роль узла орбитальной компьютерной сети, строится по модульному принципу, сходному со структурой орбитальных станций. Основную массу космической платформы составляют серверные модули – крупные контейнеры с размещённым на них компьютерным оборудованием (см. рисунок). Именно они являются системой хранения и оперативной обработки информации, орбитальным DATA-центром. Необходимость использования модульного принципа обусловлена спецификой назначения космической платформы. На рисунке показана трёхмерная геометрическая компьютерная модель, в упрощённом виде демонстрирующая один из вариантов схем сборки модулей космической платформы в единое целое [1].



Вариант схемы сборки космической платформы с креплением модулей хранения информации вокруг модуля энергообеспечения (модули связи не показаны)

Мощное серверное оборудование потребляет большое количество электрической энергии в единицу времени, а габариты модулей хранения информа-

ции практически полностью используются для размещения компьютерного оборудования, в связи с чем электроснабжение комплекса должно обеспечиваться отдельным модулем энергообеспечения, что позволит создать достаточную площадь солнечных батарей для питания серверного оборудования электрической энергией.

Модуль хранения и обработки информации представляет собой закрытый контейнер, имеющий форму правильной шестиугольной призмы высотой 7,8 м с диаметром описанной окружности 3,6 м. На каркасе контейнера крепятся блоки сетевых хранилищ. Согласно предварительным расчётам, требования к массе и габаритам контейнера при использовании современного оборудования позволяют обеспечить суммарный объём хранимой информации до 270 петабайт. Учитывая, что орбитальные DATA-центры предназначены не для долговременного хранения информации, а для её кэширования при передаче, такого объёма сетевых хранилищ предположительно должно хватать для выполнения задач сети в полной мере. Позднее, с повышением плотности данных на носителях информации будущих поколений, орбитальные DATA-центры будут подвергаться обновлениям аппаратного обеспечения [2; 3].

Потребляемая сетевым оборудованием мощность электроэнергии по предварительным расчётам, должна составлять приблизительно 480 кВт, что подтверждает, с одной стороны, целесообразность использования отдельного модуля космической платформы, служащего для электроснабжения сетевых хранилищ, с другой – техническую возможность реализации концепции без дополнительных затруднений, касающихся проблем энергообеспечения.

Таблица 1

## Характеристики модульного сетевого хранилища заданных габаритов

Показатели	Габариты, мм		Кол-во ячеек	
	Ячейки	Контейнера	В ряду	Общее
Высота	200	7 800	32	1 920
Ширина	200	3 000	10	
Глубина	200	1 800	6	
Масса, кг	6			11 520
Объём данных, Тб	144			276 480
Объём данных, Пб	0,140 625			270
Потребляемая мощность, Вт	250			480 000

Таблица 2

## Коэффициенты фотоэлектрического преобразования различных типов солнечных батарей

Тип фотоэлементов и модулей	Коэффициент фотоэлектрического преобразования, %
Кремниевые	
Si (кристаллический)	24,7
Si (поликристаллический)	
Si (тонкопленочная передача)	
Si (тонкопленочный submodule)	10,4
III-V	
GaAs (кристаллический)	25,1
GaAs (тонкопленочный)	24,5
GaAs (поликристаллический)	18,2
InP (кристаллический)	21,9
Тонкие плёнки халькогенидов	
CIGS (фотоэлемент)	19,9
CIGS (submodule)	16,6
CdTe (фотоэлемент)	16,5

Для определения указанных характеристик был проведён поиск и анализ необходимой информации из открытых источников о современных сетевых хранилищах и выполнен краткий расчёт представляющих интерес характеристик (для одного модуля хранения и обработки информации), приведённый в табл. 1 [3–5].

Модуль энергообеспечения представляет собой космический аппарат, оснащённый солнечными батареями большой площади и, при необходимости, оборудованием для преобразования электроэнергии. Согласно предварительным расчётам, для питания компьютерного оборудования одного модуля хранения данных необходима мощность не менее 480 кВт.

Один из основных способов получения электрической энергии на космических аппаратах – солнечные батареи: они работают долгое время без расхода каких-либо материалов, и в то же время являются экологически безопасными, в отличие от ядерных и радиоизотопных источников энергии.

Также, в 2018 г., с открытием флексо-фото-вольтаического эффекта, обнаружена возможность увеличения КПД фотоэлементов [6], а также за счёт продления жизни горячих носителей (электронов) теоретический предел их эффективности поднялся с 34 сразу до 66 процентов [7].

Таким образом, площадь солнечных батарей для одной части серверного комплекса должна быть около 500 м<sup>2</sup>, что является достаточно большой величи-

ной, однако, с учётом недавних разработок в области гелиоэнергетики площадь солнечных панелей может быть сокращена практически вдвое.

## Библиографические ссылки

1. Замятин Д. А., Богданова В. С., Кольга В. В. Концепция орбитальной компьютерной сети // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : материалы III Междунар. науч. конф. (10–14 апреля 2017, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017.

2. Замятин Д. А., Богданова В. С., Кольга В. В. Основные принципы структуры орбитальной компьютерной сети // Решетневские чтения [Электронный ресурс] : 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. – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 24,75 МБ). Режим доступа: <https://reshetnev.sibsau.ru/page/materialykonferentsii>.

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 автоматизи-

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

4. TS-453Bmini | QNAP [Электронный ресурс]. URL: <https://qnap.ru/ts-453bmini> (дата обращения: 14.04.2018).

5. Обзор инженерных систем ЦОД: Модульный ЦОД [Электронный ресурс]. URL: <http://alldc.ru/documentation/document/613.html> (дата обращения: 14.09.2016).

6. Физики выдавили из солнечных батарей дополнительную энергию [Электронный ресурс]. URL: <https://nplus1.ru/news/2018/04/20/flexo-photovoltaic-effect> (дата обращения: 20.07.2018).

7. Химики продлили жизнь горячим электронам в перовскитных батареях [Электронный ресурс]. URL: <https://nplus1.ru/news/2018/01/17/hot-carriers> (дата обращения: 20.07.2018).

### References

1. Zamyatin D. A., Bogdanova V. S., Kolga V. V. The concept of orbital computer network // Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики : materialy III Mezhdunar. nauch. konf. (10–14 aprelya 2017, g. Krasnoyarsk) : v 2 ch. / pod obshch. red. Yu. Yu. Loginova ; Sib. gos. aehrokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2017

2. Zamyatin D. A., Bogdanova V. S., Kolga V. V. Main structure principles of the orbital computer network // Sib. gos. aehrokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2017

3. Zamyatin D. A., Bogdanova V. S., Stepanova S. V. The concept of an independent orbital computer network // New information technologies and systems ; Penza State University. Penza, 2017

4. TS-453Bmini | QNAP. Available at: <https://qnap.ru/ts-453bmini> (accessed 14.04.2018).

5. Obzor-inzhenernyh-sistem-tsod-modulnyj-tsod [Review of engineering systems for data centers: modular data center] (In Russ.). Available at: <http://alldc.ru/documentation/document/613.html> (accessed: 14.09.2016).

6. Fiziki-vydavili-iz-solnechnyh-batarey-dopolnitelnuyu-ehnergiyu [Physicists have extruded out solar panels for more energy] (In Russ.). Available at: <https://nplus1.ru/news/2018/04/20/flexo-photovoltaic-effect> (accessed: 20.07.2018).

7. Himiki-prodlili-zhizn-goryachim-ehlektronam-v-perovskitnyh-batareyah [Chemists have extended the life of the hot electrons in the perovskite batteries] (In Russ.). Available at: <https://nplus1.ru/news/2018/01/17/hot-carriers> (accessed: 20.07.2018).

© Замятин Д. А., Баранова Е. Г., 2018

**ПРОЕКТНО-БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА  
ДЛЯ СБОРА КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ  
НА БАЗЕ ПЛАТФОРМЫ «ЭКСПРЕСС-2000»**

С. А. Ишков, П. В. Фадеев\*, Г. А. Филиппов

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

\*E-mail: fadeenkov@ssau.ru

*Рассматривается возможность применения модернизированной платформы «Экспресс-2000» для задачи утилизации космического мусора на геостационарной орбите.*

*Ключевые слова: платформа «Экспресс-2000», модернизация, космический мусор, геостационарная орбита.*

**BALLISTIC ANALYZE OF SPACECRAFT FOR SPACE DEBRIS DISPOSAL AT GEOSTATIONARY  
ORBIT AT BASE OF PLATFORM “EXPRESS-2000”**

S. F. Ishkov, P. V. Fadeenkov\*, G. A. Filippov

Samara National Research University  
34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation

\*E-mail: fadeenkov@ssau.ru

*This article consider a possibility of modernize platform “Express-2000” applying for space debris disposal at geostationary orbit.*

*Keywords: platform “Express-2000”, modernization, space debris, geostationary orbit.*

**Введение.** Рассматривается задача оценки возможности применения существующих транспортных систем космических аппаратов (КА) на базе электроракетных двигателей (ЭРД) малой тяги для транспортировки крупногабаритных фрагментов космического мусора (ФКМ) с геостационарной орбиты (ГСО) на орбиту захоронения. Для решения поставленной задачи предлагается использовать комбинированную транспортную систему, которая включает в себя разгонный блок на импульсном химическом двигателе и космический аппарат – сборщик мусора (КАСМ) с ЭРД малой тяги. В качестве платформы для формирования проектного облика КАСМ предлагается использовать КА «Экспресс-2000», в качестве ракеты-носителя – РН «Союз-2.1 б».

Предлагается следующая баллистическая схема перелёта:

- 1 РН выводит на опорную орбиту КАСМ и разгонный блок с ЖРД;
- 2 Разгонный блок переводит КАСМ на заданную эллиптическую орбиту и отделяется от него;
- 3 КАСМ с использованием ЭРД малой тяги переходит в окрестность первого ФКМ на ГСО.
- 4 КАСМ совершает операцию по сближению с данным ФКМ, его фиксации с КАСМ, переводит на орбиту захоронения и возвращается на ГСО к следующему ФКМ;
- 5 Челночные операции продолжаются до полной выработки рабочего тела КАСМ или выработки его полного ресурса.

Таким образом, поставленная задача будет решаться в два этапа. На первом этапе оптимизируется

комбинированная схема перелёта на ГСО, на втором – анализируются возможности КАСМ по утилизации ФКМ на орбите захоронения.

Задача анализа возможности утилизации нескольких ФКМ на ГСО будет заключаться в расчёте количества циклов челночных операций второго этапа  $n$  и анализу общего времени миссии. Условием успешного выполнения миссии будет:

$$\begin{aligned} n &\geq n_{\text{зад}}, \\ T &\leq T_{\text{расп}}, \end{aligned}$$

где  $n_{\text{зад}}$  – заданное количество утилизированных ФКМ;  $T_{\text{расп}}$  – общий допустимый ресурс системы.

Рассмотрим в качестве примера расчёт параметров системы для РН «Союз-2.1б» и РБ «Фрегат». В качестве прототипа системы воспользуемся платформой «Экспресс-2000» с электроракетной двигательной установкой.

За счёт импульса тяги химического двигателя РБ «Фрегат» может быть переведён на эллиптическую орбиту с параметрами – большая полуось 16500 км и эксцентриситетом 0,6.

Далее решается краевая задача о перелёте с эллиптической орбиты на ГСО. Результаты решения данной задачи следующие: затраты характеристической скорости 4,6 км/с, затраты рабочего тела 850 кг.

Продолжительность перелёта определяется количеством ЭРД. Так, если использовать штатные двигатели платформы (4 СПД-100), то время перелёта составит 484 дня. Чтобы сократить время перелёта и повысить манёвренные возможности КАСМ, предлагается увеличить количество ЭРД, используя систему

электропитания полезной нагрузки – можно увеличить количество двигателей до 12, тягу до 0,996 Н, а время перелёта составит 157 суток. Таким образом, чтобы обеспечить перелёт КАСМ на ГСО потребуется установить дополнительные баки с рабочим телом и ЭРД общей массой около 950 кг.

Зависимости радиусов перигея  $R_{\pi}$ , апогея  $R_{\alpha}$ , наклона  $i$  и программы управления [1] от затрат характеристической скорости  $V_x$  приведены на рис. 1, 2.

Оптимальная траектория содержит два характерных участка: первый – почти одинаковое увеличение радиусов апогея и перигея; второй – уменьшение радиуса апогея и увеличение радиуса перигея. Наклонение меняется почти по линейной зависимости.

После того как КАСМ выведен на ГСО, он совершает челночные операции по утилизации ФКМ: КАСМ сближается с ФКМ, стыкуется с ним и переводит его на «орбиту захоронения» (первый этап), возвращается на ГСО к следующему ФКМ (второй этап).

Задача построения программ управления перелётом между ГСО и «орбитой захоронения» рассматривается в относительной системе координат, начало которой расположено в некоторой точке ГСО [2],

а положение КАСМ задаётся вековыми и периодическими отклонениями. Примем, что ФКМ расположены на ГСО на равном расстоянии друг от друга в один градус или 736 км.

Ранее были рассмотрены программы управления сближением на ГСО с малой трансверсальной тягой [2]. Для упрощения расчётов принята структура управления, состоящая из трёх участков.

Первый и третий участки являются активными, а второй – пассивным. Параметрами программы управления являются продолжительности участков. Введение пассивных участков позволит уменьшить затраты характеристической скорости и одновременно управлять всеми плоскостными параметрами орбиты.

Проведённый расчёт показал, что наименьшие затраты характеристической скорости достигаются, если на первом этапе применить программу управления с одинаковыми знаками ускорения от тяги на активных участках. На втором этапе знаки ускорения от тяги на активных участках разные.

Таким образом, траектория увода ФКМ с ГСО и перелёта КАСМ к следующему фрагменту ФКМ состоит из шести участков – четыре активных и два пассивных (рис. 3).

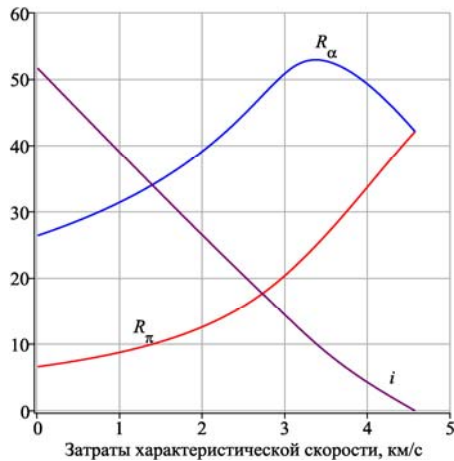


Рис. 1. Зависимости радиусов перигея  $R_{\pi}$ , апогея  $R_{\alpha}$ , наклона  $i$  от затрат характеристической скорости  $V_x$

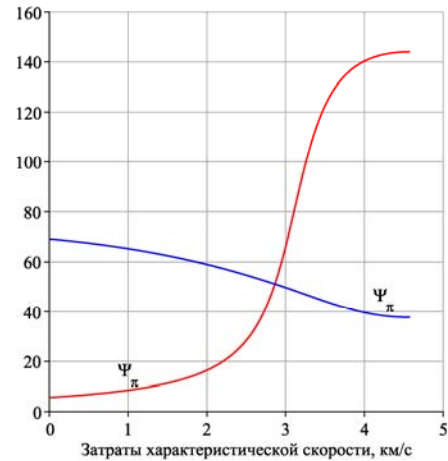


Рис. 2. Зависимости углов отклонения тяги в окрестности перигея  $\Psi_{\pi}$  и апогея  $\Psi_{\alpha}$  от затрат характеристической скорости  $V_x$

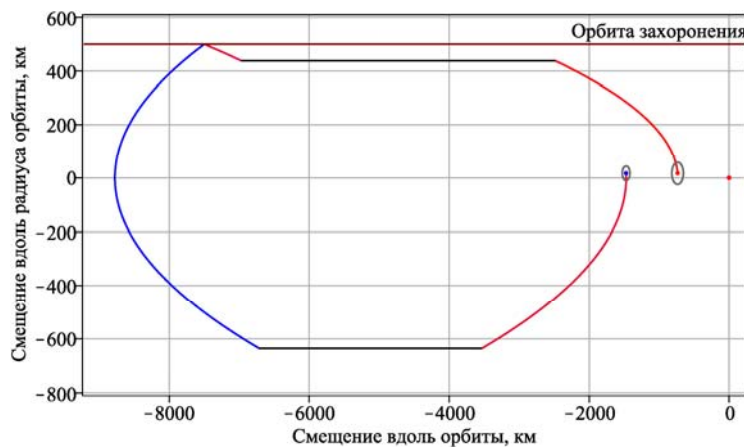


Рис. 3. Траектория движения КАСМ на одной челночной операции



На рис. 3 синим и красным цветом обозначены активные участки, а чёрным пассивные. Такой манёвр можно осуществить за 4,47 суток, затратив около 16,9 кг рабочего тела.

Таким образом, с ГСО можно убрать приблизительно 18 неработающих спутников за 0,7 лет работы КАСМ, в том числе, затратив около полугода на выведение КАСМ на ГСО.

Проектно-баллистический анализ показал, что возможно создание КАСМ на базе платформы «Экспресс-2000» с незначительными доработками.

#### Библиографические ссылки

1. Фадеев П. В., Ишков С. А. Оптимальная программа управления малой непрерывной тягой при перелёте между некомпланарными эллиптической и геостационарной орбитами // Вестник Самар. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. С. П. Королёва. 2011. № 1. С. 38–43.

2. Ishkov S. A., Filippov G. A., Khramov A. A. Autonomous Control Program for Special Spacecraft Debris Collector Rendezvous Transfer with Fragment of Space Debris with Low-thrust // Procedia Engineering. 2017. Vol. 185. P. 388–395.

#### References

1. Fadeenkov P. V., Ishkov S. A. Optimal program of controlling continuous low thrust in the flight between noncoplanar elliptical and geostationary orbits // Vestnik of the Samara National Research University named after academician S. P. Koroliov (national research university). 2011. No 1. P. 38–43.

2. Ishkov S. A., Filippov G. A., Khramov A. A. Khramov Autonomous Control Program for Special Spacecraft Debris Collector Rendezvous Transfer with Fragment of Space Debris with Low-thrust // Procedia Engineering. 2017. Vol. 185. P. 388–395.

© Ишков С. А., Фадеев П. В., Филиппов Г. А., 2018

УДК 629.7

## КАНТОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ НА МЕХАНИЗМЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С ГИБКИМИ ЗВЕНЬЯМИ

Д. А. Климовский, Н. А. Смирнов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: Klinsky92@yandex.ru

*По мере увеличения массово-габаритных характеристик ракет перед технологами ракетостроительных заводов и конструкторских бюро возникают новые сложные технические задачи. Рассматривается возможность использования механизмов параллельной структуры с гибкими звеньями для кантования крупногабаритных частей ракетной техники.*

*Ключевые слова: механизм параллельной структуры, гибкое звено, кантователь.*

## TILTING OF ROCKET PARTS IN PARALLEL KINEMATIC MACHINE WITH FLEXIBLE LINK

D. A. Klimovskiy, N. A. Smirnov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: Klinsky92@yandex.ru

*As the mass and size of the rockets increase, technologists of rocket-building plants and design bureaus face new and complicated technical tasks. The paper considers the possibility of using parallel kinematic machine with flexible links for the tilting of large-sized parts of rocket.*

*Keywords: parallel kinematic machine, flexible link, tilter.*

Особенностью ракетостроения является применение большого количества технологической оснастки, инструмента и специального оборудования [1]. Большая часть нестандартного оборудования для крупногабаритных изделий представляет оснастку для подъема, перемещения, вращения в пространстве. Это так называемые траверсы, кантователи, траверсы-кантователи.

Кантование одна из наиболее часто встречающихся операций по изменению пространственного положения изделия в производстве ракетной техники. Это связано с тем, что различные операции по обработке и сборке изделий требуется производить в определенных положениях: вертикально или горизонтально для обечаек, с внутренней или наружной стороны в вертикальном или горизонтальном положении для днищ и камер ДУ.

Традиционный кантователь представлен на рисунке *слева* [2]. Обычно такие конструкции состоят из рамного основания, корзины или ложементов для кантования, мест для крепления траверсы. Кантование производится краном через траверсу. Помимо простоты и надежности, конструкции такого типа имеют существенный недостаток. Они предназначены для одного конкретного изделия или сборочной единицы, и с трудом поддаются унификации. Любые изменения конструкции и габаритов изделия повлекут серьезное изменение кантователя, что приведет к дополнительным затратам в производстве. Во-вторых, в процессе кантования требуется согласованное управление подъемом крюка и линейным перемеще-

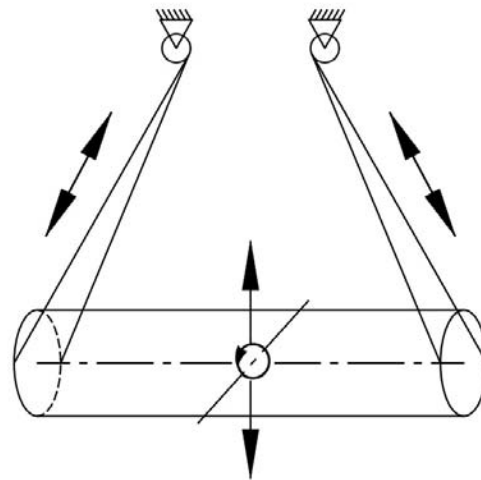
нием крана вдоль участка, что требует особых навыков от машиниста крана.

В настоящее время механизмы параллельной структуры (МПС) используются в различных областях: от обрабатывающих станков до пространственных манипуляторов. В области ракетостроения представляют интерес МПС с гибкими звеньями, которые имеют большое рабочее пространство, большой диапазон перемещаемых масс, быстрое развертывание, низкую металлоемкость конструкции, универсальность [3–6]. Рабочий орган приводится в действие набором гибких звеньев, роль которых выполняют тросы.

Конечно, МПС с гибкими связями имеют ограничения по углам поворота изделия. Но можно найти такие комбинации положения точек крепления тросов к изделию и неподвижной опоре, позволяющей вращать изделие в определенной плоскости на  $90^\circ$ .

Возможная схема МПС с гибкими звеньями для кантования обечаек или ступеней ракет представлена на рисунке *справа*.

Представленный механизм состоит из двух барабанов с приводами, на которые наматывается трос. Совместное изменение длин тросов позволяет перемещать изделие по вертикальной оси и вращать его в вертикальной плоскости. Для корректной работы необходимо, чтобы расстояние между барабанами было меньше длины изделия, и располагались они как можно ближе друг к другу. Это позволит уменьшить горизонтальные перемещения центра масс изделия.



Традиционный кантователь (слева); кантователь на основе механизма параллельной структуры с двумя гибкими звеньями (справа)

К достоинству рассматриваемого механизма можно отнести большое рабочее пространство, низкую металлоемкость конструкции. Основное достоинство конструкции – универсальность. Параметры кантователя не привязаны к геометрическим параметрам изделия, что особенно актуально на этапе освоения производства. Также стоит отметить производственную гибкость.

Для нового изделия достаточно изменить и изготовить новую конструкцию захватывающих устройств, что влечет экономию материальных ресурсов и времени.

Освоение новых изделий ракетной и авиационной техники требует внедрения на производстве новых технических решений. Увеличение массово-габаритных параметров изделий влечет перевооружение производства технологической оснасткой и нестандартным оборудованием, что приводит к увеличению затрат. Причем не всегда известно заранее, подойдут ли принятые технические решения по оснастке или нет, так как неизвестны все особенности производства нового изделия.

Поэтому на этапе освоения производства необходимо иметь более универсальное оборудование, которое могло бы выполнять данные функции и позволяло бы оценить правильность принятых решений при выборе технологической оснастки, а может и полностью заменить их в производстве. Кантователи на основе механизмов параллельной структуры с гибкими звеньями могут стать одним из типов таких универсальных приспособлений.

#### Библиографические ссылки

1. Гардымов Г. П., Парфенов Б. А., Пчелинцев А. В. Технология ракетостроения : учеб. пособие. СПб. : Специальная литература, 1997. 320 с.
2. Сайт [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ulalaunch.com> (дата обращения: 25.03.2018).

3. Климовский Д. А., Смирнов Н. А. Применение тросоуправляемых механизмов параллельной структуры в производстве ракетной техники // Решетневские чтения : материалы XX Междунар. науч. конф. (9–12 ноября 2016, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 35–36.

4. Gosselin C. Cable-driven parallel mechanisms: state of the art and perspectives // Mechanical Engineering Reviews. 2014. Vol. 1, No 1.

5. Albus J., Bostelman R., Dagalakis N. The NIST Robocrane // Journal of Robotic Systems. 1993. № 10(5). P. 709–724.

6. X Tang An Overview of the Development for Cable-Driven Parallel Manipulator // Advances in Mechanical Engineering Volume 2014.

#### References

1. Gardymov G. P., Parfenov B. A., Pchelincev A. V. [Technology of rocketry]: Uchebnoe posobie. SPb. : Special'naja Literatura, 1997. 320 s.
2. Available at: <http://www.ulalaunch.com> (accessed: 25.03.2018).
3. Klimovskiy D. A., Smirnov N. A. [Application of cable-driven parallel kinematic machine for production of rocket technics]. Materialy XX Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya" [Materials XX Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"] Krasnoyarsk, 2016. P. 35–36 (In Russ.)
4. Gosselin C. Cable-driven parallel mechanisms: state of the art and perspectives / Mechanical Engineering Reviews. 2014. Vol. 1, No. 1.
5. Albus J., Bostelman R., Dagalakis N. The NIST Robocrane / Journal of Robotic Systems 10(5). 1993. P. 709–724.
6. X Tang An Overview of the Development for Cable-Driven Parallel Manipulator / Advances in Mechanical Engineering. Vol. 2014.

© Климовский Д. А., Смирнов Н. А., 2018

УДК 533.6(075.8)

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ РЕФЛЕКТОРА АНТЕННЫ

В. С. Козлов

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

*Рассматриваются результаты исследований распределения давления по поверхности рефлектора параболической антенны при ее различном уловом положении.*

*Ключевые слова: параболическая антенна, поверхность рефлектора, угловое положение, распределение давления.*

## THE PRESSURE DISTRIBUTION ON THE SURFACE OF THE ANTENNA REFLECTOR

V. S. Kozlov

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

*The results of studies of the pressure distribution on the surface of the reflector of a parabolic antenna at its different catch position are considered.*

*Keywords: parabolic antenna, reflector surface, angular position, pressure distribution.*

Деформативность рефлектора антенны, имеющего значительный размер, главным образом определяется величиной силового воздействия на поверхность рефлектора ветровой нагрузки. Исследование характера распределения давления по поверхности рефлектора антенны при различном ее угловом положении относительно набегающего потока дает возможность оценить уровень этого воздействия и существенно повысить степень достоверности прочностных расчетов [1–5].

Исследования проводились в аэродинамической трубе замкнутого типа. Скорость потока в открытой рабочей части достигала 40 м/с. Объектом исследования являлась модель рефлектора параболической антенны (рис. 1).

Диаметр рефлектора, с учетом допустимой загрузки рабочей части трубы, составлял 100 мм. Поверхность рефлектора антенны была продренарована вдоль радиуса по одному лучу в семи точках на вогнутой стороне и в семи точках на выпуклой стороне. Для замера давления в намеченных точках поверхности осуществлялся поворот рефлектора вокруг оси, проходящей через геометрический центр чаши антенны, с шагом 22,5°. Измерения проводились при различных положениях модели антенны относительно набегающего потока, определяемых углами атаки  $\alpha$ , равными 15°, 30°, 45°, 60°, 85° и углами скольжения  $\beta$ , равными 0°, 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 180°.

Результаты исследований распределения давления по поверхности параболической антенны при различном угловом положении приведены на рис. 2–5.

Величина суммарного давления, т. е. давления, определяемого значениями на вогнутой и выпуклой

сторонах рефлектора в данной точке, представлена в виде безразмерного коэффициента давления (отношение суммарного давления  $p_{\Sigma}$  к скоростному напору набегающего потока  $\rho v^2/2$ ).

При натекании невозмущенного потока на рефлектор антенны возникает зона торможения с повышенными значениями давления в центральной части вогнутой стороны и зона отрыва с практически постоянной величиной давления, имеющего значение ниже атмосферного на выпуклой стороне рефлектора. Этим и объясняется значительная величина суммарного давления в центральной части рефлектора (рис. 2). От зоны торможения поток ускоренно движется вдоль поверхности рефлектора, при этом движение при малых углах  $\alpha$  и  $\beta$  происходит преимущественно в направлении верхней кромки. Это подтверждается уменьшением давления как от центра рефлектора к его периферии, так и от нижней части поверхности рефлектора к верхней.

С увеличением угла атаки  $\alpha$  симметричность обтекания еще более нарушается. Происходит смещение зоны торможения на фронтальной стороне к передней кромке поверхности и уменьшения отрывной зоны на тыльной стороне (рис. 3). При этом на выпуклой поверхности образуются две отрывные зоны: область между передней кромкой и зоной торможения и область, лежащая ближе к подветренной кромке антенны. Дальнейшее увеличение углов  $\alpha$  приводит к возникновению отрыва потока на вогнутой поверхности рефлектора и уменьшению отрывной зоны на выпуклой поверхности.

При возрастании углов скольжения  $\beta$  область максимального давления смещается от центра к кромке

удаляющейся части поверхности рефлектора (рис. 4, 5). Это является результатом уменьшения зоны отрыва на выпуклой поверхности рефлектора. При достижении углом  $\beta$  значения  $90^\circ$  на вогнутой поверхности возникает отрывное течение, причем срыв потока происходит не с кромки, а ниже по течению на рас-

стоянии, равном четверти радиуса рефлектора (рис. 5). Присоединяется поток примерно на таком же расстоянии от дальней по потоку кромки поверхности. Области присоединенного течения имеют форму полумесяцев, соприкасающихся друг с другом в крайних точках на луче  $0^\circ$ .

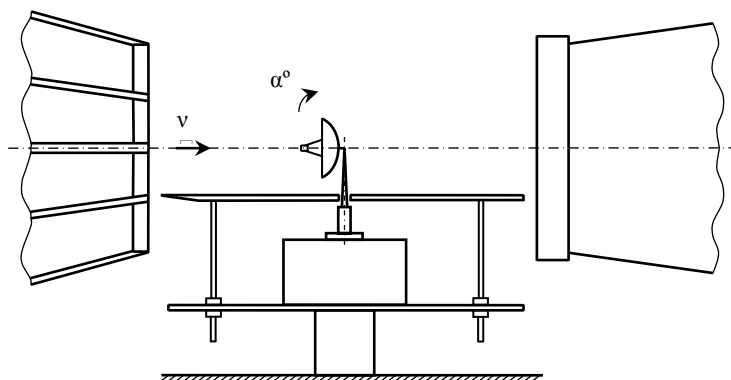


Рис. 1. Схема установки

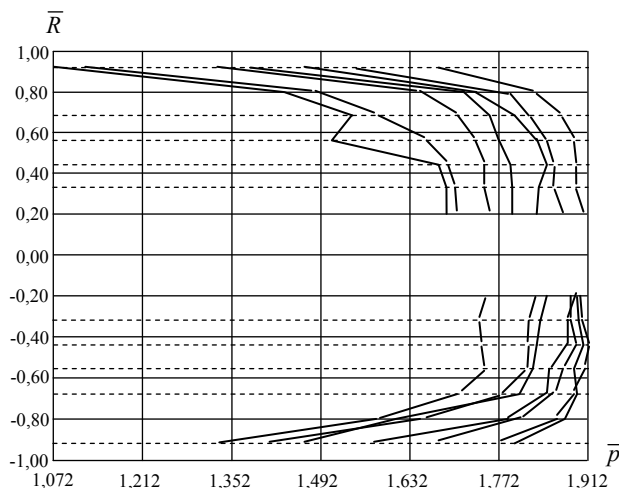


Рис. 2. Распределение давления по рефлектору антенны при угле  $\alpha = 15^\circ$

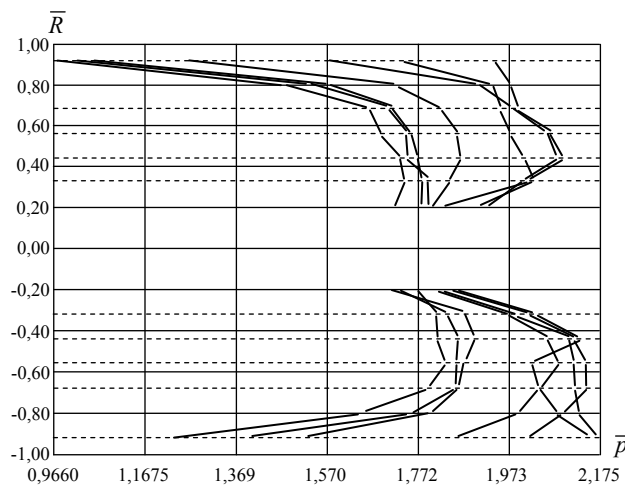


Рис. 3. Распределение давления по рефлектору антенны при угле  $\alpha = 45^\circ$

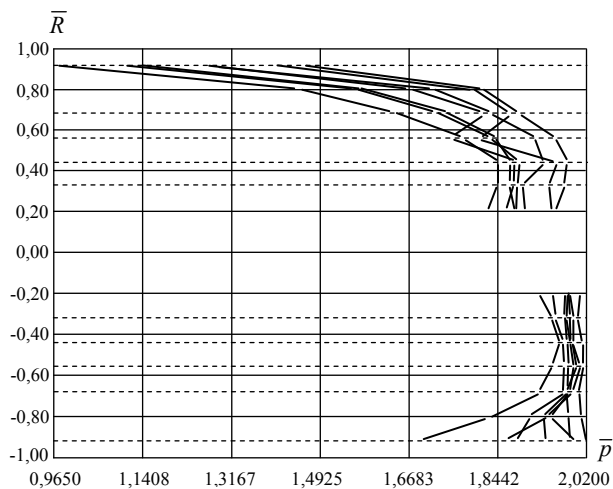


Рис. 4. Распределение давления по рефлектору антенны при угле  $\beta = 30^\circ$

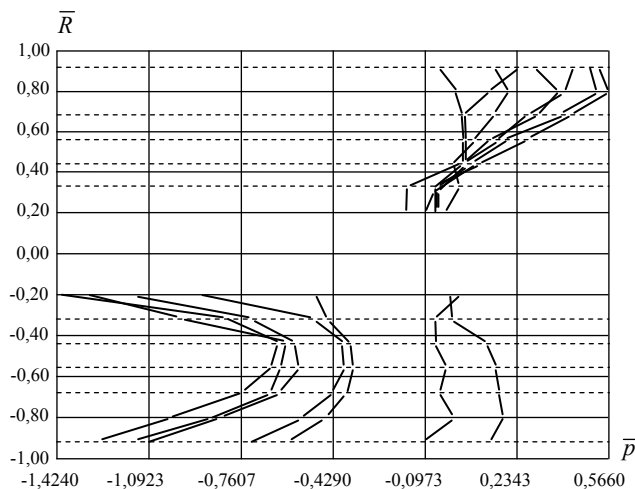


Рис. 5. Распределение давления по рефлектору антенны при угле  $\beta = 90^\circ$

На выпуклой поверхности зона отрыва располагается на подветренной стороне, в результате чего в этой области поверхности давление имеет отрицательное значение (рис. 5).

В результате исследования установлено, что в диапазоне углов  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $50^\circ$  и углов  $\beta$  от  $0^\circ$  до  $60^\circ$  формируется, предположительно, следующая картина обтекания:

1) существует область отрыва между зоной торможения навстречным участком кромки рефлектора;

2) приблизительная величина области максимального давления равна четверти радиуса рефлектора (за область максимального давления примем область, в которой давление отличается от максимального не более чем на 5 %);

3) величина суммарного давления является максимальной для малых значений углов  $\alpha$  и  $\beta$ ;

4) увеличение углов атаки  $\alpha$  сопровождается снижением степени силового воздействия потока на поверхность рефлектора;

5) увеличение углов скольжения  $\beta$  приводит к изменению направления действия нагрузки на противоположное.

#### Библиографические ссылки

1. Савицкий Г. А. Расчет антенных сооружений. М. : Связь, 2008. 210 с.

2. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. М. : Изд-во СКАД СОФТ, 2011. 710 с

3. Турбин С. В., Некрасов Ю. П. Принципы определения нагрузок и воздействий на антенно-мачтовые сооружения // Многогранные гнутые стойки : материалы конф. / ОАО «ПРОМик», ООО «Связьтехсервис». Д. : Печатный салон «Мультипринт», 2006. С. 73–96.

4. Горшков А. Г. Аэрогидроупругость конструкций. М. : Физико-математическая литература, 2000. 592 с.

5. Краснов И. Ф., Кошевой В. А., Калугин В. Т. Аэродинамика отрывных течений. М. : Высшая школа, 1988. 351 с.

#### References

1. Savitsky G. A. Calculation of antenna structures. M. : Svyaz, 2008. 210 s.

2. Perelmutter V. A., Slivker V. I. Calculation models of structures and the possibility of their analysis. M.: publishing house of the SCADA SOFTWARE, 2011. 710 s.

3. Turbines S. V., Nekrasov Yu. p. guidelines for determining loads and impacts on the antenna-mast structures // Materials of the conference “The many-sided bent racks” / JSC “Promik”, JSC “CTS”. D: print shop “Multi-print”, 2006. С. 73–96.

4. Gorshkov A. G. Aerohydroelasticity of structures. M. : Physical and mathematical literature, 2000. 592 s.

5. Krasnov, I. F., Koshevoy, V. A., Kalugin, V. T. Aerodynamics of separated currents. M. : Higher school, 1988. 351 s.

© Козлов В. С., 2018

УДК 629.783:621.396.946

## БАЛЛИСТИЧЕСКОЕ ПОСТРОЕНИЕ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ «ГОНЕЦ-М» ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ МЕЖСПУТНИКОВОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ ВНУТРИ ОРБИТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

И. К. Коловский\*, В. Н. Подолякин, Д. Н. Шмаков

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
\*E-mail: kolovigor@mail.ru

*Рассматривается баллистическое построение орбитальной группировки (ОГ) типа «Гонец-М» для реализации межспутниковой линии связи (МЛС) внутри орбитальной плоскости. Определено оптимальное количество космических аппаратов (КА) и положение КА в плоскости для возможности работы МЛС. Полученные результаты построения орбитальной группировки могут быть актуальны для создания новой системы «Гонец-М1».*

*Ключевые слова: баллистика, низкая круговая орбита, космический аппарат, орбитальная группировка «Гонец-М», межспутниковая линия связи.*

## BALLISTIC BUILDING OF THE “GONETS-M” ORBITAL CONSTELLATION FOR ENSURING THE INTER-SATELLITE LINK INSIDE ORBITAL PLANE

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

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
\*E-mail: kolovigor@mail.ru

*This article describes the ballistic building of the “Gonets-M” orbital constellation (OC) for ensuring the inter-satellite link (ISL) inside orbital plane. The optimal numbers of satellite and the position satellite inside orbital plane have been defined to implement the ISL. The results can be used to create a new satellite system “Gonets-M1”.*

*Keywords: ballistics, low circular orbit, spacecraft, orbital constellation “Gonets-M”, inter-satellite link.*

Основным назначением системы «Гонец-М» является предоставление услуг персональной связи и передачи данных подвижным и стационарным абонентам, расположенным в любой точке земного шара [1].

Потребительские характеристики связной системы «Гонец-М», а именно время доставки сообщений является одним из важных параметров системы. С целью развития системы «Гонец-М» и сокращения времени доставки сообщений предлагается использование МЛС внутри орбитальной плоскости.

Использование МЛС в низкоорбитальных группировках позволяет постепенно наращивать пропускную способность, резко снизить затраты на развертывание поддерживающей наземной инфраструктуры и повысить оперативность доставки информации [2].

С точки зрения баллистического построения реализация МЛС внутри орбитальной плоскости зависит от количества КА в плоскости. Для передачи данных через МЛС необходимо, чтобы КА 1 всегда был в зоне видимости КА 2, КА 2 был в зоне видимости КА 3 и так далее. Поэтому важно определить оптимальное количество КА в орбитальной плоскости для работы МЛС. И, исходя из количества КА в плоскости, вычислить минимальную допустимую высоту орбиты ( $h_{min}$ ), при которой Земля не будет заслонять собой соседние КА, и МЛС будет работать корректно.

В настоящее время система «Гонец-М» с высотой орбиты 1 500 км представляет собой орбитальную группировку из четырех орбитальных плоскостей, в каждой из которых движутся по 3 КА (всего 12 КА) [3]. При таком составе системы «Гонец-М» невозможно использовать МЛС.

Теперь выберем оптимальное баллистическое построение системы «Гонец-М» для реализации МЛС, а также выясним, каким образом необходимо размещать КА в плоскости. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, для орбиты с высотой 1500 км, чтобы использовать МЛС, достаточно запустить в плоскость 5 КА. Важно отметить, что для корректной работы МЛС внутри плоскости у всех КА необходимо проводить коррекцию орбиты для удержания орбитального положения, иначе дальность между КА может измениться настолько, что МЛС станет работать со сбоями.

Поэтому определим размер зоны удержания КА «Гонец-М» (табл. 2).

Результаты табл. 2 показывают, что при выборе количества КА для МЛС на высоте 1 500 км равным 5, необходимо удерживать КА на орбите с точностью  $0^\circ$  по аргументу широты, что является технически сложной задачей.

Таблица 1

Построение системы «Гонец-М» для МЛС

Кол-во КА в плоскости	Размещение КА в плоскости, °	$h_{\min}$ , км
5	72	1505
6	60,0	986
7	51,4	700

Таблица 2

Зона удержания на орбите КА «Гонец-М» для работы МЛС

Высота орбиты 1 500 км	Количество КА в плоскости	Размещение КА в плоскости, °	Зона удержания, °
	5	72	±0
	6	60	±5
	7	51,4	±9,3

Поэтому предлагается использовать построение с шестью КА в плоскости. В таком случае дальность между двумя ближайшими КА при МЛС будет зависеть от точности удержания КА в точках стояния.

Изменение дальности между двумя КА, при наличии 6 КА в плоскости на высоте 1 500 км и точностью удержания ±5° по аргументу широты КА, будет следующим:

- номинальная дальность: 7 878 км (центральный угол 60° между КА);
- максимальная дальность: 9 037 км (центральный угол 70° между КА);
- минимальная дальность: 6 658 км (центральный угол 50° между КА).

При организации МЛС на высоте 1 500 км оптимальная взаимная видимость КА в орбитальной плоскости обеспечивается тогда, когда количество КА больше либо равно шести. Поэтому штатный состав системы «Гонец-М», в которой по 3 КА в плоскости, необходимо увеличивать до 6 КА в плоскости, чтобы получилась новая система, состоящая из 4-х плоскостей по 6 КА в каждой (всего 24 КА), что и планируется при модернизации системы «Гонец-М» [4]. Полученные результаты можно использовать при построении космических аппаратов нового поколения «Гонец-М1».

**Библиографические ссылки**

1. Кузовников А. В., Тестоедов Н. А., Агуреев В. А. Проблемы развития низкоорбитальной многофункциональной системы персональной спутниковой связи «Гонец-Д1М» // Вестник СибГАУ. 2013. № 6. С. 158–163.
2. Камнев В. Е., Черкасов В. В., Чечин Г. В. Спутниковые сети связи : учеб. пособие. М. : Альпина Паблишер, 2004. 536 с.
3. Жаров А. Н. Многофункциональная система персональной спутниковой связи «Гонец-Д1М»: со-

стояние и перспективы развития // Спутниковая связь и вещание. Специальный выпуск. М., 2014. С. 72–78.

4. Модернизация орбитальной группировки малых космических аппаратов многофункциональной системы персональной спутниковой связи «Гонец-Д1М» / М. В. Валов, В. В. Головков, И. С. Тарлецкий и др. // Решетневские чтения : материалы XX Международ. науч. конф. (09–12 ноября 2016, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2016. Ч. 1. С. 618–619.

**References**

1. Kuzovnikov A. V., Testoedov N. A., Agureev V. A. Problems of development of low-orbit multifunctional personal satellite communication system «Gonets-D1M». Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii [Siberian journal of science and technology]. 2013. No. 6. P. 158–163 (in Russ.)
2. Kamnev V. E., Cherkasov V. V., Chechin G. V. Sputnikovye sistemy svyazi [Satellite communications systems]. Moscow : Person publisher, 2004, 536 p.
3. Zharov A. N. *Mnogofunktsional'naya sistema personal'noy sputnikovoy svyazi "Gonets-D1M": sostoyanie i perspektivy razvitiya* [Multifunctional system for personal satellite communication Gonets-D1M: current state and prospects]. Moscow : Spetsial'nyy vypusk "Sputnikovaya svyaz' i veshchanie" Publ., 2014. P. 72–78.
4. Valov M. V., Golovkov V. V., Tarleckiy I. S., Esipenko A. A., Zimin I. I. [Modernizing small satellite constellation of multifunctional personal communication system "Gonets-D1M" // Reshetnevskie chteniya : materialy XX Mezhdunar. nauch. konf. [Materials XX Intern. Scientific. Conf. "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2016. Vol. 1. P. 618–619.

© Коловский И. К., Подолякин В. Н., Шмаков Д. Н., 2018



УДК 629.7.086:629.783:525:621.396.946

## ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ NORAD ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ «ГОНЕЦ-М» НА НИЗКОЙ КРУГОВОЙ ОРБИТЕ

И. К. Коловский\*, В. Н. Подолякин, Д. Н. Шмаков

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
\*E-mail: kolovigor@mail.ru

*Говорится о возможности применения баллистических данных NORAD в формате TLE для космических аппаратов на низкой круговой орбите. Приводится анализ использования данных NORAD для оценки коррекции орбитального положения космических аппаратов «Гонец-М».*

*Ключевые слова: баллистика, низкая круговая орбита, космический аппарат, TLE, NORAD, обработка данных.*

## ASSESSMENT OF THE USE OF THE BALLISTIC DATABASES NORAD FOR SATELLITE “GONETS-M” INTO A LOW CIRCULAR ORBIT

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

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
\*E-mail: kolovigor@mail.ru

*This article states, possibility of applying ballistic databases NORAD in the TLE format for low circular orbit satellites. Also provided an analysis of the use of the ballistic data NORAD to determine correction the orbital parameters of the satellite “Gonets-M”.*

*Keywords: ballistics, low circular orbit, spacecraft, TLE, NORAD, information processing.*

Для решения задачи расчета положения спутников в определенный момент времени в последние годы все чаще используют баллистические данные, формируемые службой NORAD (США) и представляемые в формате TLE (Two-Line Element Set Format) для большинства космических аппаратов. Популярность этого подхода определяется доступностью по сети Интернет этих данных [1].

В первом приближении для оценки параметров орбиты КА на низкой круговой орбите можно использовать данные в формате TLE без дополнительной обработки.

Данные в формате TLE содержат следующие основные шесть параметров движения КА:  $\eta$  – средняя аномалия;  $\omega$  – аргумент перигея;  $i$  – наклонение плоскости орбиты;  $e$  – эксцентриситет;  $\Omega$  – долгота восходящего узла;  $n$  – среднее движение. Эти шесть параметров движения КА в определенный момент времени полностью определяют положение КА в пространстве [2].

Из данных NORAD рассмотрим параметр  $n$  – среднее движение. Этот параметр  $n$  можно использовать для вычисления периода обращения КА [3]. В процессе штатной эксплуатации КА «Гонец-М» основной целью проведения коррекции элементов орбиты КА является изменение периода обращения КА «Гонец-М».

Поэтому после проведения коррекции орбиты КА, пока измерения текущих навигационных параметров (ИТНП) еще не получены, по значению  $n$  из NORAD можно оценить результаты коррекции орбиты КА «Гонец-М». Следует отметить, что новые данные NORAD после проведения коррекции орбиты КА появляются уже в течение суток после окончания коррекции, что позволяет провести оперативную оценку результатов коррекции орбиты.

Известно, что от времени оборота КА вокруг Земли зависит число витков в сутки. Поэтому возьмем параметр орбиты  $n$ , который приводится в двухстрочных элементах TLE, и получим  $T_{\text{оск}}$  – оскулирующий период обращения КА «Гонец-М», используя выражение

$$T_{\text{оск}} = 86\,400 \text{ с}/n.$$

В качестве исследования возьмем данные NORAD [4] и ИТНП ( $T_{\text{др}}$  – драконический период обращения, полученный по измерениям) спутниковой системы «Гонец-М» КА № 40553, 40552, 40554 на низкой круговой орбите с высотой 1500 км (см. таблицу).

В таблице показано, что полученные значения изменения оскулирующего периода обращения по данным NORAD до и после коррекции орбиты КА «Гонец-М» хорошо согласуются с изменением периода обращения по результатам ИТНП. Поэтому по данным NORAD можно делать выводы о том, как была реализована коррекция орбиты КА «Гонец-М».

Сравнение  $T_{др}$  и  $T_{оск}$  КА «Гонец-М»

КА № 40553			
Дата измерений	ИТНП	NORAD	
	$T_{др}$	$n$	$T_{оск}$
До коррекции орбиты 01.08.2017	6 954,898 с	12,428 964	6 951,484 с
После коррекции орбиты 07.08.2017	6 955,055 с	12,428 725	6 951,638 с
$\Delta$	0,157 с	0,154 с	
КА № 40552			
Дата измерений	ИТНП	NORAD	
	$T_{др}$	$n$	$T_{оск}$
До коррекции орбиты 12.06.2017	6 954,860 с	12,429 011	6 951,478 с
После коррекции орбиты 18.06.2017	6 955,058 с	12,428 666	6 951,671 с
$\Delta$	0,198 с	0,193 с	
КА № 40554			
Дата измерений	ИТНП	NORAD	
	$T_{др}$	$n$	$T_{оск}$
До коррекции орбиты 21.01.2018	6 954,925 с	12,428 945	6 951,515 с
После коррекции орбиты 28.01.2018	6 955,053 с	12,428 737	6 951,632 с
$\Delta$	0,128 с	0,117 с	

Таким образом, баллистические данные службы NORAD в формате TLE можно использовать, в частности, для оценки проведения коррекции низкой круговой орбиты КА «Гонец-М». А для более точного вычисления положения КА на орбите по данным NORAD следует разрабатывать специальную методику и программу, которая позволит корректно обрабатывать и использовать данные NORAD в формате TLE для моделирования движения КА.

**Библиографические ссылки**

1. Романов А. А., Романов А. А., Трусов С. В., Урличич Ю. М. Спутниковая радиотомография ионосферы. М. : Физматлит, 2013. 296 с.
2. Барабошкин О. И., Трусов С. В., Романов А. А. Определение баллистических параметров в формате TLE в системе радиотомографии ионосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 3. С. 151–155.
3. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.
4. Электронная база данных командования воздушно-космической обороны Северной Америки

(NORAD) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.space-track.org> (дата обращения: 23.07.2018).

**References**

1. Romanov A. A., Romanov A. A., Trusov S. V., Urlichich Yu. M. Sputnikovaya radiotomografiya ionosfery [Satellite ionosphere radiotomography]. Moscow : Fizmatlit Publ., 2013. 296 p.
2. Baraboshkin O. I., Trusov S. V., Romanov A. A. Determination of TLE format ballistic parameters in the system of ionosphere tomography. Sovr. Probl. DZZ Kosm. [Current problems in remote sensing of the Earth from space]. 2012. Vol. 9, No. 3. P. 151–155 (in Russ.)
3. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya : ucheb. posobie [Fundamentals of the satellite information development: training manual]. Krasnoyarsk : SibSAU Publ. 2011. 488 p (in Russ.).
4. The electronic database of North American Aerospace Defense Command (NORAD). Available at: <https://www.space-track.org> (accessed: 19.06.2017).

© Коловский И. К., Подолякин В. Н., Шмаков Д. Н., 2018

УДК 621.316.722

## ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПО БАЛАНСУ НЕОБХОДИМОЙ И НАКОПЛЕННОЙ В СИСТЕМЕ ЭНЕРГИИ

И. С. Костарев, А. Ф. Лекарев

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

*Рассматривается преобразователь напряжения с широтно-импульсной модуляцией и управляющим воздействием по балансу необходимой и накопленной в LC-фильтре энергии, используемый в комплексах автоматики и стабилизации пилотируемых космических аппаратов. Показана эффективность формирования адаптивного пилообразного сигнала.*

*Ключевые слова: энергетический баланс, широтно-импульсная модуляция, стабильность, преобразователь напряжения.*

## OPTIMIZATION OF CONTROL ON THE BALANCE OF THE NECESSARY AND ACCUMULATED IN THE SYSTEM OF ENERGY

I. S. Kostarev, A. F. Lekarev

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

*We consider a voltage converter with pulse-width modulation and control action on the balance of the necessary and accumulated in the LC-filter energy, used in the automation and stabilization complexes of manned spacecraft. The efficiency of formation of an adaptive sawtooth signal is shown.*

*Keywords: energy balance, pulse-width modulation, stability, voltage converter.*

Выполнение высоких требований к тактико-техническим характеристикам космических аппаратов связано с необходимостью совершенствования систем управления, входящих в состав систем электропитания. Одним из перспективных направлений при проектировании систем управления с максимальным быстродействием или минимальным временем переходного процесса комплексов автоматики и стабилизации напряжения пилотируемых аппаратов является формирование управляющего воздействия по балансу необходимой и накопленной в системе энергии.

Так, переключение ключевого элемента импульсного преобразователя напряжения осуществляется по смене знака баланса между текущим значением внутренней энергии, запасенной непрерывной частью преобразователя (LC-фильтром), и значением энергии LC-фильтра при заданном выходном напряжении [1]. Благодаря этому возможно создание высокоточных стабильных систем с максимальным быстродействием и низкой чувствительностью к изменению внутренних и внешних параметров. Вместе с тем такое переключение происходит в широком диапазоне частот коммутации (пропорциональном квадратам тока нагрузки и напряжения), что является основным препятствием его применения.

Решить проблему стабилизации частоты коммутации ключевого элемента можно управлением по энергетическому балансу в системе с широтно-импульс-

ной модуляцией [2], однако при этом появляется незначительная статическая ошибка выходного напряжения, зависящая от значения напряжения питания,

Эффективный способ снижения чувствительности к изменению напряжения питания – смещение пилообразного сигнала пропорционально произведению амплитуды пилообразного сигнала и отношения заданного выходного напряжения к напряжению питания [3; 4] в соответствии с выражением

$$Y_p = A_p \left( \frac{t}{T_n} - \frac{U_n}{U_n} \right), \quad (1)$$

где  $A_p$  – амплитуда пилообразного сигнала;  $t$  – время работы;  $T_n$  – длительность периода модуляции;  $U_n$  – выходное напряжение;  $U_n$  – напряжение питания.

Реализация этого решения показана на структурной схеме преобразователя напряжения (рис. 1) с законом управления

$$\begin{aligned} F_y &= F_3 + Y_p; \\ F_3 &= U_n^2(t) - U_{on}^2 + \frac{L}{C} (i_L(t) - i_n(t))^2 \operatorname{sgn}(i_L(t) - i_n(t)); \\ Y_p &= A_p \left( \frac{t}{T_n} - \frac{U_n}{U_n} \right); \end{aligned} \quad (2)$$

$F_k = \begin{cases} 1 & \text{при } t_c < t < t_k; \\ 0 & \text{при } t_k < t < t_c + T_n, \end{cases}$   
где  $t_k$  при  $F_y = 0$ ,  $F_y' > 0$ .

Здесь  $F_y$  – управляющий сигнал;  $F_3$  – сигнал, пропорциональный текущему значению энергетического баланса системы;  $L$ ,  $C$  – индуктивность дросселя и емкость конденсатора LC-фильтра;  $U_n(t)$  – выходное напряжение;  $U_{оп}$  – заданное выходное напряжение;  $i_L(t)$  – ток дросселя;  $i_n(t)$  – ток нагрузки;  $\text{sgn}(i_L(t) - i_n(t))$  – знак тока конденсатора (определяет знак пульсирующей составляющей энергии дросселя);  $Y_p$  – пилообразный сигнал;  $A_p \geq \frac{U_n^2 T_n^2}{CL}$  – амплитуда пилообразного сигнала;  $F_k$  – сигнал, управляющий состоянием ключевого элемента;  $t_c$  – момент синхронизации;  $t_k$  – момент выключения ключевого элемента, определяемый наименьшим положитель-

ным корнем уравнения  $F_y = 0$  на периоде модуляции.

Результаты исследования работы преобразователей по схеме [2] и предложенной схеме рис. 1 при воздействии синусоидальной помехи частотой 200 Гц и амплитудой 20 В в цепи питания напряжением 60 В и синусоидальной помехи частотой 200 Гц и амплитудой 10 А при токе нагрузки 15 А представлены на рис. 2.

В преобразователе по рис. 1 указанные помехи вызывают незначительные колебания выходного напряжения 5–10 мВ (соизмеримы с амплитудой пульсации на периоде коммутации) при частоте широтно-импульсной модуляции 50 кГц и параметрах сглаживающего фильтра  $C = 1\,000$  мкФ,  $L = 100$  мкГн.

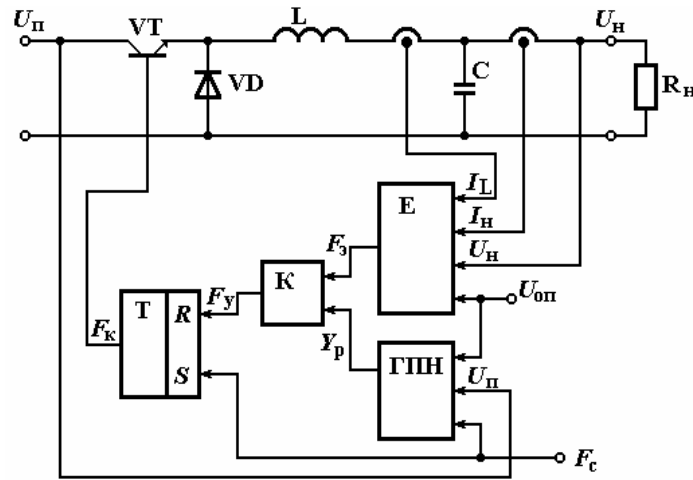


Рис. 1. Схема преобразователя напряжения:

ГПН – генератор пилообразного сигнала  $Y_p$  формируемого в соответствии с выражением (1); E – формирователь сигнала энергетического баланса  $F_3$ ; K – формирователь управляющего сигнала  $F_y$ ;  $F_c$  – синхронизирующий сигнал; T – триггер, формирующий переключающий сигнал  $F_k$ .

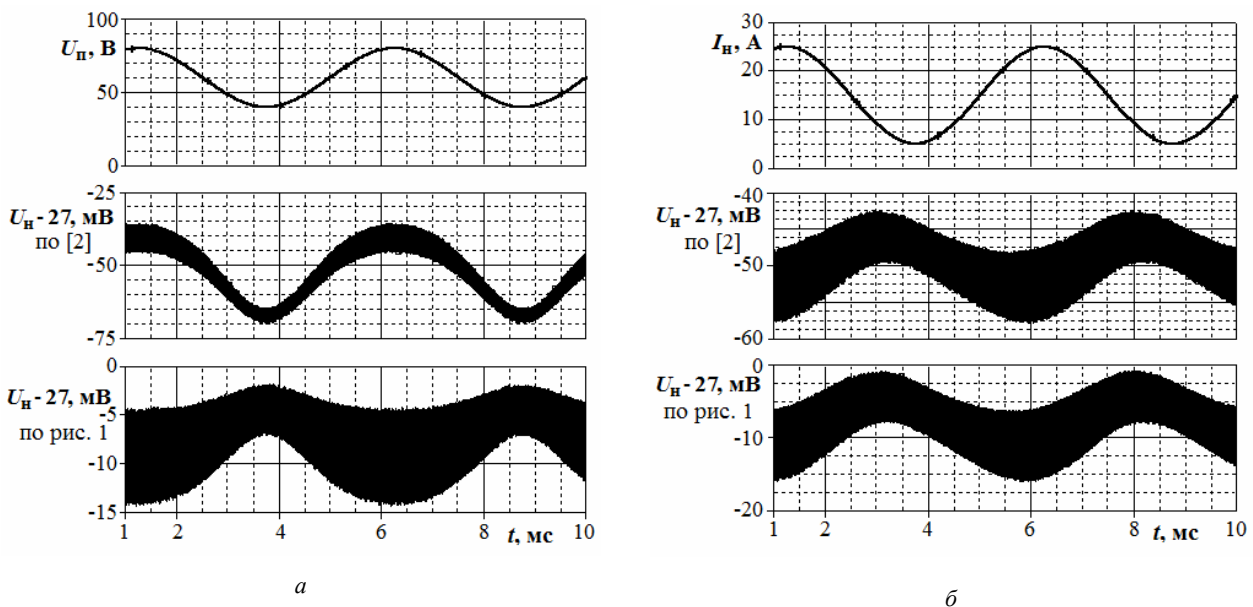


Рис. 2. Влияние помех: а – по цепи питания; б – по цепи нагрузки

Соответственно в преобразователе [2] с управлением без смещения пилообразного сигнала колебания выходного напряжения достигают 25–35 мВ (см. рис. 2).

Таким образом, для оптимизации управления по балансу необходимой и накопленной энергии комплексов автоматики и стабилизации предлагается:

– для уменьшения статической ошибки от изменения значения напряжения питания или выходного напряжения формировать пилообразный сигнал со смещением, пропорциональным произведению амплитуды пилообразного сигнала на отношение заданного выходного напряжения к напряжению питания;

– использовать управление с широтно-импульсной модуляцией на основе баланса между текущим значением внутренней (запасенной системой) энергии и ее значением в заданном режиме, что позволит создавать высокоточные стабильные системы с высоким быстродействием и низкой чувствительностью к изменению внутренних и внешних параметров.

#### Библиографические ссылки

1. Казанцев Ю. М., Лекарев А. Ф. Формирование управления по балансу необходимой и накопленной в системе энергии // Приборы и системы. Сер. Управление, контроль, диагностика. 2009. № 5. С. 17–20.

2. Казанцев Ю. М., Лекарев А. Ф. Управление в системах с широтно-импульсной модуляцией по балансу накопленной и необходимой энергии // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 315, № 4. С. 125–130.

3. Пат. № 2497266 Российская Федерация : МПК<sup>Н</sup> H 02 M 3/335. Способ управления импульсным преобразователем напряжения и устройство для его

реализации / Казанцев Ю. М., Лекарев А. Ф., Гаврилов А. М., Столяров А. Н. № 2012102541/07 ; заявл. 25.01.2012 ; опубл. 27.10.2013, Бюл. № 30. 10 с.

4. Пат. № 2630962 Российская Федерация : МПК<sup>Г</sup> 05 F 1/56, G05B 13/02. Способ управления преобразователем напряжения / Гаврилов А. М., Лекарев А. Ф., Нагорный В. О. № 2016131046 ; заявл. 27.07.2016 ; опубл. 15.09.2017, Бюл. № 26. 7 с.

#### References

1. Kazantsev Y., Lekarev A. *Formirovaniye upravleniya pobalansuneobhodimoyinakoplennoyenergii* [Forming control over the balance of the necessary and accumulated energy in the system] *Instruments and systems. Ser. Management, control, diagnostics*. 2009, No. 5, P. 17–20 (In Russ.)

2. Kazantsev Y., Lekarev A. *Upravlenie v sistemah s shirotno-impulsnoy modulatsiey po balansu nakoplennoy neobhodimoy energii* [Control in systems with pulse-width modulation on the balance of accumulated and necessary energy] *Izvestiya Tomsk Polytechnic University*. 2009. No. 4. P. 125–130 (In Russ.).

3. Kazantsev Y. M., Lekarev A. F., Gavrilov A. M., Stolyarov A. N. *Sposob upravleniya preobrazovatelem napryagieniai ustroystvo dlia ego realizacii* [A way to control a voltage converter and a device for its implementation]. Patent RF, No. 2497266, 2013.

4. Gavrilov A. M., Lekarev A. F., Nagorniy V. O. *Sposob upravleniya preobrazovatelem napryagieniya* [A method for controlling a voltage converter]. Patent RF, No. 2630962, 2017.

© Костарев И. С., Лекарев А. Ф., 2018

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ МОНИТОРИНГА СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С ПОМОЩЬЮ МИКРОСПУТНИКА

Е. В. Красилова, С. А. Пикулин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: Krasilova97@mail.ru

*Рассмотрена проблема изучения космической погоды и дано описание микроспутника для мониторинга солнечного ветра. Перечислены основные требования к аппарату и рассмотрена возможность его запуска.*

*Ключевые слова: микроспутник, космическая погода, солнечный ветер.*

## ANALYSIS OF THE MONITORING OF THE SOLAR WIND USING MICROSATELLITE

E. V. Krasilova, S. A. Pikulin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: Krasilova97@mail.ru

*The article describes the problem of studying space weather and describes a microsatellite for monitoring of the solar wind. The main requirements for the spacecraft are listed and the possibility of its launch is considered.*

*Keywords: microsatellite, space weather, solar wind.*

Космическая погода представляет собой совокупность явлений, вызванных активными процессами, происходящими на Солнце, влияющих на магнитосферу, ионосферу и атмосферу Земли. Излучение спокойного Солнца состоит из электромагнитного излучения всех спектров и слабого потока корпускул – солнечного ветра. Интенсивность этих явлений меняется с возникновением активных процессов, природа которых до конца не изучена. Однако они приводят к сбоям в работе КА, радиосвязи, электросети [1]. Это ведет к значительным затратам и выходу из строя сложных и важных систем.

Солнечный ветер представляет собой поток плазмы, непрерывно истекающей из солнечной короны [2]. В зависимости от скорости он достигает Земли за 1–3 суток. Прогноз магнитных бурь, вызванных интенсивным солнечным ветром, является важной задачей, так как они вызывают различные сбои не только в космосе, но и на Земле. Ввиду неизученности процессов, происходящих на Солнце, точные долгосрочные прогнозы космической погоды невозможны. Большинство современных прогнозов осуществляется КА лишь на несколько часов вперед.

В России проблема отслеживания космической погоды особенно актуальна, так как в рамках данной программы работает недостаточное количество аппаратов. Основная часть данных, а это 90 %, поступает из-за рубежа [1]. Для развития науки в области гелиогеофизики России необходимы собственные аппараты для сбора данных о космической погоде. Создание больших космических аппаратов требует много средств, времени, тщательного контроля и проверок.

Поэтому в настоящее время единственным возможным решением может быть создание малых КА. Малые аппараты непрерывно развиваются, изменяется подход к их созданию и проектированию. Стоимость их значительно ниже за счет меньших размеров, меньшей массы и относительной простоты устройства ввиду ограниченного числа решаемых задач. Достоинствами данных КА является то, что вывод их на орбиту осуществляется в качестве попутной нагрузки вместе с крупными аппаратами. В условиях занятости крупных предприятий государственными проектами больших масштабов трудно найти финансирование для таких маловостребованных в настоящее время проектов, как изучение солнечного ветра. Однако данную проблему можно решить с помощью привлечения к разработке подобных аппаратов вузов, что не только даст толчок развитию рассматриваемого направления изучения, но и повысит уровень подготовки студентов.

Для осуществления проекта по запуску микроспутника необходимо решить ряд проблем:

1. Малый КА необходимо разместить в точке либрации L1 для наибольшей достоверности измеряемых данных [3]. Вывод микроспутника на заданную орбиту требует оснащения его двигательной установкой и большим запасом топлива для разгона и торможения в заданной области. Также, значительный запас топлива необходим для сохранения положения микроспутником в точке Лагранжа, так как она не является устойчивой и требует корректировки орбиты [4]. Гравитационный маневр позволит значительно сэкономить топливо для выведения. Например, если осуще-

ствить запуск в качестве попутной нагрузки вместе с лунной миссией в 2020–2022 годах, то можно использовать гравитационный маневр вокруг Луны. Однако для этого необходимо свободное место на РН, которого может не оказаться. Также подобные микро-спутники ввиду меньшего финансирования проработаны менее тщательно и имеют больший риск не отделаться, либо выйти на нерасчетную орбиту.

2. В условиях постоянного нахождения под воздействием солнечного излучения, для микро-спутника необходимо продумать надежную систему терморегулирования, защищающую аппаратуру, для корректного сбора информации.

3. Существуют технические проблемы, связанные с отсутствием нужного оборудования и приборов на отечественном рынке, низкой степенью надежности [5]. В России область мониторинга космической погоды не является развитой, о чем говорит недостаток космических аппаратов.

4. Малый КА должен обеспечивать постоянные прием и передачу данных, что может быть затруднено из-за солнечного ветра, так как он вызывает помехи. Следовательно, требуются особые технические решения для системы связи с Землей.

5. Для получения комплексных данных необходимы различные средства измерения в условиях ограниченности размеров и массы, что нужно учесть при проектировании микро-спутника и размещении аппаратуры на нем.

Несмотря на все проблемы, запуск микро-спутника для мониторинга солнечного ветра будет экономически выгоднее, чем разработка и запуск большого КА. Ряд особенностей и проблем такого проекта связаны с отечественными разработками в данной области и в области малых КА в целом.

#### Библиографические ссылки

1. Петрукович А. А., Ермолаев Ю. И., Эйсмонт Н. А. Мониторинг солнечного ветра с целью оперативного прогноза гелиогеофизической обстановки // Практические аспекты гелиогеофизики : материалы специальной секции «Практические аспекты науки космической погоды» XI ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе» (15–19 февраля 2016, г. Москва) / под общ. ред. А. М. Мерзлого ; Ин-т космических исследований РАН. М., 2016. С. 11–21.

2. Плазменная гелиогеофизика : коллективная монография / Л. М. Зеленый, И. С. Веселовский,

Т. К. Бреус и др. В 2 т. Т. 1. М. : Физматлит, 2008. С. 272.

3. Крамлих А. В. Модульное проектирование микро/наноспутников [Электронный ресурс]. URL: [https://ssau.ru/files/education/uch\\_posob/Модульное%20проектирование.Электронный%20конспект-Крамлих%20АВ.pdf](https://ssau.ru/files/education/uch_posob/Модульное%20проектирование.Электронный%20конспект-Крамлих%20АВ.pdf) (дата обращения: 10.08.2018).

4. Петрукович А. А., Никифоров О. В. Малые спутники для космических исследований // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2016. Т. 3, вып. 4. С. 22–31.

5. Гершензон В. Малые спутники – провокация или перспективное направление. 2012 [Электронный ресурс]. URL: [http://sk.ru/news/b/press/archive/2012/01/12/malye-sputniki-\\_1420\\_-provokaciya-ili-perspektivnoe-napravlenie.aspx](http://sk.ru/news/b/press/archive/2012/01/12/malye-sputniki-_1420_-provokaciya-ili-perspektivnoe-napravlenie.aspx) (дата обращения: 10.08.2018).

#### References

1. Petrukovich A. A., Ermolaev Yu. I., Ehsmont N. A. [Monitoring of solar wind for the purpose of operative forecast of heliogeophysical situation]. *Materialy special'noj sekcii "Prakticheskie aspekty nauki kosmicheskoy pogody" XI ezhegodnoj konferencii "Fizika plazmy v solnechnoj sisteme"* [Materials of the special section "Practical aspects of space weather science" of the XI conference "plasma Physics in the solar system"]. Moscow, 2016, P. 11–21.

2. Zelenyj L. M., Veselovskij I. S., Breus T. K. *Plazmennaya geliogeofizika* [Plasma heliogeophysical], vol I. Moscow, Fizmatlit publ., 2008, 272 p.

3. Kramlich A. V. *Modul'noe proektirovanie mikro/nanosputnikov* [Modular design of micro/nano-satellites]. Available at: [https://ssau.ru/files/education/uch\\_posob/Модульное%20проектирование.Электронный%20конспект-Крамлих%20АВ.pdf](https://ssau.ru/files/education/uch_posob/Модульное%20проектирование.Электронный%20конспект-Крамлих%20АВ.pdf) (accessed: 10.08.2018). (In Russ.)

4. Petrukovich A. A., Nikiforov O. V. [Small satellites for space research] *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informacionnye sistemy*. 2016. Vol 3, No 4. P. 22–31 (In Russ.)

5. Gershenzon V. *Malye sputniki – provokaciya ili perspektivnoe napravlenie* [Small satellites-a provocation or a promising direction]. Available at: [http://sk.ru/news/b/press/archive/2012/01/12/malye-sputniki-\\_1420\\_-provokaciya-ili-perspektivnoe-napravlenie.aspx](http://sk.ru/news/b/press/archive/2012/01/12/malye-sputniki-_1420_-provokaciya-ili-perspektivnoe-napravlenie.aspx) (accessed: 10.08.2018). (In Russ.)

© Красилова Е. В., Пикулин С. А., 2018

УДК 669.2/.8:629.7

## ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Г. Г. Крушенко<sup>1,2\*</sup>, М. В. Елфимова<sup>3</sup>, С. Н. Решетникова<sup>2</sup>, А. Д. Кузнецов<sup>2</sup>, И. В. Кукушкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Красноярский научный центр СО РАН

Институт вычислительного моделирования СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. 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>Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России

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

E-mail: genry@icm.krasn.ru

*Разработаны технологии, способы и средства, которые привели к росту физико-механических характеристик и эксплуатационной надежности литых деталей летательных аппаратов из алюминий-магниевого сплава.*

*Ключевые слова: космические аппараты, отливки, алюминий-магний сплав, повышение механических свойств.*

## THE USE OF ALUMINUM-MAGNESIUM ALLOYS FOR THE MANUFACTURE OF CAST PARTS OF AIRCRAFT

G. G. Krushenko<sup>1,2\*</sup>, M. V. Elfimova<sup>3</sup>, S. V. Reshetnikova<sup>2</sup>, A. D. Kuznecov<sup>2</sup>, I. V. Kukushkin<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Krasnoyarsk Science Centre SB RAS

Institute of Computational Modelling SB RAS

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

<sup>3</sup>Siberian Fire and Rescue Academy – branch of Saint-Petersburgh University

of State Fire Service of EMERCOM of Russia

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

E-mail: genry@icm.krasn.ru

*Technologies, methods and means have been developed that have led to the growth of physical and mechanical characteristics and operational reliability of cast parts of aircraft made of aluminum-magnesium alloy.*

*Keywords: space vehicles, castings, aluminum-magnesium alloy, mechanical properties improvement.*

**Сплавы системы Al-Mg.** При производстве деталей и конструктивных элементов летательных аппаратов (ЛА) широко применяется алюминий-магний сплав [1–3], среди которых выделяются сплавы системы Al-Mg отличающиеся высокими механическими свойствами:  $\sigma_b$  – находится в пределах 300...450 МПа, относительное удлинение  $\delta$  – в пределах 10...25 % и высокой удельной прочностью, выражающейся отношением прочности к удельному весу металла ( $\sigma_b/\rho$ ) [5]. Кроме того, эти сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью, выдерживают высокие статические, ударные и вибрационные нагрузки, хорошо обрабатываются резанием и свариваемостью.

**Мероприятия по повышению качества отливок из сплава АЛ27-1.** При всех положительных характеристиках алюминий-магний сплавов для их достижения в получаемых из этих сплавов литых деталях требуется соответствующая «правильная» технология. В работе [7] указывается на сложность приготовления

сплавов системы Al-Mg, в частности, при литье в песчано-глинистые формы, когда отливки могут поражаться газовой пористостью, возникающей в результате взаимодействия металла с влагой формы, что и подтвердилось в нашей работе при освоении литья деталей из сплава АМг10ч. С целью предупреждения возможности возникновения пористости была разработана оптимальная состав формовочной смеси с добавкой только борной кислоты, при использовании которой газовая пористость в отливках конструкций ЛА из сплава АМг10ч была полностью исключена [9].

**Дегазация лигатур.** Одним из источников попадания газов в сплав АМг10ч могут служить лигатуры Al-Ti и Al-Zr, технология приготовления которых связана с применением высоких температур, что способствует их газонасыщению, в основном – водородом. С целью удаления водорода из указанных лигатур в настоящей работе их предварительно по отдельности переплавляли в течение 15 мин в ваку-



умной индукционной высокочастотной печи при 1 100–1 200 °С и разрежении 0,799–1,066 Па с последующей разливкой сплава слоем 15–20 мм в изложницы без снятия вакуума [10].

**Определение очередности загрузки шихтовых материалов.** Ввиду присутствия в шихте компонентов, отличающихся разной склонностью к окислению, а также температурами плавления, с целью получения требуемого состава и максимальных механических свойств сплава возникла необходимость определить очередность их расплавления. В результате был выбран вариант, при котором одновременно расплавляли алюминий и лигатуры Al-Be, Al-Zr и Al-Mn, довели температуру расплава до 700...710 °С и вводили магний; довели температуру до 720...730 °С, рафинировали сплав гексахлорэтаном, поднимали температуру до 780...800 °С, вводили  $KBF_4$ , снижали температуру до 730 °С, выставляли 5 мин и производили заливку.

**Высокотемпературная обработка расплава.** Сплав готовили в индукционной печи и при повышении температуры производили заливку проб. Анализ результатов испытаний механических свойств, вырезанных из проб образцов показал, что оптимальное сочетание прочности и пластичности дает заливка с 750 °С:  $\sigma_b = 445$  МПа,  $\delta = 30$  %, HB = 95 ед. Рост механических свойств с повышением температуры заливки подтвердился и при литье деталей ЛА – «крыльчатки» (лопатки оформлялись песчаным стержнем) и «кронштейна» (земляная форма). Максимальные свойства первой детали ( $\sigma_b = 410$  МПа,  $\delta = 33$  %, HB = 93 ед.) были получены при температуре литья, равной 800 °С, второй ( $\sigma_b = 390$  МПа,  $\delta = 28$  %, HB = 95 ед.) при заливке с 860 °С.

**Фильтрация жидкого сплава.** Ввиду того, что с повышением температуры расплава усиливаются процессы окисления и газонасыщения, что ухудшает качество отливок, была проведена работа по предотвращению негативных последствий перегрева. При этом сплав заливали в форму через магниевую крошку. При этом максимальные свойства ( $\sigma_b = 430$  МПа,  $\delta = 36$  %, HB = 95 ед.) были получены при заливке с 750 °С, тогда как при заливке без фильтрации они оказались ниже:  $\sigma_b = 400$  МПа (меньше на 7,5 %),  $\delta = 30$  % (меньше на 20 %), HB = 95 ед.).

**Выводы.** В результате проведенных исследований были разработаны технологии приготовления сплава AMg10ч с повышенными механическими свойствами.

#### Библиографические ссылки

1. Aluminium alloys for aircraft structures // Introduction to Aerospace Materials. 2012. P. 173–201.
2. Фриджандер И. Н. Алюминиевые сплавы в летательных аппаратах в периоды 1970–2000 и 2001–2015 гг. // МТМ. 2001. № 1. С. 5–9.
3. Dursun T., Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. *Review Materials & Design*. 2014. Vol. 56. P. 862–871.
4. Moreto J. A. et al. SVET, SKP and EIS study of the corrosion behaviour of high strength Al and Al-Li alloys

used in aircraft fabrication. *Corrosion Science*. 2014. Vol. 84. P. 30–41.

5. Codden R. Aluminium: Physical properties, characteristics and alloys // Training in aluminium application technologies. Alcan. Banbury: European Aluminium Association. 1994. 60 p.

6. Колобнев И. Ф. Термическая обработка алюминиевых сплавов. 2-е перераб. и доп. изд. М.: Металлургия, 1966. 395 с.

7. Li H-T et al. Oxides in Liquid Metals and Alloys. BCAS. Brunel Centre for Advanced Solidification Technology. BCAS, Brunel University, Uxbridge, Middlesex, UB8 3PH, UK. P. 93–110.

8. Крушенко Г. Г. Влияние добавок в формовочную смесь борной кислоты на свойства отливок из Al-сплавов // Литейное производство. 2012. № 10. С. 27–29.

9. Патент РФ № 2430177. Способ получения литейного алюминий-магниевого сплава Заявка № 2010100057/02 от 11.01.2010 / Г. Г. Крушенко. Бюл., 2011. № 27.

#### References

1. [Aluminium alloys for aircraft structures]. *Introduction to Aerospace Materials*, 2012, P. 173–201.
2. Fridljander I. N. [Aluminum alloys in aircraft during periods of 1970 the 2000 and 2001 the 2015]. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov*, 2001, No. 1. P. 5–9. (In Russ.)
3. Dursun T., Soutis C. [Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys]. *Review Materials & Design*, April 2014, Vol. 56, P. 862–871.
4. Moreto J. A. et al. [SVET, SKP and EIS study of the corrosion behaviour of high strength Al and Al-Li alloys used in aircraft fabrication]. *Corrosion Science*, July 2014, Vol. 84, P. 30–41.
5. Codden R. *Aluminium: Physical properties, characteristics and alloys. Training in aluminium application technologies*. Alcan. Banbury: European Aluminium Association. 1994. 60 p.
6. Kolobnev I. F. *Termicheskaja obrabotka aljuminievyh splavov. Vtoroe pererab. i dop. izd.* [Heat treatment of aluminum alloys. Second Rev. and ext. ed.]. Moscow, Metallurgy, 1966, 395 p.
7. Li H-T et al. Oxides in Liquid Metals and Alloys. BCAS. *Brunel Centre for Advanced Solidification Technology*. BCAS, Brunel University, Uxbridge, Middlesex, UB8 3PH, UK. P. 93–110.
8. Krushenko G. G. [The influence of additives in the molding mixture of boric acid on the properties of cast Al-alloys]. *Litejnoe proizvodstvo*, 2012, No. 10, P. 27–29. (In Russ.)
9. Krushenko G. G. *Sposob poluchenija litejnogo aljuminievo-magnievogo splava* [A method of obtaining a casting of aluminum-magnesium alloy]. Patent RF, no. 2430177, 2010.

© Крушенко Г. Г., Елфимова М. В., Решетникова С. Н., Кузнецов А. Д., Кукушкин И. В., 2018

УДК 62-238.9

## РАЗРАБОТКА УЗЛА РЕГУЛИРОВКИ НАТЯЖЕНИЯ ВАНТ ДЛЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ КОМПОЗИТНОГО БАКА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Е. Д. Мироненко, С. В. Авкельгин

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: mironenko91@iss-reshetnev.ru

*Представлены результаты работ по проектированию и применению узла регулировки натяжения вантовой системы, применяемой для закрепления композитных баков высокого давления на силовую конструкцию корпуса космического аппарата.*

*Ключевые слова: композитный бак высокого давления, вантовая система, узел регулировки натяжения, космический аппарат.*

## DESIGN OF HIGH-TECH CONTROL UNIT GUYS' SYSTEM TENSION FOR COMPOSITE OVERWRAPPED PRESSURE VESSEL FIXING

E. D. Mironenko, S. V. Avkelgin

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: mironenko91@iss-reshetnev.ru

*The results of the work on the design of high-tech control unit guys' system tension for composite overwrapped pressure vessel fixing on the body bearing structure of spacecraft.*

*Keywords: composite overwrapped pressure vessel, sling system, tension control unit, spacecraft.*

**Введение.** В настоящее время в спутникостроении (как отечественном, так и зарубежном) широкое распространение получили композитные баки высокого давления (КБВД, бак) для размещения необходимого объема топлива на борту космического аппарата (КА). Использование подобных баков позволяет:

– повысить энергомассовые характеристики, срок активного существования (САС) и конкурентоспособность КА.

– решить проблему доведения КА тяжелого класса при помощи собственной двигательной установки, в случаях, когда традиционное выведение разгонным блоком (РБ) невозможно.

Обеспечивая требуемый запас рабочего тела (ксенона) на борту КА (до 400 л) КБВД должен быть надежным. Потеря работоспособности КБВД является единичной точкой отказа всего КА, резервирование столь тяжелого узла невозможно. На данный момент проведены работы по обеспечению надежности КБВД в части требуемой несущей способности и жесткости, исследовано напряженно-деформированное состояние КБВД, о чем свидетельствуют отечественные и зарубежные научные источники [1, 2]. Однако необходимо разработать технологичное решение закрепления вантовой системы КБВД на силовую конструкцию корпуса КА для достижения надежности узла.

В ранее изданных работах большое внимание уделялось определению критериев надежной работы вантовой системы закрепления, приведено описание разработанного регулируемого узла крепления (патент

РФ 2625211 от 12.07.2017) и исследование его напряженно-деформированного состояния [3–5]. На данный момент узел применяется на летных образцах КА производства АО «ИСС».

В результате работ было выявлено, что узел имеет большую массу и низкую точность регулировки. Недостатки обусловлены наличием в конструкции узла двух регулировочных механизмов.

Целью работы является устранение выявленных недостатков, путем разработки принципиально нового узла натяжки вант.

**Описание разработки.** Конструкция разработанного узла, представлена на рис. 1.

Узел имеет один регулировочный механизм, состоящий из скобы 4 с гайками 5, проушины 7 и шпильки 8 с гайкой 9. Натяжение строп 14, осуществляется затяжкой гайки 9 до достижения размера К2 (расчетное значение, обеспечивающее требуемое усилие в стропах). При этом направляющая часть проушины 7 входит в направляющую часть накладки опорной 11 по плотной посадке, обеспечивая требуемое направление натяжки. После выполнения размера К2, проводится стопорение механизма: удерживая гайку 9 монтажным ключом, закрутить шпильку 8 до упора (при помощи шлица).

Скоба 4 в паре с проушиной 7, образует шарнирный узел, позволяя площадке вант поворачиваться в двух плоскостях, что обеспечивает самораспределение усилий в вантах в зависимости от их длин и остаточных напряжений.

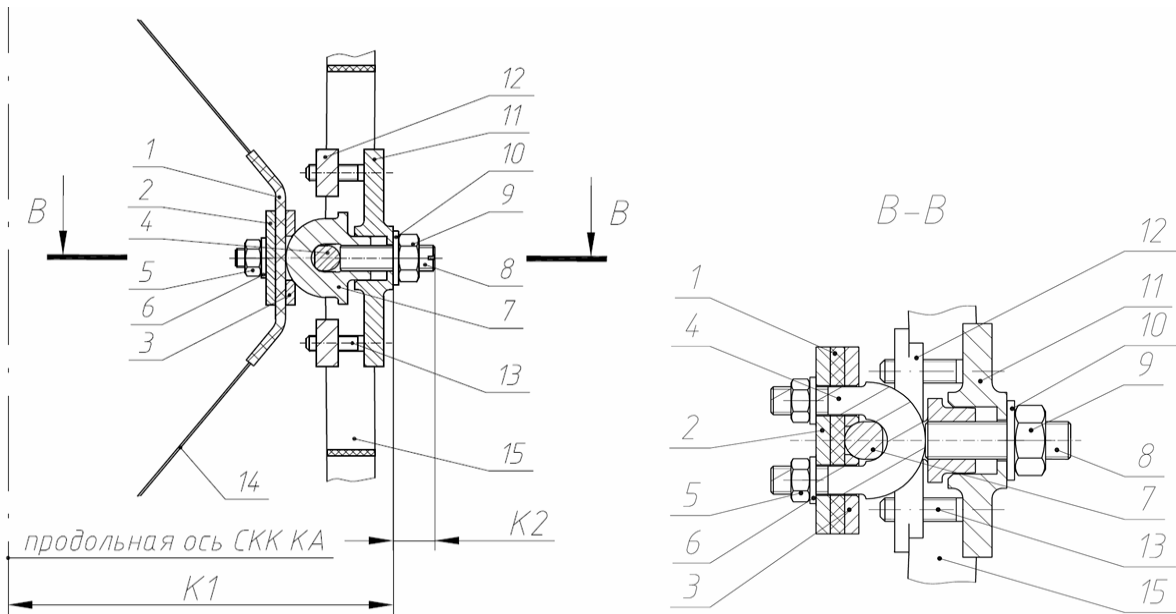


Рис. 1. Конструкция узла натяжения вант:

- 1 – площадка углепластиковая; 2 – накладка внутренняя; 3 – накладка внешняя; 4 – скоба;  
 5 – гайки М6 (2 шт.); 6 – шайбы М6 (2 шт.); 7 – проушина; 8 – шпилька; 9 – гайка М8;  
 10 – шайба М8; 11 – накладка опорная на СКК; 12 – накладка ответная на СКК;  
 13 – винты накладок на СКК; 14 – ванты; 15 – СКК

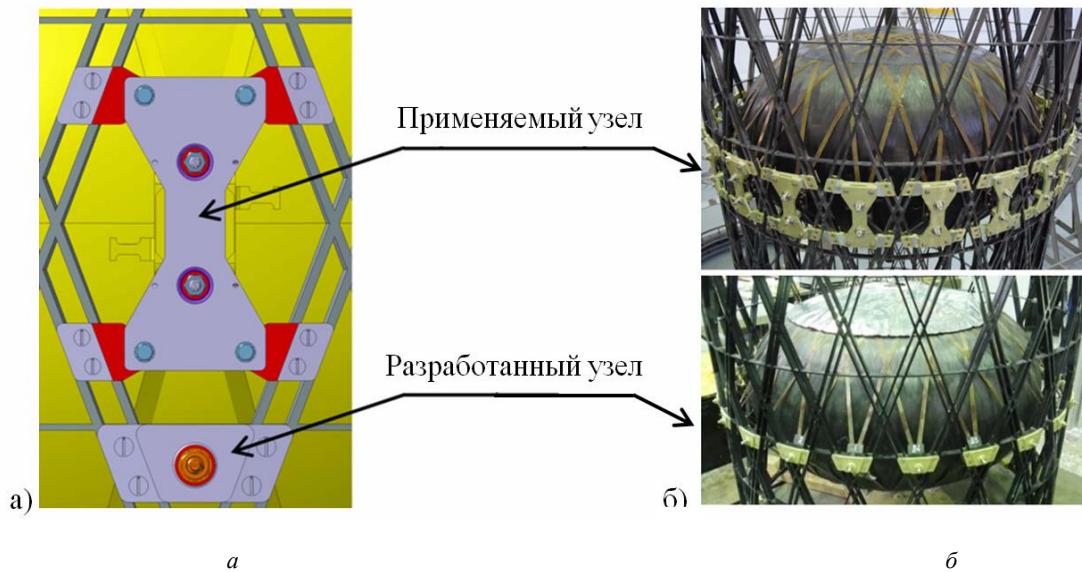


Рис. 2. Сравнение габаритных размеров применяемого и разработанного узлов  
 а – 3D-модель; б – реализация на отработочном изделии

**Заключение.** Использование одного регулирующего механизма (вместо двух) позволяет увеличить точность регулировки натяжения вант, максимально уменьшить габаритные размеры накладки на СКК и упростить технологический процесс регулировки натяжения вант. В сравнении с применяемым в настоящее время узлом, данный узел регулировки вант, выполняя целевую задачу, требует меньшей площади для установки его на СКК. На примере монтажа узлов

(применяемого и разработанного) на СКК, можно наглядно оценить разницу габаритных размеров (см. рис. 2).

Применением разработанного узла на отработочном изделии достигнуто снижение массы узлов на 64% (5,5 кг). Перечисленные выше преимущества характеризуют технологичность разработанного узла. На данное изобретение подана заявка на патент 2018105426 от 13.02.2018.

### Библиографические ссылки

1. Васильев В. В. Композитный бак давления – Анализ проектирования и производства. США : Изд-во Булл-Ридж, 2009. 690 с.
2. Азаров А. В., Бабичев А. А., Синьковский Ф. К. Проектирование и изготовление композитного бака высокого давления для космического аппарата // Композиты и наноструктуры. 2013. № 4. С. 44–57.
3. Способы повышения надежности крепления топливного бака высокого давления к силовой конструкции корпуса космического аппарата / Е. Д. Мироненко и др. // Вопр. оборон. техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. М. : НТЦ «Информтехника» – филиал ФГУП «НИИСУ», 2016. Вып. 1 (180). С. 25–29.
4. Мироненко Е. Д., Михеев А. Е., Подпорина Н. М. Projekterstellung des verstellbaren Befestigungselementes der Konstruktion mit Interface auf Anschlagseilen // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации [Электронный ресурс]. URL: <https://flcys.sibsau.ru/page/materials.html> (дата обращения: 25.03.2018).
5. Мироненко Е. Д., Авкельгин С. В., Двирный Г. В. Разработка регулируемого узла крепления конструкций с интерфейсом на стропах // 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. Красноярск, 2015. Ч. 1. С. 33–36.

### References

1. Vasiliev V. V. Composite Pressure Vessels – Analysis Design and Manufacturing. – Bull Ridge Publishing, USA, 2009. 690 p.
2. Azarov A. V., Babichev A. A., Sinkovskii F. K., Proektirovanie i izgotovlenie kompozitnogo baka vysokogo davleniya dlya kosmicheskogo apparata// Kompoziti i Nanostrukturi. 2013. № 4. 44–57 p.
3. Mironenko E. D. Sposobi povisheniya nadejnosti krepneniya toplivnogo baka visokogo davleniya k silovoi konstrukcii korpusa kosmicheskogo apparata // Vopr. obron. tehnik. Ser. 15. Kompozitsionnie nemetallicheskie materialy v mashinostroenii. 2016, P. 25–29.
4. Mironenko E. Projekterstellung des verstellbaren Befestigungselementes der Konstruktion mit Interface auf Anschlagseilen // Youth. Society. Modern science, technologies & innovations. Available at: <https://flcys.sibsau.ru/page/materials.html> (accessed: 25.03.2018).
5. Mironenko E. D., Avkelgin S. V., Dvirniy G. V. Adjustable strap attachment fitting development // Materialy XIX Mezhdunar. nauch. konf. “Reshetnevskie chteniya” [Materials XIX Intern. Scientific. Conf “Reshetnev reading”]. Krasnoyarsk, 2015. P. 34–36.

© Мироненко Е. Д., Авкельгин С. В., 2018

УДК 539.231

## ТЕХНОЛОГИЯ ВАКУУМНО-МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ЭЛЕМЕНТЫ КОСМИЧЕСКОГО АПАРАТА

П. А. Орлин, М. С. Руденко

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

*Описаны результаты нанесения радиоотражающих и защитных покрытий методом магнитного распыления на изделия из углепластика для обеспечения необходимых технических и эксплуатационных характеристик.*

*Ключевые слова: вакуумное напыление, магнетронное распыление, углепластик.*

## COATINGS APPLIED BY THE METHOD OF MAGNETIC SPRAY TO SATELLITES

P. A. Orlin, M. S. Rudenko

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

*The article describes the results of applying various coatings by magnetic spraying to products made of CFRP to provide the necessary technical and operational characteristics.*

*Keywords: vacuum deposition, magnetron sputtering, carbon plastic.*

При проектировании и изготовлении деталей и узлов спутников, эксплуатируемых в экстремальных условиях, всегда встает вопрос о выборе оптимальных конструкторско-технологических решений, для обеспечения требуемых технических характеристик. Процесс изготовления узлов изделий спутника связан с широким использованием покрытий самого различного назначения. Покрытия, наносимые на рабочие поверхности деталей, определяют тактико-технические и эксплуатационные характеристики конструкций спутников. Одним из эффективных методов, обеспечивающим высокие эксплуатационные свойства покрытия, работающего в экстремальных условиях, является вакуумное напыление методом магнетронного распыления [1].

В Сибирском государственном университете науки и технологий (СибГУ им. М. Ф. Решетнева) на базе кафедры «Летательных аппаратов» была разработана и получена технология нанесения тонких покрытий методом магнетронного распыления на изделия из углепластика.

Углепластик представляет собой материал из переплетённых нитей углеродных волокон, расположенных в матрице из полимерных смол. Сочетание таких важных свойств, как высокая прочность, жесткость и малый удельный вес, предопределили его широкое распространение во многих сферах. В ракетно-космической технике этот материал стал основой многих конструкций.

Рефлекторы антенно-фидерных систем так же изготавливаются из углепластика (рис. 1). И для повышения радиоизлучающих свойств рефлектора на его поверхность наносят радиоотражающие покрытия.

В ходе исследования было выявлено, что радиоотражающие покрытия необходимо выполнять из трех слоев:

- первый слой никрома – подслоя материала, связывающий основной функциональный слой и подложку;
- второй слой алюминия – основной функциональный слой материала, выполняющий функцию радиоотражения;
- третий слой оксида кремния – защитный слой, защищающий основной слой от механических, коррозионных, и прочих повреждений.



Рис. 1. Рефлектор Ка-диапазона

Напыление производилось на вакуумной установке УВМ-1200D. В данной вакуумной установке используется безмасляная система вакуумной откачки, включающая в себя форвакуумный и турбомолекулярный насосы. Внутри камеры располагаются три магнетрона с мишенями из необходимых материалов,

что позволило производить напыление не вынимая изделие из вакуумной камеры [2].

При производстве панелей солнечных батарей для получения более высокого КПД на поверхности из углепластика необходимо наносить покрытия, обладающие более высокими светоотражающими свойствами (рис. 2). Данными свойствами обладают покрытия из алюминия.

Напыления покрытия производилось в три этапа:

1) выдерживание детали под глубоким вакуумом, для обезгаживания смол, чтобы избежать появления брака на покрытии;

2) ионная очистка, чтобы очистить поверхность от загрязнений;

3) непосредственно напыление в среде инертного газа (аргон).



Рис. 2. Панели солнечных батарей

Одной из перспективных направлений является разработка технологий нанесения нитрида титана (TiN) в вакуумной камере методом магнетронного распыления на углепластиковые изделия [3]. Данное покрытие обладает высокими значениями показателей твердости и упругости, температуростойкости и химической инертности, высокой электро- и теплопроводности. Метод магнетронного распыления наилучшим способом подходит для осаждения тонких пленок нитрида титана, так как позволяют получать покрытия без капельной фракции, с высокими функциональными характеристиками при скоростях осаждения, сравнимых с методом дугового испарения. Так же при данном методе распыления температурное воздействие на подложку не значительно. Технология нанесения покрытия усложняется тем, что необходимо найти оптимальное соотношение расхода азота и мощности подаваемой на магнетрон.

Рентгеноструктурные исследования покрытий были проведены с помощью рентгеновского энергодисперсионного спектрометра ARL QUANT'X компании ThermoScientific.

Полученные покрытия позволили достичь необходимых качественных характеристик поверхностей напыляемых изделий. В случае рефлектора были получены необходимый коэффициент радиоотражения и терморрадиационные характеристики. Алюминиевое покрытие солнечных батарей повысило их светоотражающие свойства. Покрытия из нитрида титана позволили достичь таких требуемых технических характеристик, как износостойкость и температуростойкость. Для оптимизации технологий с целью обеспечения заданных параметров покрытия необходимо

проведение операций по предварительной обработки углепластика: черновая и чистовая очистка поверхности, проведение мер по уменьшению степени загрязнения плазмообразующего газа, остаточной атмосферой камеры [4].

#### Библиографические ссылки

1. Характеристика радиоотражающих покрытий на образцах из полимерных композиционных материалов, изготовленных по технологии трансферного формования / А. Е. Михеев, А. А. Черныгина, И. В. Евкин и др. // Вестник СибГАУ. Вып. 4(56). С. 236.

2. Зоммер С. А., Хоменко И. Разработка схемы вакуумной камеры для нанесения многослойных радиоотражающих покрытий на рефлекторы Кадиапазона // Решетневские чтения : материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф. (10–14 нояб. 2015, г. Красноярск). 2015. С. 18–19.

3. Свойства пленок нитрида титана, полученных методом магнетронного распыления / Ю. Н. Юрьев, К. С. Михневич, В. П. Кривобоков и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16, № 4(3). С. 672–677.

4. Михеев А. Е., Колмыков В. А. Повышение эксплуатационных характеристик поверхностей элементов конструкций летательных аппаратов. Автоматизация процессов обработки. М. : МАКС Пресс, 2002. 224 с.

#### References

1. Miheev A. E., Chernyatina A. A., Evkin I. V. [Characterization of radio-reflective coatings on samples of polymeric composite materials manufactured using the technology of transfer molding] // "Kharakteristika radiootrazhayushchikh pokrytiy na obraztsakh iz polimernykh kompozitsionnykh materialov, izgotovlenykh po tekhnologii transfornogo formovaniya" // Vestnik SibSAU. № 4 (56). 236 p.

2. Zommer S. A., Homenko I., [Development of the scheme of a vacuum chamber for depositing multi-layer radio-reflective coatings on Ka-band reflectors] // "Razrabotka skhemy vakuumnoj kamery dlya naneseniya mnogoslojnyh radiootrazhayushchih pokrytij na reflektory Ka-diapazona" / Reshetnevskie chteniya materialy XIX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, 2015. P. 18–19.

3. Yurev Y. N., Mihnevich K. S., Krivobokov V. P. [Properties of titanium nitride films obtained by magnetron sputtering] // Svoystva plenok nitrída titana poluchennykh metodom magnetronnogo raspysleniya / Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk, tom 16, № 4(3). 2014. P. 672–677.

4. Miheev A. E., Kolmykov V. A. [Improving the performance characteristics of the surfaces of structural elements of aircraft. Automation of processing processes] // Povyshenie ehkspluatatsionnykh harakteristik poverhnostej ehlementov konstrukcij letatelnykh apparatov Avtomatizatsiya processov obrabotki. M. : MAKSS Press, 2002. 224 p.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКРАННО-ВАКУУМНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ДЛЯ ЕМКОСТЕЙ ХРАНЕНИЯ КРИОГЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ

И. В. Пекарская\*, А. В. Остапенко

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
\*E-mail: map6646@mail.ru

*Влияние внешнего теплообмена на внутренний тепловой режим космического аппарата (КА) можно существенно уменьшить и даже свести к пренебрежимо малой величине. Такого эффекта можно достичь при использовании экранно-вакуумной теплоизоляции (СЭВТИ).*

*Ключевые слова: экранно-вакуумная теплоизоляция, ЭВТИ, теплоизоляция.*

## MAIN TYPICAL INDICATORS OF ESTIMATION OF THE LEVEL OF TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF ENTERPRISES OF THE ROCKET AND SPACE INDUSTRY

I. V. Pekarskaya\*, A. V. Ostapenko

JSC „Krasnoyarsk Machine Building Plant“  
29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
\*E-mail: map6646@mail.ru

*The effect of external heat transfer on the internal thermal regime of a space vehicle (spacecraft) can be significantly reduced and even reduced to a negligible magnitude. Such an effect can be achieved by using screen-vacuum heat insulation (EVTI).*

*Keywords: screen-vacuum heat insulation, EVTI, heat insulation.*

Экранно-вакуумная теплоизоляция криогенной емкости ракетного космического разгонного блока состоит из матов, в состав каждого из которых входит, по крайней мере, два пакета, причем каждый пакет состоит из чередующихся слоев экранного материала и прокладочного материала, кроме того, два слоя экранного материала, формованные на металлической сетке, установлены в качестве первого и последнего слоев и экранного материала каждого мата, зазоры в стыках пакетов перекрыты дополнительными слоями экранного материала [1].

Как показывает практика, такой состав экранно-вакуумной теплоизоляции является наиболее оптимальным для эффективного хранения криогенных компонентов (например, жидкого кислорода) в криогенных емкостях большого объема, в том числе для космических условий, при этом количество слоев в пакетах и количество пакетов в матах определяется тепловым расчетом, исходя из условий эксплуатации изделия.

Слои экранного материала как правило, перфорируют для обеспечения выхода газа из межслойных пространств при вакуумировании экранно-вакуумной теплоизоляции.

Слои экранного материала большой площади получают путем сварки полотен этого материала друг с другом с последующим кроем по шаблону в составе пакетов.

Толщина слоев экранного материала и их тип выбирают в зависимости от условий эксплуатации экранно-вакуумной теплоизоляции.

Формование на сетке выполняется для получения объемного экранного материала, обеспечивающего необходимые зазоры между соседними поверхностями.

Процесс теплопередачи через экранно-вакуумную теплоизоляцию в общем случае осуществляется тремя видами теплопереноса: теплопроводностью по твердому телу, теплопроводностью по газу и лучистой составляющей теплового потока. Теплопроводность по твердому телу определяется количеством контактов между слоями экранного материала. Для их уменьшения между слоями экранного материала устанавливают прокладку, выполненную из низкотеплопроводного материала, капрона. При невесомости от наличия остаточных деформаций в экранно-вакуумной теплоизоляции количество контактов и их площадь уменьшается, при этом снижается составляющая теплопереноса по твердому телу.

В процессе полета КА давление окружающей среды уменьшается и в конечном итоге достигает уровня от  $10^{-8}$  до  $10^{-9}$  мм рт. ст. За счет наличия перфорации слоев экранно-вакуумной теплоизоляции газ из межслойных пространств удаляется в окружающее пространство и при достижении давления в слоях  $10^{-4}$  мм рт. ст. и ниже процесс вакуумирования стано-

вится квазистационарным, и составляющая теплового потока по газу становится близкой к нулю.

Лучистая составляющая теплового потока определяется качеством металлизации слоев экранного материала и характеризуется степенью черноты. Современные экранные материалы металлизуются алюминием, при этом степень черноты находится в пределах 0,05–0,1. Лучистая составляющая теплового потока зависит только от перепада температур между слоями экранного материала  $\epsilon$  и качества их металлизации.

В способе изготовления экранно-вакуумной теплоизоляции криогенной емкости ракетного космического разгонного блока, включающей изготовление матов в виде чередующихся слоев экранного и прокладочного материала, пакеты экранно-вакуумной теплоизоляции изготавливают по шаблонам, устанавливают их на имитатор теплоизолируемой поверхности криогенной емкости, слои в пакетах скрепляют между собой кнопками, из пакетов собирают маты, при этом не менее трех верхних слоев каждого мата обшивают по контуру тканью, при этом стыки пакетов в матах смещают друг относительно друга, маты укладывают друг относительно друга с перекрытием пакетов и соединяют между собой.

В матах экранно-вакуумной теплоизоляции выполнены отверстия и обшивают их тканью, через которые проходят электрические и пневмогидравлические связи с емкостью.

Зазоры между отверстиями в теплоизоляции и конструкциями, связанными с емкостью, могут быть перекрыты, например, намоткой ленточной экранно-вакуумной теплоизоляции на эти конструкции.

Маты, выполненные в объемном виде, хранятся и транспортируются на объемных каркасах, этим обеспечивается их качественное состояние.

Экранно-вакуумная теплоизоляция криогенной емкости ракетного космического разгонного блока работает следующим образом.

В процессе полета ракеты с падением атмосферного давления газ, находящийся в межслойных пространствах экранно-вакуумной теплоизоляции, выходит из экранно-вакуумной теплоизоляции за счет наличия перфорации в слоях экранного материала и прокладочного материала и при достижении давления ниже  $10^{-4}$  мм рт. ст. процесс вакуумирования становится близким к стационарному, в результате чего экранно-вакуумная теплоизоляция криогенной емкости готова выполнять свои функции по обеспечению температурного режима криогенного компонента в космических условиях [2].

#### References

1. Electronic textbook StatSoft. Available at: <https://studopedia.info/3-64162.html> (accessed: 30.08.2018).
2. Electronic textbook StatSoft. Available at: <http://www.fmdpatent.ru/patent/234/2344972.html> (accessed: 30.08.2018).

© Пекарская И. В., Остапенко А. В., 2018



УДК 629.7

## ПРИМЕНЕНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ БЕСПИЛОТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

С. А. Пикулин, Е. В. Красилова

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 возможность применения топологической оптимизации в процессе проектирования беспилотных КА, перечислены основные достоинства и недостатки данного метода при расчете деталей.*

*Ключевые слова: топологическая оптимизация, автоматизация, компоновка.*

## USAGE OF TOPOLOGY OPTIMIZATION IN THE DESIGN OF UNMANNED SPACECRAFTS

S. A. Pikulin, E. V. Krasilova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: 19pikulin@mail.ru

*The article reveals the possibility of the usage of topology optimization in process of design of the unmanned spacecrafts, advantages and disadvantages of this method while calculation of the parts are enumerated.*

*Keywords: topology optimization, automatization, layout.*

Топологическая оптимизация – это процесс последовательного приближения к оптимальной с точки зрения заданных условий конструкции, результатом которого является изменение ее формы и размеров, появление новых элементов. Подробно об алгоритмах работы программ, реализующих данный метод, написано в статье [1]. В настоящее время основной целью данного метода является снижение массы конструкции при сохранении или увеличении ее прочности и/или жесткости (например, [2]), что крайне важно в аэрокосмической отрасли [3]. От массы спутника зависит цена его доставки на орбиту, а от массы конструкции ракеты количество топлива, требуемого для достижения ей заданной скорости. Однако проблемы прочности и снижения массы не единственные, с которыми сталкиваются инженеры при проектировании деталей и узлов космической техники. Также необходимо разместить все необходимое оборудование в ограниченном объеме, рассчитать конструкцию с учетом влияния температур, вибрации, аэродинамического сопротивления и многое другое.

При проектировании беспилотных космических аппаратов важнейшими ограничивающими факторами являются масса и размеры конструкции. Ограничения массы вызваны стоимостью и энергетическими возможностями существующих РН, а габаритов – размерами головного обтекателя.

Так как беспилотным аппаратам не требуется наличие пространства для перемещения экипажа, плотность компоновки определяется размерами отдельных элементов аппаратуры, необходимостью прокладки кабелей и трубопроводов системы охлаждения, эле-

ментами силовых конструкций, необходимым распределением масс для обеспечения требуемых моментов инерции для лучшей управляемости и другими условиями [4]. Однако многие приборы и системы доставляются на завод-изготовитель КА в собранном виде и не подлежат изменению. Например, масса электронной аппаратуры, установленной на КА может составлять до 60 % его массы [4]. В космической технике широко распространен принцип модульной компоновки, который позволяет легко тестировать КА и быстро заменять неисправные модули [4]. Такой подход удобен для отработки аппарата, но он не позволяет вносить изменения в размеры модулей и существенно ограничивает возможности рассматриваемого метода. Кроме того, необходимо учитывать специфику работы аппаратуры и бортовых систем, назначение аппарата, необходимость его ориентации в пространстве [4]. Все эти факты говорят о том, что применить рассматриваемый метод к произвольному КА для оптимизации его компоновки в настоящее время не представляется возможным, так как анализ возможности применения и сам процесс оптимизации для конкретного аппарата может занять значительное время.

Можно сделать вывод, что в настоящее время круг задач, решаемых с применением топологической оптимизации при проектировании беспилотных КА ограничивается внесением изменений в конструкцию отдельных элементов КА. Однако даже этого может быть достаточно, чтобы существенно снизить стоимость аппарата. К примеру, масса конструкции ИСЗ составляет до 15 % от массы всего спутника, включая

систему отделения от носителя [4]. Пример оптимизации детали КА можно найти в статье [5]. Полученное снижение массы составило 24 %. Таким образом, при условии сохранения того же показателя и для других деталей снижение общей массы спутника может достигать 3,6 %. Однако в будущем возможно добиться и большей экономии.

Отметим основные достоинства применения метода при оптимизации деталей КА:

1. Повышение удельной прочности изделия.

2. Уменьшение объема, занимаемого деталью. При наложении соответствующих ограничений деталь может иметь отверстия для прокладки кабелей или трубопроводов, либо принимать форму с учетом размещения неизменяемых элементов.

3. Современные системы позволяют создавать некоторые детали практически с нуля [6].

4. Упрощение процесса проектирования за счет автоматизации.

5. Независимость метода от каких-либо параметров исходной геометрии [5]. То есть созданная деталь является по сути новой, а не улучшенной.

Однако, как и любой другой метод, топологическая оптимизация имеет недостатки, не позволяющие быстро внедрить ее в проектирование КА:

1. Сложность форм полученных деталей. Проблема может решаться системами обработки оптимизированных деталей и приведением их к виду, подходящему по технологии изготовления. Также возможно применение 3D-печати. Однако ввиду не освоения данного метода не может быть применено в больших масштабах в настоящее время в космической промышленности в связи с требованиями надежности КА. Приведение модели к приемлемому для изготовления виду занимает значительное время [7].

2. Процесс сложен, а его разработка ведется в настоящее время зарубежными фирмами. Поэтому для его применения в России необходимо закупать дорогостоящее программное обеспечение. Для преодоления этого необходимо в ближайшее время начинать разработку отечественных программ, что проще всего будет сделать на основе российской САПР «КОМПАС-3D».

3. Метод имеет множество нерешенных или решенных не до конца проблем, связанных с несовершенством алгоритма разбиения детали конечно-элементной сеткой и других, приводящих к необходимости постоянной его доработки.

4. Необходимость наличия больших вычислительных мощностей.

5. Проблематичность контроля полученных деталей ввиду сложности формы и отсутствия стандартов качества для подобных изделий.

Таким образом, топологическая оптимизация подходит для решения в космической промышленности тех же задач, что и в общем машиностроении. С развитием метода будут возможны и иные способы его применения: совершенствование сборок; проектирование развешиваемых конструкций; проектирование менее габаритных аппаратных модулей; прокладка кабельной сети и труб системы охлаждения; компоновка КА.

## Библиографические ссылки

1. Сысоева В. В., Чедрик В. В. Алгоритмы оптимизации топологии силовых конструкций // Ученые записки ЦАГИ. 2011. № 2. С. 91–101.
2. Перепроектирование кронштейна рефлектора на основе топологической оптимизации с применением ИСКПИ, 2017. [Электронный ресурс]. URL: <http://fea.ru/project/199> (дата обращения: 11.08.2018).
3. Башин К. А., Торсунов Р. А., Семенов С. В. Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли // Вестник ПНИПУ. 2017. № 51. С. 51–59.
4. Гушин В. Н. Основы устройства космических аппаратов : учебник для вузов. М. : Машиностроение, 2003. С. 192–195.
5. Захаров В. О. Топологическая оптимизация в современном космическом машиностроении. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.rusnauka.com/13\\_NPE\\_2017/Tecnic/9\\_224608.doc.htm](http://www.rusnauka.com/13_NPE_2017/Tecnic/9_224608.doc.htm) (дата обращения: 12.08.2018).
6. DM Labs – Live Parts. [Электронный ресурс]. URL: <https://labs.desktopmetal.com/liveparts> (дата обращения: 13.08.2018).
7. Четыре основных ошибки при топологической оптимизации, 2017 [Электронный ресурс]. URL: <https://cae-club.ru/publications/chetyre-osnovnyh-oshibki-pri-topologicheskoy-optimizacii> (дата обращения: 13.08.2018).

## References

1. Sysoeva V. V., Chedrik V. V. [Algorithms of topology optimization of the power structures]. *Uchenye zapiski CAGI*. 2011. No. 2. P. 91–101 (In Russ.).
2. *Pereproektirovanie kronshtejna reflektora na osnovе topologicheskoy optimizacii s primeneniem ISKPI* [Redesign of the reflector bracket based on topological optimization with the use of ICPS] (In Russ.). Available at: <http://fea.ru/project/199> (accessed: 11.08.2018).
3. Bashin K. A., Torsunov R. A., Semenov S. V. [Methods of topological optimization of structures used in the aerospace industry] // *Vestnik PNIPU*. 2017. No 51. P. 51–59 (In Russ.).
4. Gushchin V. N. *Osnovy ustrojstva kosmicheskikh apparatov* [Basics of spacecraft design]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2003. P. 192–195 (In Russ.).
5. Zaharov V. O. Topologicheskaya optimizaciya v sovremennom kosmicheskom mashinostroenii [Topological optimization in modern space engineering] (In Russ.). Available at: [http://www.rusnauka.com/13\\_NPE\\_2017/Tecnic/9\\_224608.doc.htm](http://www.rusnauka.com/13_NPE_2017/Tecnic/9_224608.doc.htm) (accessed: 12.08.2018).
6. DM Labs – Live Parts. Available at: <https://labs.desktopmetal.com/liveparts> (accessed: 13.08.2018).
7. *Chetyre osnovnyh oshibki pri topologicheskoy optimizacii* [Four major errors in topological optimization] (In Russ.). Available at: <https://cae-club.ru/publications/chetyre-osnovnyh-oshibki-pri-topologicheskoy-optimizacii> (accessed: 13.08.2018).

УДК 629.78

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРООСМОТИЧЕСКОГО НАСОСА В ОДНОФАЗНОМ КОНТУРЕ СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ

Г. А. Реготов\*, И. А. Марченко

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
\*E-mail: regotovgrisha@mail.ru

*Оценивается возможность применения электрокинетического насоса в однофазном контуре системы терморегулирования космического аппарата, даны результаты моделирования электроосмотического течения.*

*Ключевые слова: космический аппарат, электроосмос, система терморегулирования, электрокинетический насос.*

## EVALUATION OF THE OPPORTUNITY OF APPLICATION OF ELECTRO-KINETIC PUMP IN A SINGLE-PHASE CIRCUIT OF THE THERMOREGULATING SYSTEM

G. A. Regotov\*, I. A. Marchenko

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
\*E-mail: regotovgrisha@mail.ru

*The article evaluates the possibility of using an electrokinetic pump in a single-phase circuit of the spacecraft thermal control system, and the results of modeling the electroosmotic flow are given.*

*Keywords: space vehicle, electroosmosis, thermal control system, electrokinetic pump.*

В реалиях текущего развития мировой космической отрасли вопрос увеличения срока активного существования автоматических космических аппаратов определяет необходимость поиска новых технических решений в плане повышения надежности оборудования – спутники со сроком активного существования менее 15 лет на мировом рынке уже все менее конкурентоспособны, а в скором будущем и этого будет мало. Также, выйдя за рамки обсуждения только автоматических космических аппаратов, стоит упомянуть и о пилотируемых космических программах. Ведь на данный момент во многих ведущих космических державах мира разрабатываются концепции по освоению космоса за пределами околоземного пространства [1].

При оценке описанных выше условий необходимость увеличения надежности аппарата видится одной из основных опорных точек, от которой следует отталкиваться при разработке новых космических аппаратов, их подсистем и отдельных агрегатов. В роли подобного агрегата был предложен электрокинетический насос, который обладает рядом достоинств, среди которых отсутствие механически подвижных элементов, отсутствие вибраций, пониженное энергопотребление, меньшая масса и т. д. [2].

Схема конструкции электрокинетического насоса представлена на рисунке.

При оценке применения существующих вариантов электрокинетических насосов [3–5] в различных областях науки и техники было сделано предположение

о невозможности применения данного агрегата как прямой замены электронасосному агрегату, применяемому для обеспечения циркуляции теплоносителя в жидкостном контуре системы терморегулирования космического аппарата. Основанием для этого предположения служит небольшой удельный расход рабочего тела на площадь пористой структуры, что накладывает ограничения по расходу электрокинетического насоса

Для приблизительной оценки расхода жидкости в электрокинетическом насосе поставлена математическая модель электроосмоса и решена численная задача течения в электрокинетическом насосе. Заданные в модели параметры определены текущими достижениями в технологиях создания пористых структур с калиброванным диаметром пор, примерными габаритами предполагаемого насоса и диапазоном электрических напряжений, выдаваемых энергообразующей системой автоматического космического аппарата.

В результате решения были получены данные о скорости течения до 30 мм/с при напряжении 100 В. Массовый мгновенный расход в данной постановке на 1 см<sup>2</sup> площади поперечного сечения пористой мембраны составил порядка 1,05 г/с, что, безусловно, подтверждает предположение о том, что как полноценную замену классическому электронасосу в однофазном контуре в плане производительности электрокинетический насос рассматривать нельзя в силу недостаточной производительности.

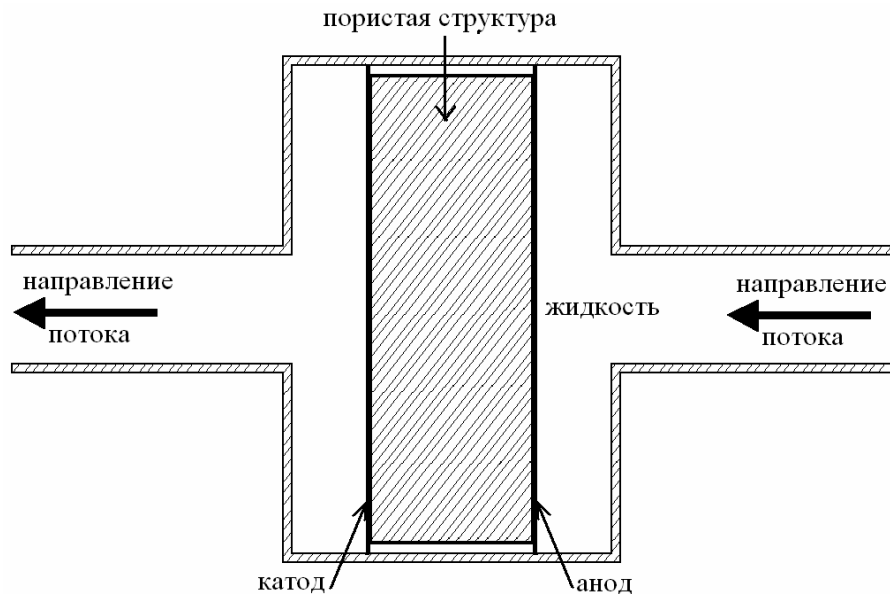


Схема конструкции электрокинетического насоса

Исходя из вышеописанного, применение электрокинетического насоса возможно только в двухфазных контурах, где для насоса не требуется обеспечение высокого расхода и создание относительно большого перепада давления. Космический аппарат может иметь в своем составе множество независимых двухфазных контуров с применением электрокинетических насосов, обеспечивающих температуры посадочных мест различных групп приборов. Подобное построение космического аппарата требует пересмотра проектирования и технологии изготовления его элементов, что влечет определенные затраты ресурсов, однако, в перспективе увеличивает надежность системы терморегулирования, что приведет к увеличению срока активного существования спутника, являющегося одним из основных критериев конкурентоспособности на рынке космических технологий.

#### Библиографические ссылки

1. «Роскосмос»: Россия планирует построить базу на Луне в 2030–2035 гг. [Электронный ресурс]. URL: <https://tass.ru/kosmos/3178557> (дата обращения: 15.08.2018).
2. Бастрыкина Н. С. Электрокинетический сорбционно-мембранный микронасос : дис. ... канд. техн. наук. М. : ГЕОХИ РАН, 2008. 150 с.
3. Eijkel J. Liquid slip in micro- and nanofluidics: recent research and its possible implications. *Lab on a chip*, 7, 2007. P. 299–301.

4. Buie C. R., Kim D., Litster S. E., Santiago J. G. Free convection direct methanol fuel cells powered by electroosmotic pumps. *ECS Trans.* 2006. P. 1279–1287.
5. Chen L., Ma J., Guan Y. An electroosmotic pump for packed capillary liquid chromatography. *Microchem.* 2003. P. 15–21.

#### References

1. „Roskosmos“: Rossiya planiruet postroit' bazu na Lune v 2030–2035 gg. [„Roskosmos“: Russia plans to build a base on the Moon in 2030-2035.]. Available at: <https://tass.ru/kosmos/3178557> (accessed: 15.08.2018).
2. Bastyrykina N. S. Elektrokineticheskiy sorbtionno-membrannyy mikronasos : dis. ... kand. tekhn. nauk [Electrokinetic sorption-membrane micropump. Cand.tech.sci diss.]. Moscow : GEOKHI RAS publ., 2008. 150 p.
3. Eijkel J. Liquid slip in micro- and nanofluidics: recent research and its possible implications. *Lab on a chip*, 7, 2007. P. 299–301.
4. Buie C. R., Kim D., Litster S. E., Santiago J. G. Free convection direct methanol fuel cells powered by electroosmotic pumps. *ECS Trans.* 2006. P. 1279–1287.
5. Chen L., Ma J., Guan Y. An electroosmotic pump for packed capillary liquid chromatography. *Microchem.* 2003. P. 15–21.

© Петов Г. А., Марченко И. А., 2018

УДК 621.791

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОБНАРУЖЕНИЮ ДЕФЕКТОВ СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ

И. А. Скачков, В. В. Ананьев, В. Ю. Гусев, С. К. Злобин, Р. В. Зайцев

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: skachokilya94@gmail.com

*Рассмотрены возможные дефекты при сварке трубопровода, приведены методы обнаружения дефектов.*

*Ключевые слова: трубопровод, дефекты, обнаружение, сварка, пайка.*

## TECHNOLOGICAL MEASURES TO DETECT DEFECTS IN WELDED AND SOLDERED JOINTS OF PIPELINES

I. A. Skachkov, V. V. Ananьев, V. Y. Gusev, S. K. Zlobin, R. V. Zaitsev

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: skachokilya94@gmail.com

*Possible defects when welding the pipeline are considered, methods of detection of defects are given.*

*Keywords: pipeline, defects, detection, welding, soldering.*

Исследуемые способы неразрушающего контроля сварных и паяных соединений систем терморегулирования космических аппаратов, использующих в качестве рабочей среды жидкости, содержащие соединения аммиака. Элементы системы состоят из тонкостенных труб и арматуры, изготовленных из хромоникелевой аустенитной стали 12X18H10T. Из-за агрессивных свойств амиакосодержащих жидкостей недопустимо использование при сварке и пайке присадочных материалов, содержащих медь и её сплавы. В данной работе рассмотрены сварные и паяные стыковые соединения трубы диаметром 5 мм и толщиной стенки 0,4 мм с арматурой.

Виды различных дефектов при сварке трубопровода [1]:

1. Наплывы.
2. Подрезы.
3. Трещины.
4. Прожоги.
5. Инородные включения.
6. Поры.

Нарушения в структуре металла шва или околошовной зоны могут проявиться через увеличение концентрации оксидов, микропоры и микротрещины, крупную зернистость.

Тепловой режим при формировании структуры металла играет решающую роль. Избыточный нагрев ведет к образованию крупных зерен в структуре. При пережоге металла возможно появление зерен с окисленными поверхностями. Все это ведет к хрупкости металла [1].

Методы обнаружения дефектов при сварке трубопровода.

*Исследование герметичности.* Сварные соединения трубопроводов должны обладать герметичностью для тех веществ (жидкостей или газов), которые транспортируются по этому трубопроводу. Контроль герметичности (непроницаемости) проводится после сборки трубопровода. Он включает следующие основные способы проверки: капиллярный, химический, пузырьковый, а также путем вакуумирования и с использованием искателя течи [2].

*Магнитный метод установки дефектов.* Неразрушающие способы контроля сварных соединений трубопроводов, учитывающие магнитные свойства материалов, позволяют установить расположение дефектов путем исследования магнитного рассеяния в неоднородных структурах при намагничивании металла сварной зоны. Часть трубы намагничивается при помощи соленоида, помещенного во внутреннюю полость, или путем наматывания проводом обмотки поверх сварочного шва. Проверку проводят методом порошка, индукционным или магнитографическим методом, отличающиеся способом измерения рассеивания магнитного потока [2].

*Радиационный метод.* Неразрушающие радиационные способы контроля сварных соединений трубопроводов опираются на свойства рентгеновского излучения и гамма-излучения. Сварные швы пронизываются лучами с применением специальных источников излучения. Лучи фиксируются на специальной пленке, где участки затемнения указывают на наличие дефектов [2]. Местонахождение и их размеры легко различимы.

*Ультразвуковой метод.* Неразрушающий ультразвуковой метод контроля сварных соединений широко

ко применяется для фиксации дефектов в толще металлов. Такой способ использует свойство ультразвуковых волн пронизывать материал на значительную глубину и рассеиваться на границах дефектов [2]. Источником волн является пьезокристалл, размещенный в специальной пластине (щупе).

Инструмент и приборы, рекомендуемые при проведении неразрушающего контроля сварных соединений трубопровода:

Лупа, штангенциркуль, микрометр, индикатор глубины, шаблоны сварного шва, дефектоскоп, индикатор течи, газоанализатор [2].

Неразрушающий анализ сварных и паяных соединений трубопроводов является важным элементом обеспечения надежности и безопасности. Его проведение регламентируется стандартами и обязательно при изготовлении и эксплуатации трубопроводов.

#### **Библиографические ссылки**

1. Овчинников В. В. Дефекты сварных соединений. М. : Академия, 2010. 64 с.
2. Мытник А. С. Инспекционный контроль качества сварных соединений [Электронный ресурс]. URL: <http://weldingsite.in.ua/st45.html> (дата обращения: 18.05.2018).

#### **References**

1. Ovchinnikov V. V. Defects of welded joints. M. : Academy, 2010. 64 p.
2. Mytnik A. S. Inspection quality control of welded joints. Available at: <http://weldingsite.in.ua/st45.html> (accessed: 18.05.2018).

© Скачков И. А., Ананьев В. В., Гусев В. Ю., Злобин С. К., Зайцев Р. В., 2018

УДК 629.78.01:620.17

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ВСТАВОК В ЭЛЕМЕНТЫ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

А. А. Стукалов, А. К. Шатров

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

*Доказана эффективность применения закладных вставок. Усилив конструкцию блоковой вставкой можно повысить физико-механические характеристики и снизить массу элементов, что актуально для космической отрасли.*

*Ключевые слова: конструкция, нормальные напряжения, вставка, закладные элементы, масса.*

## EFFICIENCY OF APPLICATION OF THE LATERAL PANELS OF THE CONSTRUCTION ELEMENTS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTION

A. A. Stukalov, A. K. Shatrov

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

*Proved the effectiveness of the embedded inserts. Strengthening the design of the side insert can improve the physical and mechanical characteristics and reduce the weight of the elements, which is important for the space industry.*

*Keywords: design, normal strain, insert, items, weight.*

Современные конструкции в условиях эксплуатации подвергаются разным физическим воздействиям: удар, механическая вибрация, акустические, электромагнитные явления и термические явления, ионизирующее и неионизирующее излучение. Несмотря на высокие прочностные показатели материалов, конструкции из них не всегда удовлетворяют требованиям по массе. Использование блоковых вставок в элементы конструкций позволило увеличить запас прочности, при этом масса конструкций значительно снижается, что очень важно для космической отрасли.

Опыт проектирования конструкций показал, что можно применять не только сплошные, но и многослойные конструкции [1].

Многослойная конструкция – это конструкция, состоящая из трех и более слоев. Роль стенки играет наполнитель, за счет которого разнесены несущие слои, что придает пакету слоев наибольшие нормальные напряжения (рис. 1).

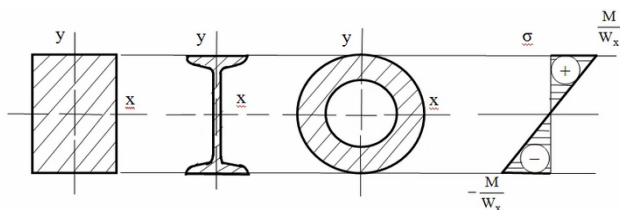


Рис. 1. Распределение нормальных напряжений

Комбинируя материалы несущих слоев и заполнителя можно добиться от конструкции как можно максимальных физико-механических свойств [2]. В случае если вставить вставку в многослойную конструкцию, то можно в разы повысить физико-механические свойства конструкции при относительно малом весе [3].

Рассмотрим раскос авиационной стойки шасси из полимерного композиционного материала, а именно раскоса основной стойки шасси [4]. Раскос представляет собой стержень, соединенный с конструкцией шарнирно.

Полностью из углепластика методом намотки раскос при заданной геометрии не удовлетворяет требованиям по прочности. Фактические напряжения превышают допустимые (рис. 2).

Задача проектирования раскоса решалась при помощи металлической вставки (рис. 2). Вставка обеспечивает прочность на смятие в шарнире и распределяет нагрузку равномернее, чем полностью в углепластиковом варианте.

В результате получилась общая масса конструкции шасси – 34,5 кг. В случае если бы была применена сталь, то масса бы получилась около 60 кг.

Применение закладных элементов в трехслойных конструкциях положительно сказывается на физико-механические характеристики конструкции [5]. Для проведения расчета была представлена КЭМ модель соты с закладным элементом (рис. 3).

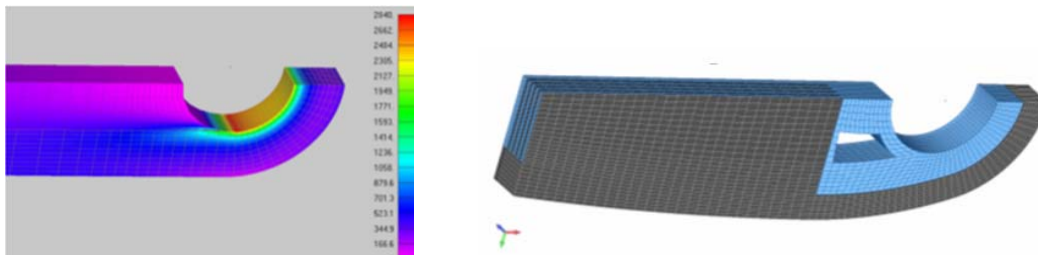


Рис. 2. Нормальные напряжения (МПа) вдоль армирующих волокон и пример вставки

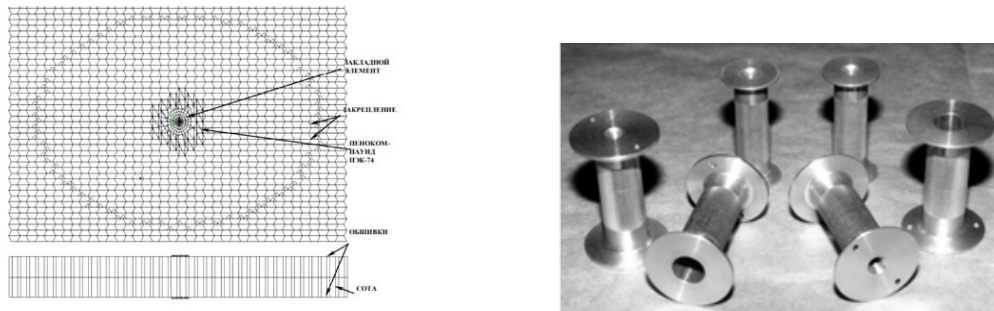


Рис. 3. КЭМ соты с закладным элементом

В результате расчета были получены поля напряжений и перемещений для всех узлов КЭМ закладного элемента.

Из проведенных расчетов видно, использование вставок имеет перспективное значение для конструкций машиностроительных производств. Сотовые конструкции с блоковыми вставками наиболее выгодны по соотношению прочности, жесткости и веса.

Уменьшая массу несущих конструкций, можно увеличить массу полезной нагрузки космических аппаратов.

#### Библиографические ссылки

1. Панин В. Конструкции с сотовым наполнителем. М. : Машиностроение, 1982. 152 с.
2. Ендогур А. Сотовые конструкции: Выбор параметров и проектирование. М. : Машиностроение, 1986. 198 с.
3. Двейрин А. Сотовые конструкции в самолетах АНТК им. Антонова: опыт применения и перспективы. М. : Академия, 2013. 162 с.
4. Разработка конструкции и технологии изготовления высоконагруженных элементов шасси авиационных изделий из полимерных композиционных материалов / В. Н. Вякин, Д. М. Козлов, В. П. Пересыпкин и др. // ИМАШ РАН. 2014. С. 52.
5. Расчет на прочность трехслойной конструкции и закладных элементов / Г. Д. Кесельман, И. И. Зимин, Е. И. Данилов и др. // Конструкции из композиционных материалов. 2006. № 1. С. 6–15.
6. Шендалев Д. О. Исследование напряженно-деформированного состояния сотовой конструкции

с закладными элементами // Тез. Докл. 8 Всерос. науч. конф. с международным участием, посвященной 80-летию академика М. Ф. Решетнева / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2004. С. 98–99.

#### References

1. Panin, V. Design with a honeycomb core. Moscow : Mechanical Engineering, 1982. 152 p.
2. Endogen A. Cell construction: the Choice of parameters and design. Moscow : Mechanical Engineering, 1986. 198 p.
3. Darin A. Cell structure in planes of ANTK im. Antonova: experience and prospects. Moscow : Academy, 2013. 162 p.
4. Design and manufacturing of high-loaded elements of the chassis of aviation products from polymeric composite materials / V. N. Wakin, D. M. Kozlov, V. P. Peresypkin et al. // IMASH. 2014. P. 52.
5. Calculation of the strength of the three-layer structure and embedded elements / G. D. Keselman, I. I. Zimin, E. I. Danilov, et al. // Construction of composite materials. 2006. No. 1. P. 6–15.
6. Sandali D. O. investigation of the stress-strain state of a cellular structure with embedded elements // proc. Doc. 8 vseros. science. Conf. with international participation, dedicated to the 80th anniversary of academician M. F. Reshetnev / under the General editorship of Y. Y. Loginov ; Sib. state aerospace. Univ. of Illinois Krasnoyarsk, 2004. P. 98–99.

© Стукалов А. А., Шатров А. К., 2018



## ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КОММУТАЦИИ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

В. И. Тарасов<sup>1,2</sup>, Б. А. Слабиков<sup>1</sup>, С. П. Крицкий<sup>1</sup>, И. В. Григорьева<sup>1</sup>, Н. Е. Садковская<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Научно-производственное предприятие «Квант»  
Российская Федерация, 129626 г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, 16

<sup>2</sup>Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)  
Российская Федерация, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4  
E-mail: vov1187@yandex.ru

*Рассмотрено влияние ультразвуковой сварки (УЗС) на процесс сборки серебряных токовыводящих контактов (шин) к серебряным контактными площадкам фотопреобразователей (ФП) космического назначения из кремния и арсенида галлия. Описан процесс оценки качества сварного соединения.*

*Ключевые слова: фотопреобразователь кремниевый, арсенид галлия, ультразвуковая сварка, сварное соединение, вакуумный прижим, термоудар.*

## PROGRESSIVE TECHNOLOGIES OF SWITCHING OF PHOTOCONVERTERS OF SPACE APPOINTMENT IN PRODUCTION OF SOLAR BATTERIES

V. I. Tarasov<sup>1,2</sup>, B. A. Slabikov<sup>1</sup>, S. P. Kritsky<sup>1</sup>, I. V. Grigorieva<sup>1</sup>, N. E. Sadkovskaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC „Research and production enterprise „Kvant“  
16, 3rd Mytishchi Str., Moscow, 129626, Russian Federation,

<sup>2</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University)  
4, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russian Federation  
E-mail: vov1187@yandex.ru

*The article shows the effect of Ultrasonic welding (ultrasonic welding) on the process of Assembly of Silver current-carrying contacts (tires) to the silver contact areas of space-purpose Photovoltaics (FP) from silicon and gallium arsenide. The process of quality assessment of welded joint is described.*

*Keywords: silicon photovoltaic, gallium arsenide, ultrasonic welding, welded joint, vacuum clamp, thermal shock.*

Современные предприятия России, специализирующиеся на изготовлении и сборке панелей солнечных батарей космического назначения, сталкиваются с проблемой качества коммутации фотоэлементов с токовыводящими контактами.

Целью данной работы является создание инновационной технологии сварки серебряных контактных шин к серебряному и золотому покрытию контактных площадок фотоэлементов из кремния и арсенида галлия, на предприятии АО «НПП «Квант».

АО «НПП «Квант» специализируется на изготовлении солнечных источников питания, технологии изготовления которых за последнее время мало чем изменились.

В данной работе предусмотрено перевооружение сварочных постов сборочных участков: машины контактной микросварки (МКС) расщепленным электродом заменяются на машины ультразвуковой микросварки (УЗС). При контактной сварке расщепленным электродом, процесс происходит при определенном токе, подающемся на конкретную площадь рабочей части электрода, который имеет пирамидальную форму торца. Для того чтобы не происходило окисления свариваемой зоны, в область рабочей поверхно-

сти электрода подается поддув аргона. При образовании окисной пленки на электроде возрастает сопротивление «электрод–деталь» и, при сварке фотоэлементов, происходит перегрев деталей, в результате чего ухудшается качество адгезии серебряного покрытия на стеклянной подложке или снижаются физические характеристики ФП после сварки. Это происходит из-за термоударов и ряда факторов касающихся установок МКС, так как имеющееся оборудование имеет педальный привод с не полной синхронизацией дозирующего и сложно в обслуживании. Также на качество работы влияет процесс изготовления, хранения и обращения с коммутационными шинами из серебряной фольги 0,03 мм. Во избежание ухудшения свариваемости, серебряные детали в процессе обращения в производстве, должны тщательно охраняться от механических загрязнений и от длительного воздействия сероводорода и других сернистых соединений, находящихся в окружающей атмосфере.

При транспортировке готовой секции с предприятия изготовителя до околоземной орбиты, секция должна отличаться высокой стойкостью соединения при вибрационных и инерционных нагрузках, а при

работе в космосе стойкостью к термоциклированию (от минус 100 °С до плюс 200 °С ежедневно). Изменение физики коммутационного процесса позволит избежать ряда проблем, связанных с производством ФП на предприятии. При УЗС, процент брака существенно ниже, чем при контактной сварке расщепленным электродом, вследствие снижения окислительных процессов на поверхности контактов. Процессы УЗС характеризуются малым потреблением мощности оборудования, меньшей изнашиваемостью электродов [1]. Во время УЗС на поверхности элементов происходит деформация поверхностных пленок, вследствие чего качество диффузии значительно возрастает [2]. Сварка осуществляется в твердой фазе, без существенного нагрева элементов.

Таким образом, эффективность данной работы заключается в уменьшении финансовых и временных затрат при сборке ФП. Переход с машин контактной сварки на УЗС позволит не только повысить стабильность качества сварки и полностью исключить влияние исполнителя, но и осуществит ряд автоматизированных процессов по сборке солнечных батарей.

#### **References**

1. Available at: <http://pereosnastka.ru/articles/ultrazvukovaya-svarka-izdelii-malykh-razmerov> (accessed: 18.05.2018).
2. Available at: <https://www.protehnology.ru/page/mikrosvarka> (accessed: 18.05.2018).

© Тарасов В. И., Слабиков Б. А., Крицкий С. П., Григорьева И. В., Садковская Н. Е., 2018

УДК 629.7

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ КАНТОВАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ МЕХАНИЗМА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С ГИБКИМИ ЗВЕНЬЯМИ

Е. В. Фалькова, Д. А. Климовский, Л. П. Назарова, Е. Н. Фесенко, 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: Klinsky92@yandex.ru

*Большая часть нестандартного оборудования для производства крупногабаритных деталей ракет представляет оснастку для подъема, перемещения, вращения в пространстве. Приводится способ определения положения равновесия кантователя на основе механизма параллельной структуры с гибкими звеньями.*

*Ключевые слова: механизм параллельной структуры, гибкое звено, потенциальная энергия, равновесие.*

## DETERMINATION OF THE EQUILIBRIUM POSITION FOR TILTER BASED ON PARALLEL KINEMATIC MACHINE WITH FLEXIBLE LINK

E. V. Falkova., D. A. Klimovskiy, L. P. Nazarova, E. N. Fesenko, A. L. Vaikus

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: Klinsky92@yandex.ru

*Most non-standard equipment for production of large rocket parts is rigging for lifting, moving and rotation in workspace. The paper considers the method of determining the equilibrium position for tilter based on parallel kinematic machine with flexible link.*

*Keywords: parallel kinematic machine, flexible link, potential energy, equilibrium.*

Кантование – одна из наиболее часто встречающихся операций по изменению пространственного положения изделия в производстве ракетной техники. Это связано с тем, что различные операции по обработке и сборке изделий требуется производить в определенных положениях: вертикально или горизонтально для обечаек, с внутренней или наружной стороны в вертикальном или горизонтальном положении для днищ и камер ДУ.

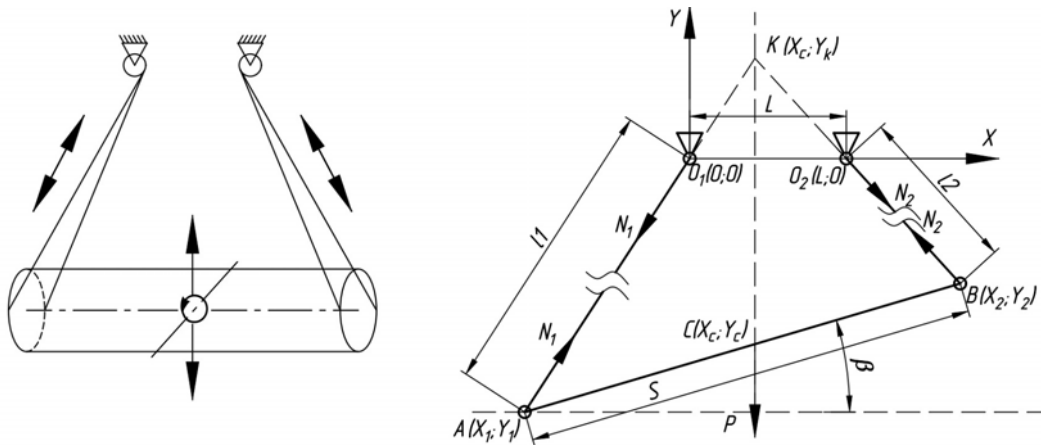
В области ракетостроения представляют интерес механизмы параллельной структуры (МПС) с гибкими звеньями, которые имеют большое рабочее пространство, большой диапазон перемещаемых масс, быстрое разворачивание, низкую металлоемкость конструкции, универсальность [1–4]. Рабочий орган приводится в действие набором гибких звеньев, роль которых выполняют тросы.

Рассмотрим кантователь на основе МПС с гибкими звеньями, изображенный на рисунке, *слева*. Механизм состоит из двух барабанов с приводами, на которые наматывается трос. Совместное изменение длин тросов позволяет перемещать изделие по вертикальной оси и вращать его в вертикальной плоскости. Для корректной работы необходимо, чтобы расстояние между барабанами было меньше длины изделия, и располагались они как можно ближе друг к другу. Это позволит уменьшить горизонтальные перемещения центра масс изделия.

Одна из задач по расчету такого механизма представляет определение положения равновесия по известным положениям барабанов  $O_1$ ,  $O_2$ , текущих длин тросов  $l_1$ ,  $l_2$  и длины изделия  $S$  (расстояние между точками соединения с тросами). Это так называемая прямая задача кинематики. Расчетная схема для решения этой задачи приведена на рисунке, *справа*. Массами тросов пренебрегаем.

В статике существует три способа определения положения равновесия [5]. Первый, наиболее часто используемый, через уравнения равновесия плоской системы сил. Недостаток данного способа заключается в необходимости точно знать массу изделия при расчете, которая может быть переменной в условиях серийного производства. Можно использовать теорему о трех непараллельных силах: если тело под действием трех непараллельных сил, расположенных в одной плоскости, находится в равновесии, то линии действия этих пересекаются в одной точке. Однако, если тросов будет больше, решение не будет смысла. Целесообразно при решении воспользоваться потенциальной энергией. В положении равновесия потенциальная энергия достигает своего экстремального значения (в данном случае минимума). Это условие запишется следующим образом:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial q} = 0.$$



Кантователь на основе механизма параллельной структуры (слева); расчетная схема кантователя (справа)

Система уравнений, описывающих геометрические взаимосвязи, выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} x_1^2 + y_1^2 = l_1^2, \\ (x_2 - L)^2 + y_2^2 = l_2^2, \\ (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 = S^2, \\ \operatorname{tg} \beta = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}. \end{cases}$$

Несмотря на простоту решение этой системы в аналитическом виде затруднительно за счет наличия квадратов у неизвестных величин  $X_1, Y_1, X_2, Y_2$ , что приводит к множеству решений. Поэтому далее будет представлен алгоритм, который может быть использован в любом математическом пакете типа Maple или Mathcad.

Для начала решаем систему уравнений с известными значениями  $l_1, l_2, L, S$ . Получаем зависимости  $X_1 = f(\beta), Y_1 = f(\beta), X_2 = f(\beta), Y_2 = f(\beta)$ . Выражение для координаты  $Y$  центра масс изделия запишется в следующем виде (для упрощения центр масс изделия принимаем в середине, но он может находиться и в другом месте):

$$Y_c(\beta) = \frac{Y_1(\beta) - Y_2(\beta)}{2}$$

Затем решаем уравнение

$$\frac{\partial \Pi}{\partial q} = \frac{\partial Y_c(\beta)}{\partial \beta} = 0$$

Полученное значение  $\beta$ , при котором достигается минимум потенциальной энергии подставляем в исходную систему уравнений и решаем ее с учетом того что  $Y_1 < 0, Y_2 < 0, X_1 < X_2$ .

Освоение новых изделий ракетной и авиационной техники требует внедрение на производстве новых технических решений. Кантователи на основе механизмов параллельной структуры с гибкими звеньями могут стать одним из типов такого оборудования.

#### Библиографические ссылки

1. Климовский Д. А., Смирнов Н. А. Применение тросоуправляемых механизмов параллельной струк-

туры в производстве ракетной техники // Решетневские чтения : материалы XX Междунар. науч. конф. (9–12 ноября 2016, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 35–36.

2. Gosselin C. Cable-driven parallel mechanisms: state of the art and perspectives // Mechanical Engineering Reviews. 2014. Vol. 1, No. 1.

3. Albus J., Bostelman R., Dagalakis N. The NIST Robocrane // Journal of Robotic Systems. 1993. 10 (5). P. 709–724.

4. Tang X. An Overview of the Development for Cable-Driven Parallel Manipulator // Advances in Mechanical Engineering. 2014.

5. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики : учебник для вузов. 10-е изд., перераб и доп. М. : Высш. шк., 1986. 416 с.

#### References

1. Klimovskiy D. A., Smirnov N. A. [Application of cable-driven parallel kinematic machine for production of rocket technics]. Materialy XX Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya" [Materials XX Intern. Scientific. Conf " Reshetnev reading"] Krasnoyarsk, 2016. P. 35–36 (In Russ.).

2. Gosselin C. Cable-driven parallel mechanisms: state of the art and perspectives / Mechanical Engineering Reviews. 2014. Vol. 1, No. 1.

3. Albus J., Bostelman R., Dagalakis N. The NIST Robocrane / Journal of Robotic Systems 1993. 10 (5). P. 709–724.

4. X Tang An Overview of the Development for Cable-Driven Parallel Manipulator / Advances in Mechanical Engineering. Vol. 2014.

5. Targ S. M. Kratkiy kurs teoreticheskoy mekhaniki [A short course of theoretical mechanics]: Ucheb. dlya vtuzov. 10-e izd., pererab i dop. M. : Vissh. shk. 1986. 416 p.

© Фалькова Е. В., Климовский Д. А., Назарова Л. П., Фесенко Е. Н., Вайкус А. Л., 2018

УДК 629.7

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВОСПЛАМЕНИТЕЛЕЙ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В МОДЕЛЯХ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В. А. Финк, Т. А. Чагай, 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: infikrinika@mail.ru

*Проанализированы оптимальные характеристики воспламенительного состава, используемого для поджигания топливной шашки модельного ракетного двигателя, и на основе этого анализа учтены особенности его изготовления, нанесения и плотности забивки в канал.*

*Ключевые слова:* РДТТ, модели ракет, воспламенители.

### INVESTIGATION OF IGNITER USED IN THE MODEL OF SOLID FUEL ENGINES

V. A. Fink, T. A. Chagai, V. V. Kolga

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

*This article analyzes the optimal characteristics of the igniter composition used to ignite the fuel rocket of the model rocket engine and based on this analysis the features of its manufacturing, application and density of piling into the channel are taken into account.*

*Keywords:* solid-propellant rocket, missile models, igniters.

Испытуемый образец воспламенительного состава, называемый часто ВВС-1 используется для поджигания топливной шашки модельного ракетного двигателя (см. рисунок).

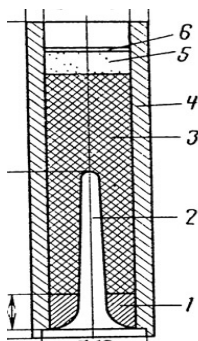


Схема модельного ракетного двигателя:  
1 – сопло; 2 – канал топливной шашки; 3 – шашка; 4 – корпус; 5 – вышибной заряд; 6 – дно

Сама топливная шашка представляет собой цилиндр со сквозным отверстием (каналом) и состоит из «карамельного» топлива, главными компонентами которого являются сорбит, получаемый путем гидрирования глюкозы, а также нитрат калия [1].

Наличие канала и использование воспламенительного состава, а не непосредственное поджигание топливной шашки, обусловлено охватом большей площади горения топлива. Чем больше площадь горения

топлива, тем большее давление создается в камере сгорания, следовательно, больше скорость истечения газов в атмосферу из сопла и, следовательно, больше тяга. Как итог, по средствам использования воспламенителя мы получаем большую скорость модели ракеты в полете, что является одним из важнейших показателей эффективности работы не только двигателя, но и модели в целом.

На 1 см<sup>2</sup> бинта требуется около 0,1 г. исходного сухого состава ВВС-1. Для его изготовления использовались нитрат калия, древесный уголь, сорбит, окись железа в соотношении 75-15-5-5 [2]. В состав ВВС-1, как и в состав самого топлива, также входят нитрат калия и сорбит. И если наличие нитрата калия чаще всего является необходимым, то наличие сорбита наблюдается в немногочисленных воспламенительных составах.

К примеру, в воспламенительном составе, условно получившем название ВВС-3, сорбит отсутствует [3–4]. При этом ВВС-3, главными компонентами которого являются нитрат калия и алюминий, показал себя хуже, чем ВВС-1. В основном это было обусловлено неоднородностью состава, а соответственно трудностями при его равномерном нанесении на поверхность бинта, а также большим по сравнению с ВВС-1 временем прогорания внутри канала. Из этого был сделан вывод о том, что схожесть состава воспламенителя и топливной шашки обеспечивает наибольшую однородность среды, за счет чего процесс прогорания воспламенителя достаточно сокращается.

Также немаловажным фактором является количество слоев бинта, на которые наносится исходный образец (а как следствие, и разная плотность нанесения). В ходе опытов было выяснено, что наибольшей скоростью прогорания в канале обладал образец, нанесенный на наименьшее количество слоев бинта. Это объясняется тем, что при использовании наименьшего количества слоев бинта, а соответственно и наименьшего требуемого количества состава, распределение на бинте происходит равномернее: под этим подразумевается отсутствие скоплений воспламенителя на определенных участках, а также то, что не происходит растрескивания состава при деформациях образца.

При этом стоит уделять отдельное внимание плотности забивки воспламенителя в канал. Плотность забивки в канал может регулироваться либо разным размером использованных полосок нанесенного на бинт воспламенительного состава, либо разным количеством этих полосок: разницы между двумя этими вариантами нет, за исключением того, что при высокой плотности забивки трамбовать несколько полосок сложнее, чем одну, но большего размера. Количество же или размер полосок определяется необходимой для воспламенения канала массой образца. При эксперименте плотность забивки была условно классифицирована как низкая, средняя и высокая. Под низкой плотностью в рамках проводимых опытов понимается использование при трамбовке 2 г в канал диаметром 7 мм и высотой 100 мм, нанесенного на бинт состава. Под средней – 5 г состава, под высокой – 7 г состава.

Исходя из наблюдений, было выяснено, что наименьшее время прогорания состав имеет при средней плотности забивки. Результаты эксперимента приведены в таблице.

По истечению опытов был сделан вывод, что при средней плотности забивки воспламенитель разгорается наиболее равномерно, так как количество воздуха в этом случае оптимально, но при этом количество исходного образца достаточно для того, чтобы состав не прекращал гореть на определенных участках. Таким образом, при средней плотности забивки найден баланс между количеством воздуха и количеством

образца, который обеспечивает наибольшую скорость прогорания топливной шашки.

#### Результаты эксперимента

Количество слоев бинта	Плотность забивки, г/см <sup>3</sup>	Время прогорания, с
2	2	8
	5	6
	7	11
4	2	9
4	5	8
	7	14
6	2	11
	5	9
	7	16

#### Библиографические ссылки

1. Веницкий А. М. Ракетные двигатели на твердом топливе. М. : Машиностроение, 1973. С. 19–20.
2. Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей. М. : Машиностроение, 1980. С. 389–398.
3. Баррер М., Жомотт А., Вебек Б. Ф., Ванденкеркхов Ж. Ракетные двигатели. М. : Оборонгиз, 1962. 141 с.
4. Присняков В. Ф. Динамика ракетных двигателей твердого топлива : учеб. пособие для вузов. М. : Машиностроение, 1984. 248 с.

#### References

1. Vinitzky A. M. Rocket propellants with solid fuel. M. : Mechanical Engineering, 1973. P. 19–20.
2. Alemasov V. Ye., Dregalin A., A., Tishin A. Theory of rocket engines. M. : Mechanical Engineering, 1980. P. 389–398.
3. Barrer M., Zhomotte A., Webek B. F., Vandenkerrkhov G. Missile engines. M. : Oborongiz, 1962. 141 p.
4. Prisnyakov V. F. Dynamics of rocket engines of solid fuel: Proc. manual for universities. M. : Mechanical Engineering, 1984. 248 p.

© Финк В. А., Чагай Т. А., Кольга В. В., 2018

УДК 620.192

## АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ДЕФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ИЗДЕЛИЯХ ПРИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИИ МЕТОДОМ ГАЗОСТАТИЧЕСКОГО ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ

Т. Ю. Худоногова, В. В. Азингареев\*, Н. Г. Слепнева

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
\*E-mail: azingareev@gmail.com

*Рассмотрены особенности различных дефектов, возникающих в изделиях при их изготовлении методом газостатического изотермического прессования.*

*Ключевые слова: газостатическое изотермическое прессование, диффузионная сварка, неразрушающий метод контроля.*

## ANALYSIS OF VARIOUS DEFECTS ARISING IN PRODUCTS IN THEIR MANUFACTURING BY THE TYPICAL METHOD SPACE INDUSTRY

T. U. Khudonogova, V. V. Azingareev\*, N. G. Slepneva

JSC „Krasnoyarsk Machine Building Plant“  
29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
\*E-mail: azingareev@gmail.com

*Features of various defects arising in products when they are manufactured by the method of gas-static isothermal pressing.*

*Keywords: gas-static isothermal pressing, diffusion welding, non-destructive testing method.*

В прикладном отношении газостатическое изотермическое прессование (ГИП) представляет собой технологический процесс, обычно применяемый для компактирования порошковых материалов и устранения дефектов литья. В газостатах также осуществляют пайку и диффузионное соединение деталей из различных материалов. Обязательным условием для осуществления диффузионной сварки в условиях ГИП является изолирование свариваемых поверхностей от рабочей среды, например, за счет помещения деталей в герметичный контейнер, в котором создано разряжение. Это делает процесс сложным и трудоемким.

Однако благодаря присущим этому способу особенностям, диффузионная сварка в условиях ГИП обладает рядом преимуществ, определяющих ее практическую привлекательность. Изостатическое прессование позволяет поместить материал в жидкую или газообразную среду, на которую действует определенное давление, распределяемое равномерно по всей поверхности материала. Таким образом, материал подвергается сжатию по многим направлениям, образуя прессовку, которая обладает формой, аналогичной заготовке, но меньших размеров в зависимости от прессуемого материала, а также от применяемого давления. Эта технология позволяет получать материалы с гомогенной мелкозернистой структурой, без сегрегаций, с высокими прочностными и пластическими характеристиками. Инструментом для осуществления всестороннего объемного сжатия служат

установки горячего изостатического прессования, в котором рабочим телом, передающим всестороннее давление, является инертный газ, обеспечивающий условия барометрического воздействия до 300 МПа и 2 300 °С в течение длительного времени при значительных размерах сосуда высокого давления. Геометрия сварного узла, в частности положения места сварки, может быть выдержана с большой точностью. Размеры свариваемых деталей ограничены только размером рабочего пространства газостата и могут значительно превосходить размеры деталей, которые могут быть сварены на промышленных установках для диффузионной сварки. При необходимости в газостате можно одновременно осуществить сварку такого количества узлов, которое можно разместить в одной садке.

Основными возможностями технологий газостатической обработки являются получение монолитных изделий с высокими свойствами, изотропностью и плотностью, близкой к теоретической, из металлических и неметаллических порошков, заключенных в оболочку, устранение пороков литых заготовок, восстановление ресурса работы деталей, подверженных циклическим нагрузкам, диффузионная сварка однородных и разнородных материалов (в том числе металлов и керамики), получение композиционных материалов (в том числе материалов типа «углерод–углерод»).

Тем не менее, в процессе диффузионной сварки металлов методом ГИП в соединении могут возникать

некоторые типы дефектов. В частности, наибольшее внимание следует обращать на такие дефекты, как «слипание» (отсутствие диффузионного слоя, расслоение), поры и инородные включения, так как данные типы дефектов существенно снижают прочность соединения. Дефекты таких типов могут возникать вследствие нарушений подготовки поверхностей соединяемых элементов или при нарушении условий технологического процесса получения соединения. Размеры данных дефектов могут достигать значительных величин. Отсутствие диффузионного слоя и расслоение приводят к серьезному нарушению прочности соединения и быстрому разрушению изделия.

Дефекты типа «пор» и инородных включений наименее характерны для биметаллических соединений, полученных методом ГИП. Такие дефекты могут быть следствием нарушения технологии получения соединения, в частности, попаданием в область «сварки» инородных объектов либо газов, что приводит к появлению в области диффузионного слоя еди-

ничных либо протяженных несплошностей (пор). Моделирование таких дефектов производят сверлением боковых цилиндрических и плоскодонных отверстий.

Исходя из особенностей процесса получения соединений биметаллических заготовок методом ГИП, дефекты типа «поры» встречаются крайне редко, следовательно, особое внимание при контроле диффузионного слоя соединений «титановый сплав–сталь» необходимо обращать на дефекты типа «слипание».

#### **Библиографическая ссылка**

1. Anderson M. Phased Array Testing: Basic Theory for Industrial Applications // Olympus NDT. 2016.

#### **Reference**

1. Anderson M. Phased Array Testing: Basic Theory for Industrial Applications // Olympus NDT. 2016.

© Худогова Т. Ю., Азингареев В. В.,  
Слепнева Н. Г., 2018



УДК 663.63.0

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОАКТИВАТОРА ВОДЫ С КОАКСИАЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ЭЛЕКТРОДОВ

И. Я. Шестаков\*, Е. Б. Пшенко, В. И. Шестаков

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

*Рассмотрена возможность снижения удельных энергозатрат при получении активированной воды и водных растворов при коаксиальном расположении электродов.*

*Ключевые слова: космический полёт, вода, электрохимический активатор, анолит, католит.*

## INVESTIGATION OF WATER ELECTROACTIVE WITH COAXIAL LOCATION OF ELECTRODES

I. Ya. Shestakov\*, E. B. Pschenko, V. I. Shestakov

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

*Reduction of specific energy consumption in the production of activated water and aqueous solutions with coaxial electrodes.*

*Keywords: space flight, water, electrochemical activator, anolyte, catholyte.*

Во время полётов космонавтов осуществляется прогноз возможных нарушений в состоянии здоровья, оказание при необходимости медицинской помощи. Актуальными проблемами медицины, требующими своего решения, является разработка и создание для будущих орбитальных и межпланетных полётов системы хранения, обеззараживания и трансформации биологических и бытовых отходов [1]. Для лечения космонавтов на борту КА используются средства из бортовой медицинской укладки, в которую входят: анальгетики, сердечные, антиаллергические, желудочно-кишечные, противорвотные, тонизирующие препараты, а также лекарственные средства для первой помощи при ожогах, носовом и ушном кровотечении [2].

По данным Всемирной организации здравоохранения, 80 % заболеваний, в том числе раковые, обусловлены низким качеством питьевой воды [3].

В условиях космического полёта качество питьевой воды особенно актуально. Для систем жизнеобеспечения кораблей и лечения космонавтов предлагается использовать электроактивированную воду и водные растворы.

Первыми создателями электроактивированных растворов стали учёные из Ташкента, возглавляемые академиком С. А. Алёхиным. Медицинское использование электроактивированной воды проверили специалисты Ташкентского центра хирургии под руководством академика В. Вахидова [4; 5].

Было доказано, что щелочная или «живая» вода стимулирует регенеративную функцию клеток, благоприятно воздействует на метаболические процессы,

а кислая «мёртвая» вода представляет собой мягко действующий антисептик.

Было проведено три международных симпозиума по электрохимической активации воды и водных растворов [6; 7]. Электрохимическая активация воды и водных растворов – это технология будущего, которая позволит создать экологически чистое будущее Земли и других планет.

Для получения электрохимически активированной воды и растворов известны такие установки как: СТЭЛ, Аквахлор, Изумруд; проточные модульные элементы – ПЭМ-3, ПЭМ-7, ПЭМ-9; универсальные МБ-11, МБ-26 и др.

Анализ конструкций этих устройств показал, что в качестве электродов применяются плоские металлические пластины, поэтому имеются объёмы воды, которые подвергаются неравномерному электрохимическому воздействию. В результате этого удельные энергозатраты на получение активированной воды значительны и составляют 15–30 Вт·час/л.

Для исследования активатора с коаксиальным расположением электродов было изготовлено устройство с графитовым стержнем шестиугольного сечения. В качестве диафрагмы используется ткань-брезент. Анодом является графитовый стержень, катодом – полый цилиндр из нержавеющей стали.

Для опытов использовался источник постоянного тока Б5-8, цифровой переносной мультиметр МУ67, для определения рН использовали универсальные индикаторные бумаги и иономер Анион-401.

Как показали опыты, значения рН анолита и католита зависят от соотношения объёмов анодного

и катодного пространств ( $V_a/V_k$ ). Максимальная разность рН между анолитом и католитом получается при соотношении  $V_a/V_k = 0,6$ .

Дальнейшие опыты проводились при указанном соотношении объёмов анолита и католита. Для расчёта удельных энергозатрат и рН анолита и католита применяли известные выражения:

$$\text{pH} = -\lg C_{\text{H}^+} = -\lg(C_{\text{H}^+}^0 + \beta \cdot I \cdot \tau / F \cdot V), \quad (1)$$

где  $C_{\text{H}^+}^0$  – начальная концентрация ионов водорода,  $10^{-7}$  г-ион/л;  $\beta$  – выход по току, принимаем равным 1;  $I$  – сила тока, А;  $\tau$  – время активации воды, с;  $F$  – число Фарадея;  $V$  – объём анолита, л.

Для расчёта рН католита использовалось ионное произведение воды, г-ион/л:

$$[C_{\text{H}^+}] \cdot [C_{\text{OH}^-}] = 10^{-14}, \quad (2)$$

Удельные энергозатраты найдены по формуле

$$Q = I \cdot U \cdot t / 0,65, \quad (3)$$

где  $U$  – напряжение на электродах, В; 0,65 – объём активированной воды, л.

Для исследования электроактиватора использовали водопроводную воду, которая находилась в стеклянной открытой ёмкости в течение 8–10 часов. Для приготовления раствора применяли поваренную соль (10 г/л).

Минимальное значение рН анолита равно 1,5, при этом рН католита равно 11,5. Удельные энергозатраты в серии опытов составили от 0,97 до 1,7 Вт·час/л.

Минимальное значение рН анолита равно 2,5, при этом рН католита равно 10. Удельные энергозатраты в серии опытов составляют 10–12 Вт·час/л. По результатам опытов видно, что минимальное время электролиза воды равно 6–7 мин., а водного раствора поваренной соли – 5 мин. Увеличение времени электролиза по сравнению с указанным практически не приводит к изменению рН. Это можно объяснить увеличением диффузии ионов  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$ , так как возрастает их градиент концентрации.

Таким образом, коаксиальное расположение электродов и использование шестиугольного анода в активаторах более предпочтительно, так как удельные энергозатраты снижаются на 25–30 % по сравнению с активатором Эсперо 1. Время электролиза воды не должно быть более 7 мин, а водного раствора поваренной соли более 5 мин. На выше рассмотренный активатор получен патент на полезную модель [8].

Существующие устройства электрохимической активации воды и водных растворов имеют конструктивные недостатки, поэтому имеют повышенные удельные энергозатраты. Разработанный электроактиватор имеет пониженные удельные энергозатраты, что очень важно для космических полётов. Ведущие медицинские университеты и клиники РФ и стран СНГ доказали эффективность применения электроактивированных воды и водных растворов для лечения более пятидесяти заболеваний, для стерилизации оборудования. Вместо тяжёлой медицинской укладки на борту космического корабля достаточно иметь электроактиватор, но для этого нужно исследовать работу устройства в условиях невесомости.

## Библиографические ссылки

1. Ушаков И. Космическая медицина и биология: сегодня и завтра // Медицина экстремальных ситуаций. 2016. № 4. С. 97–104.
2. Газенко О. Г., Григорьев А. И. Космическая биология и медицина. Т. 4. Здоровье. Работоспособность. Безопасность космических экипажей. М. : Наука, 2001. 502 с.
3. Ахманов М. Вода, которую мы пьём. Качество питьевой воды и её очистка с помощью бытовых фильтров. М. : Эксмо, 2006. 192 с.
4. Гроссман Л. Живая вода // Сборник материалов об одном из бесценных даров природы. Минск : Парadox, 1999. 128 с.
5. Ашбах Д. С. Живая и мёртвая вода – новейшее лекарство современности. СПб. □ Питер, 2008. 160 с.
6. Алёхин С. А. Электрохимическая активация // Второй Международный симпозиум. Тезисы докладов и краткие сообщения. Ч. 1. М. : ВНИИМТ. МИС-РТ. 1999. 210 с.
7. Ашбах Д. С. Живая и мёртвая вода против свободных радикалов и старения. М. : АСТ, 2011. 191 с.
8. Шестаков И. Я., Шестаков В. И. Патент на полезную модель № 147543. Опул. 10.11.2014, Бюл. № 31.

## References

1. Ushakov I. [Cosmic medicine and biology: today and tomorrow] // *Meditsinaekstremal'nykhsituatsiy*. 2016. № 4. P. 97–104 (In Russ.).
2. Gazenko O. G., Grigor'ev A. I. *Kosmicheskaja biologija i medicina. Tom 4. Zdorov'e. Rabotosposobnost'.* *Bezopasnost' kosmicheskikh jekipazhej*. [Space Biology and Medicine. Volume 4. Health. Working capacity. Safety of space crews.]. М. : Nauka, 2001. 502 p.
3. Akhmanov M. *Voda, kotoruyu my p'em. Kachestvo pit'evoy vody i ee ochistka s pomoshch'yu bytovykh fil'trov*. [The water we drink. The quality of drinking water and its cleaning with household filters.]. М. : Eksmo, 2006. 192 p.
4. Grossman L. *Zhivayavoda*. [Living water]. Minsk : Paradox, 1999. P. 128.
5. Ashbakh D. S. *Zhivaya i mertvaya voda – novyeshie lekarstvo sovremennosti*. [Living and dead water, the newest medicine of our time.]. SPb. : Peter, 2008. 160 p.
6. Alekhin S. A. [Electrochemical activation]. *Vtoroj Mezhdunarodnyj simpozium. Tezisy dokladov i kratkie soobshhenija*. Ch. 1. М. : VNIIMT. MIS-RT. 1999. 210 p. (In Russ).
7. Ashbakh D. S. *Zhivaya i mertvaya voda protiv svobodnykh radikalov i starenija*. [Live and dead water against free radicals and aging.]. М. : AST, 2011. 192 p.
8. Shestakov I. Ya., Shestakov V. I. *Patent na poleznuyu model'*. [Patent for utility model]. Patent RF № 147543, 2014.



**Секция**

**«КРУПНОГАБАРИТНЫЕ  
ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ»**

## РАЗРАБОТКА ПРЕЦИЗИОННЫХ ПРИВОДОВ ДЛЯ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВКИ ФОРМЫ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ РЕФЛЕКТОРА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА\*

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

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

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

<sup>2</sup>АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

E-mail: antonazin@niipmm.tsu.ru

*Космическая отрасль нуждается в прецизионных пьезоприводах, применение которых существенно снижает массогабаритные показатели исполнительных устройств космических аппаратов. Разработана уникальная конструкция пьезопривода.*

*Ключевые слова: пьезопривод, космический аппарат, колебательная система, физическая модель, точность отражающей поверхности.*

## DEVELOPMENT OF PRECISION DRIVES FOR THE ADJUSTMENT SYSTEMS OF THE SPACECRAFT ANTENNA REFLECTING SURFACE

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

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

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

E-mail: antonazin@niipmm.tsu.ru

*The space industry needs precision piezo drives. The use of piezo drive significantly reduces the weight and overall dimensions of spacecraft actuators. The unique design of the piezodrives is developed.*

*Keywords: piezo drive, spacecraft, oscillatory system, physical model, reflective surface accuracy.*

**Введение.** Анализ современных тенденций развития крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов с вантовой формообразующей системой показывает постоянную необходимость увеличения габаритов антенных рефлекторов и точности настройки отражающей поверхности (ОП) [1–4]. Увеличение размеров и усложнение конструкций рефлекторов приводит к увеличению веса конструкции и усложняет процесс настройки формы ОП.

Для настройки формы ОП рефлектора предлагается использовать автономные натяжители вантовых элементов. Автономный натяжитель состоит из источника питания на основе солнечных батарей, блока управления и прецизионного пьезоэлектрического привода. Пьезоэлектрический привод на основе многослойного пьезопакета обладает рядом преимуществ над остальными типами приводов для применения в условиях космоса: точность позиционирования, стабильность работы при динамическом режиме, развиваемое усилие, температурный диапазон работы, малый вес и габариты.

В НИИ ПММ ТГУ разработаны несколько физических моделей конструкций прецизионного пьезопривода (ПП), работающего в дорезонансном режиме и предназначенных для однонаправленного движения направляющего штока [5]. Конструкция одного ПП типа «Захват» представлена на рис. 1.

ПП типа «Захват» состоит из внешнего корпуса, внутреннего корпуса, подвижного штока, захвата, толкателя, пьезопакета и торцевых щитов ПП. Изначально отверстие захвата выполнено большим диаметром, чем диаметр штока и шток свободно движется в захвате. При расположении корпуса пьезодвигателя относительно корпуса ПП под некоторым углом захват фиксирует шток. Фиксация штока захватом обеспечивает необходимую силу удержания нагрузки. Положительный сигнал управления увеличивает длину пьезопакета, пьезодвигатель перемещает захват и нагрузку, тем самым совершая работу. При снятии сигнала управления пьезопакет сжимается, подвижная система претерпевает переходный процесс возвращения в исходное состояние.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, уникальный идентификатор RFMEFI57817X0257.

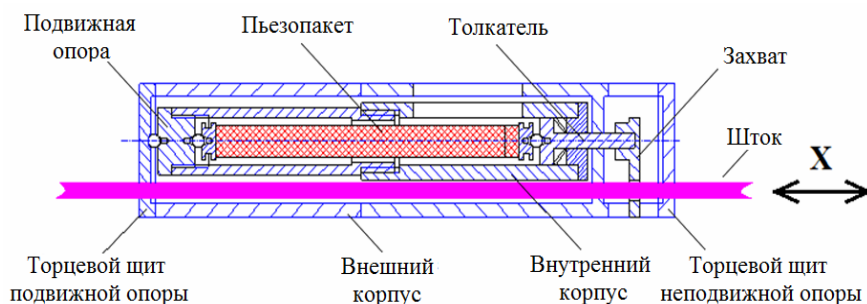


Рис. 1. Эскиз ПП типа «Захват»

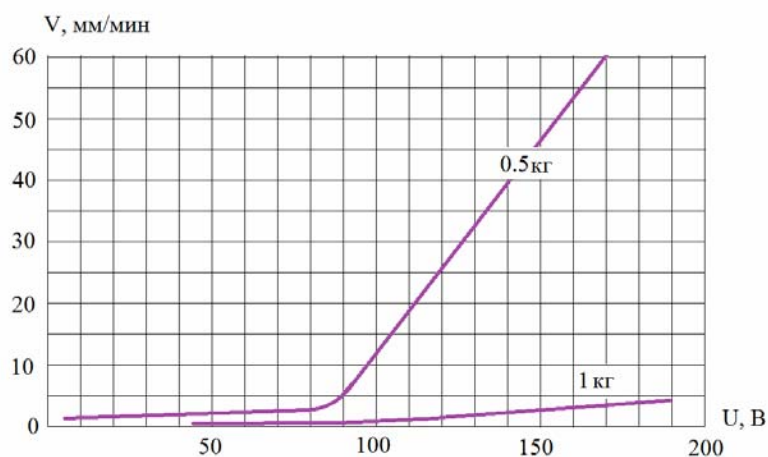


Рис. 2. Экспериментальная зависимость скорости штока от амплитуды управляющего напряжения пьезоупаковочного элемента АПМ-2-22

При этом захват перехватывает шток в новое положение обеспечивая пошаговое перемещение штока со следующим сигналом управления. Процесс реверсивной работы осуществляется в процессе подачи отрицательного сигнала управления на пьезоупаковочный элемент.

Конструкция ПП выполнена таким образом, что единственное место высокой точности находится в зоне захвата штока. Точность изготовления данного соединения – 10 мкм. Основные элементы ПП выполнены из алюминия, сталь применялась для изготовления штока, толкателя и захвата. В конструкции ПП используется пьезоупаковочный элемент АПМ-2-22 фирмы АО «НИИ «Элпа» (Москва). Результаты экспериментальных исследований работы ПП типа «Захват» представлены на рис. 2.

При увеличении амплитуды управляющего напряжения увеличивается скорость движения нагрузки. С ростом нагрузки скорость движения штока снижается и составляет 3–5 мм/мин при весе нагрузки 1 кг.

**Выводы.** Представлена оригинальная конструкция прецизионного пьезопривода типа «Захват», которая имеет ряд существенных преимуществ по сравнению со всеми известными конструкциями пьезоприводов: 1) простота конструкции; 2) высокое значение силы удержания; 3) простота управления в системе один канал управления; 4) возможность применить преобразование энергетических параметров ПП; 5) техно-

логичность изготовления; 6) широкая возможность регулирования скорости.

#### Библиографические ссылки

- Ozawa S. Design concept of large deployable reflector for next generation L-band SAR satellite // The 2nd International Scientific Conference Advanced Lightweight Structures and Reflector Antennas Proceedings (October 1–3, 2014 Tbilisi, Georgia). P. 43–51.
- Nakamura K., Nakamura N. Concept Design of 15m class Light Weight Deployable Antenna Reflector for L-band SAR Application // 3rd AIAA Spacecraft Structures Conference, AIAA SciTech Forum (AIAA 2016-0701, San Diego, USA). Doi: 10.2514/6.2016-0701.
- Zheng F., Chen M. New Conceptual Structure Design for Affordable Space Large Deployable Antenna // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2015. Vol. 63, №. 4. P. 1351–1358. Doi: 10.1109/TAP.2015.2404345.
- Пономарев С. В. Трансформируемые рефлекторы антенн космических аппаратов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2011. № 4(16). С. 110–119.
- Экспериментальные исследования режимов работы физической модели линейного пьезопривода / А. В. Азин, С. В. Пономарев, С. В. Рикконен и др. //

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. С. 59–60.

#### References

1. Ozawa S. [Design concept of large deployable reflector for next generation L-band SAR satellite]. *The 2nd International Scientific Conference Advanced Lightweight Structures and Reflector Antennas Proceedings*. Tbilisi, 2014. P. 43–51.

2. Nakamura K., Nakamura N. [Concept Design of 15m class Light Weight Deployable Antenna Reflector for L-band SAR Application]. *3rd AIAA Spacecraft Structures Conference, AIAA SciTech Forum*. San Diego, 2016. Doi: 10.2514/6.2016-0701.

3. Zheng F., Chen M. New Conceptual Structure Design for Affordable Space Large Deployable Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2015, Vol. 63, No. 4. P. 1351–1358. Doi: 10.1109/TAP.2015.2404345.

4. Ponomarev S. V. [Transformable reflectors of spacecraft]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*. 2011, No. 4 (16), P. 110–119 (In Russ.)

5. Azin A. V., Ponomarev S. V., Rikkonen S. V., Kuznetsov S. A. [Experimental researching modes of physical models of linear piezo drive] *Reshetnevskie chteniya : materialy XXI Mezhdunar. nauch. konf.* Krasnoyarsk, 2017. P. 59–60 (In Russ.)

© Азин А. В., Пономарев С. В., Рикконен С. В.,  
Марицкий Н. Н., Кузнецов С. А., 2018

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОХЛАДИТЕЛЬ ГРУНТА

В. В. Ананьев<sup>1</sup>, В. В. Голованова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО Научно-производственное предприятие «Медгаз»  
Российская Федерация, 121471, г. Москва, Можайское шоссе, 29  
E-mail: vvanord@yandex.ru

<sup>2</sup>ФГУП «КБ «Арсенал» имени М. В. Фрунзе»  
Российская Федерация, 195009, г. Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 1-3  
E-mail: vasilin-a@rambler.ru

*Проведены стендовые испытания агрегатированных термостабилизаторов мерзлого грунта с термоэлектрическим охладителем. Показана работоспособность и сняты тепловые характеристики агрегатов совместно с термосифонами, заполненными фреоном.*

*Ключевые слова: термоэлектрический эффект Пельтье, термостабилизация грунтов, всепогодный термостабилизатор, мерзлые грунты.*

## THERMOELECTRIC COOLER SOIL

V. V. Ananiev<sup>1</sup>, V. V. Golovanova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LLC Scientific-Production Enterprise “Medgaz”  
29, Mozhaiskoye shosse, Moscow, 121471, Russian Federation  
E-mail: vvanord@yandex.ru

<sup>2</sup>Design Bureau “Arsenal” named after M. V. Frunze  
1-3, Komsomol Str., Saint-Petersburg, 195009, Russian Federation  
E-mail: vasilin-a@rambler.ru

*Conducted testing thermal stabilizers packaged frozen ground with a thermoelectric cooler. Shows performance and dropped thermal characteristics of aggregates together with thermosyphon refilled freon.*

*Keywords: thermoelectric Peltier effect, thermostabilization of the ground, the all-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) и рекомендуются [1; 2], как правило, в сочетании с другими охлаждающими устройствами.

Нами были проведены стендовые испытания действующего макета термосифона в комплекте с охлаждающим устройством – термоэлектрическим холодильником с максимальной холодопроизводительностью 200 Вт. с целью получения оценки их работоспособности и теплотехнических характеристик.

Термоэлектрический охладитель (ТЭО) выполнен в виде теплопереходника из алюминиевого сплава с установленными на нем термоэлектрическими модулями Пельтье (15 шт.) размер 40×40×3,6 с максимальной холодопроизводительностью 40 Вт и максимальной разностью температур спаев 62 °С при температуре горячего спаев 27 °С токе 6А и напряжении 15 В. Теплопереходник на скользящей посадке устанавливается на термосифон диаметром 36 мм, на длине 400 мм, заполненный фреоном-22 (200–300 г).

Соединение термомодулей с теплопереходником – механическое, прижимное с пастой 131–178. Горячие спаи термомодулей обустроены алюминиевыми пластинчато-ребристыми радиаторами. Способ термического контакта: прижимной, механический, с пастой 131–178. Обдув радиаторов воздухом осуществляется встроенным вентилятором с мощностью привода менее 100 Вт. Электропитание: постоянный ток до 15 А напряжением до 50 В. Теплоизоляция – стекломаты. Тепловая полезная нагрузка на термосифон создавалась электронагревателем мощностью до 150 Вт. Тепловая нагрузка на теплопереходник осуществлялась электронагревателем, смонтированным на фторопластовом стержне диаметром 36 мм и мощностью 150 Вт.

Испытания проводились в два этапа. Первый этап – полезная нагрузка производилась непосредственно электрическим имитатором на внутреннюю поверхность теплопереходника. Второй этап – полезная нагрузка к теплопереходнику производилась посредством термосифона. Ток на термомодули Пельтье поддерживался – 9А при напряжении 48 В. Температура воздуха – +20...+22 °С. Общая наработка в часах более 100 часов.

На рис. 1 представлены результаты испытаний ТЭО – зависимость полезная тепловая нагрузка – температура на контакте: 1 – термоэлектрический

модуль, 2 – термоэлектрический охладитель – нагреватель эл. нагрузки  $Q$ , 3 – термоэлектрический охладитель – термосифон – нагреватель эл. нагрузки  $Q$ .

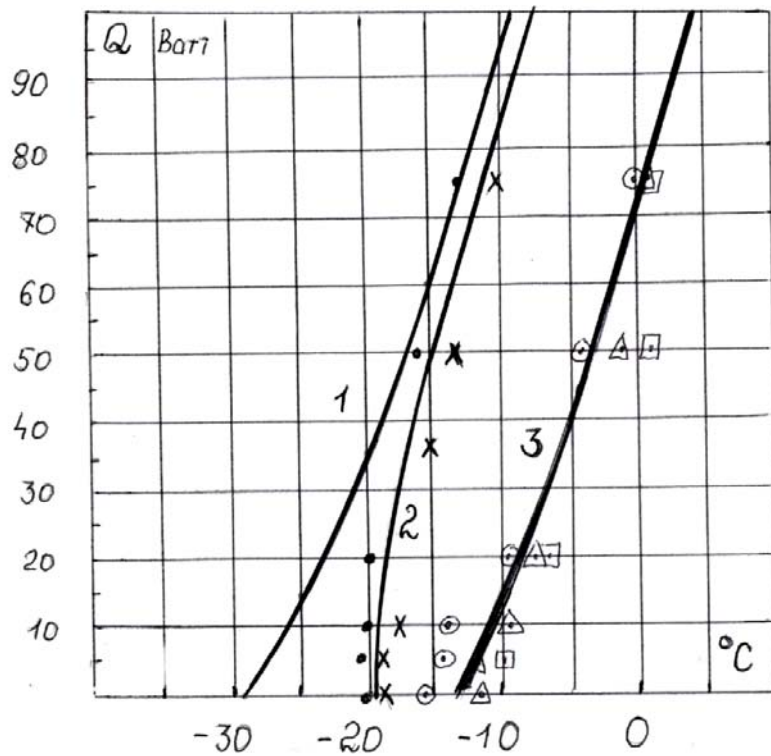


Рис. 1. Зависимость «полезная тепловая нагрузка – температура на контакте» (обозначения см. в тексте)

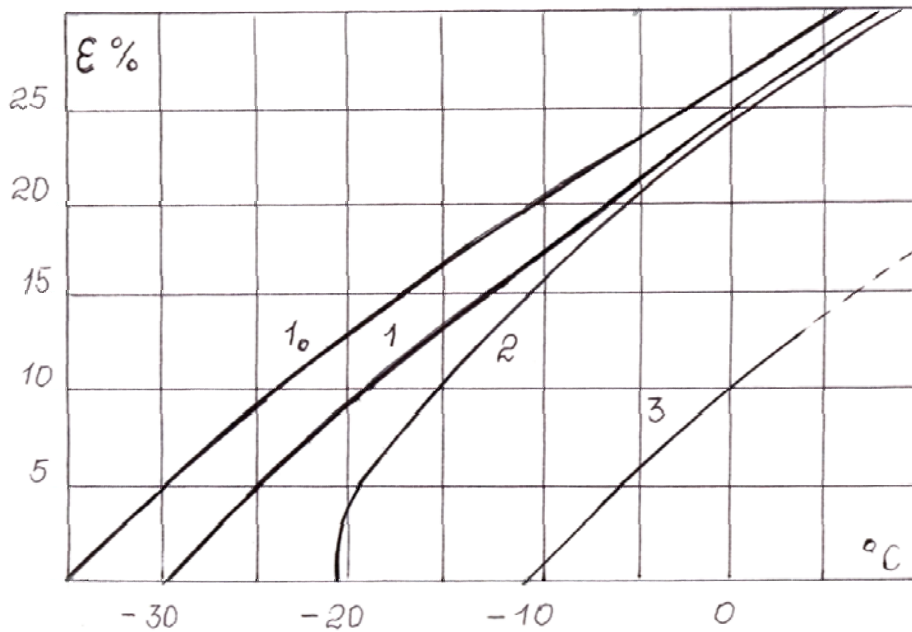


Рис. 2. Зависимость эффективности (холодильный коэффициент) от температуры:  $1_0$  – термоэлектрический модуль  $T_r = 27^\circ\text{C}$ ; 1 – термоэлектрический модуль  $T_r = 37^\circ\text{C}$ ; 2 – термоэлектрический охладитель – нагреватель эл. нагрузки  $Q$ ; 3 – термоэлектрический охладитель – термосифон – нагреватель эл. нагрузки  $Q$



Результаты испытаний коррелируют с известными данными. Величина холодильного коэффициента при непосредственном контакте электрического имитатора нагрузки в диапазоне температур  $-20\dots-10$  °С находится в пределах 5–15 %.

Величина холодильного коэффициента 5 % при  $-6$  °С для данного конструктивного исполнения ТЭО и термосифона (рис. 2, кривая 3) является достаточно оптимистичной и приемлемой.

Проведены стендовые испытания агрегатированных термостабилизаторов мерзлого грунта с термоэлектрическим охладителем. Показана работоспособность и сняты тепловые характеристики агрегатов совместно с термосифонами, заправленными фреоном 22.

#### 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.

#### References

1. Snip 2.02.04–88. Bases and foundations on site soil-Gosstroy of USSR-m.: CИTP Gosstroy of USSR, 1980. 56 p.
2. Thermal properties of rocks. M. : MSU. 1984. 485 p.

© Ананьев В. В., Голованова В. В., 2018

## МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ СЕТЧАТОЙ БАЛКИ ТРЕУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ, ВЫПОЛНЕННОЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. Е. Ануфриенко, Т. С. Васильева, В. В. Скрябин, П. О. Агеев

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

*Описана методика оптимизации параметров сетчатых балок треугольного сечения с целью уменьшения их массы. Сетчатые балки предполагается использовать в рамах силового каркаса солнечных батарей космических аппаратов.*

*Ключевые слова: изогридная балка, методика оптимизации, композитные материалы, космические аппараты.*

## OPTIMISATION METHODS FOR LATTICE PATTERN BEAM WITH TRIANGULAR PROFILE MADE OF COMPOSITE MATERIALS

V. E. Anufrienko, T. S. Vasilyeva, V. V. Skryabin, P. O. Ageev

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: anufrienkove@iss-reshetnev.ru

*Article presents an optimization methods for lattice pattern composite beam with triangular profile to optimize its mass. Lattice pattern beams are probable replacement for composite tubes, which are basic components of spacecraft solar battery frames.*

*Keywords: isogrid beam, optimization methods, composite materials, spacecraft.*

В основе конструкций каркасов солнечных батарей используются балки в виде труб круглого сечения. Балки воспринимают преимущественно изгибающие усилия в одном направлении, поэтому круглое сечение не оптимально с точки зрения массы. Оптимально треугольное сечение, с концентрацией материала в углах [1–2].

Конструкция балки представлена на рис. 1. Балка состоит из продольных стержней 1 и наклонных стержней 2. При этом продольные стержни воспринимают нагрузки изгиба и сжатия балки, а наклонные стержни воспринимают крутящий момент.

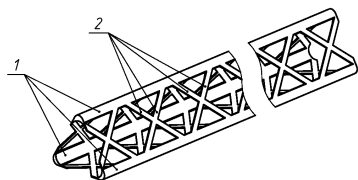


Рис. 1. Конструкция сетчатой балки треугольного сечения

Основные геометрические параметры такой балки представлены на рис. 2.

Оптимизация балки является задачей с множеством неизвестных. Входные:

Строительная высота профиля  $H$ , ограничиваемая толщиной панели БС.

Радиус внешних скруглений профиля  $r$ .

Изгибающие моменты  $M_x, M_y$ , крутящий момент  $M_{кр}$ .

Продольная сжимающая сила  $P$ .

Требуемая жёсткость профиля при изгибе  $EJ_x, EJ_y$ .

Ширина ленты препрега  $b$ .

Толщина ленты препрега  $k$ .

Характеристики материала: модуль упругости  $E$ , предел прочности  $\sigma_b$ , плотность  $\rho$ .

Большое количество переменных затрудняет получение точного аналитического решения. Использование эмпирических формул и методики вычислительного эксперимента для получения опорных данных [3] также затруднено.

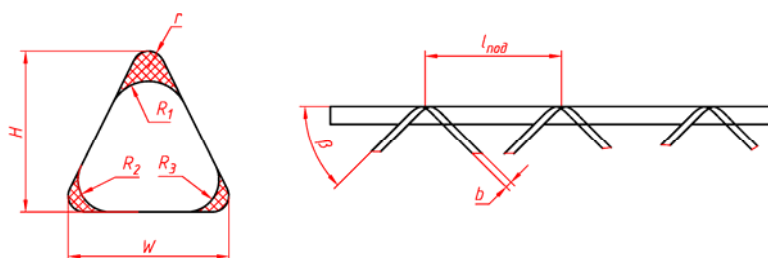


Рис. 2. Основные геометрические параметры сетчатой балки

## Сравнение традиционных труб с сетчатыми аналогами

№	Рабочий изг. момент, Н·м	Труба		Сетчатая балка		Массовое преимущ., %
		Размер, мм	Пог. масса, кг/м	Высота $H$ , мм	Пог. масса, кг/м	
1	76,5	19,5×0,7	0,066	22,5	0,055	16,7
2	123,5	24,7×0,7	0,098	25,7	0,065	33,7
3	214,0	30,4×1,2	0,187	31,8	0,072	61,5

**Последовательность расчёта.**

Расчёт разбит на этапы, принят ряд упрощений. Можно выделить основные этапы:

1. Вычисление площадей сечений продольных стержней  $s_1, s_2, s_3$ . Исходные данные: требуемый момент инерции  $J_x$  и высота профиля  $H$ .

2. Вычисление ширины профиля  $W$  из  $s_1, s_2, s_3, J_y$ .

3. Расчёт максимальных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  в продольных стержнях.

4. Расчёт внутренних радиусов скруглений профиля  $R_1, R_2, R_3$  из  $H, W, r, s_1, s_2, s_3$ .

5. Расчёт моментов инерции сечений продольных стержней  $J_{min1}, J_{min2}, J_{min3}$  [4].

6. Расчёт шага поддержки  $l_{под}$  продольных стержней из условия устойчивости.

7. Задание количества заходов  $n$ , расчёт угла  $\beta$  и пролёта наклонных стержней  $l_b$ .

8. Расчёт усилий в наклонных стержнях  $N_n$ . Для расчёта выполняется временный переход к модели балки со сплошными тонкими стенками вместо наклонных элементов [5].

9. Расчёт требуемой толщины наклонных стержней  $t$  из  $N_n, b, k, l_b$ .

10. Расчёт погонной массы балки.

11. Повтор этапов 7–10 с разными значениями заходов выкладки  $n$ .

12. Повтор этапов 6–11 с уменьшенным шагом поддержки  $l_{под}$ .

13. Повтор этапов 1–12 с увеличенными площадями сечений продольных стержней.

14. Выбор сочетания параметров, обеспечивающих наименьшую погонную массу балки.

15. Расчёт НДС численными методами.

16. Ручная коррекция геометрических параметров при необходимости.

Несмотря на принятые допущения, расчёт позволяет значительно приблизиться к оптимальным параметрам. Численный расчёт на этапе 15 показывает отличия напряжений в пределах 10–15 % от полученного на этапах 1–14. Запас устойчивости продольных стержней в разных случаях составлял от 1,1 до 1,6. Расчёты показывают, что сетчатые балки обладают значительным массовым преимуществом по сравнению с применяемыми (см. таблицу).

**Библиографические ссылки**

1. Каркас панелей солнечных панелей. Патент на полезную модель RU № 156084 U1 / Белоглазов А. П., Кузоро В. И., Асочаков С. Г., Сорокин В. Н. Приоритет 15 мая 2015 г.

2. Бакаенко В. Д., Егоров Д. В. Моделирование сетчатых композитных спиц зонтичных антенн с тре-

угольным поперечным сечением // Решетневские чтения : материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. (10–14 ноября 2015 г., г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2015. С. 68–70.

3. Численное моделирование напряжённо-деформированного состояния треугольных труб сетчатой (изогридной) структуры из углепластика / А. П. Белоглазов, И. В. Слоцов, М. В. Титаренко, В. Л. Чернявский // Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космич. систем акад. М. Ф. Решетнева (08–11 нояб. 2017, г. Красноярск) : в 2 ч. Т. 1. С. 191–193.

4. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3 т. / под ред. И. Н. Жестковой. 8-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1999. 912 с.

5. Работнов Ю. Н. Сопротивление материалов / Государственное издательство физико-математического литературы, 1962. 456 с.

**References**

1. Belolazov A. P., Kuzoro V. I., Asochakov S. G., Sorokin V. N. *Karkas paneley solnechnykh batarey* [Solar battery frame]. Patent RF, No 156084, 2015.

2. Bakaenko V. D., Egorov D. V. [Modeling of lattice pattern spokes with triangular cross-section of umbrella-like antenna]. *Reshetnevskie chteniya : materialy XIX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [19<sup>th</sup> International science and practice "Reshetnevskie chteniya" conference materials]*. Krasnoyarsk, 2015, P. 68–70 (In Russ.).

3. Beloglazov A. P., Slovtsov I. V., Titarenko M. V., Chernyavskiy V. L. [Finite element modeling of stress-strain behavior of lattice pattern composite tubes (isogrid) with triangular cross-section]. *Materialy XXI Mezhdunarodnoy nauch.-pract. konf., posvyashch. pamyati generalnogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M. F. Reshetneva [Materials of 21<sup>st</sup> International science and practice conference in memories of general spacecraft engineer and academician M.F. Reshetnev]*. Krasnoyarsk, 2017, P. 191–193 (In Russ.).

4. Anuryev V. I. *Spravochnik konstruktora-mashinostroyatelya* [Hand-book for mechanical engineers]. 1999, Mashinostroyeniye, 912 p.

5. Rabotnov Yu. N. *Soprotivleniye materialov* [Strength of materials]. 1962, Gosudarstvennoye izdatelstvo fiziko-matematicheskoy literatury, 456 p.

© Ануфриенко В. Е., Васильева Т. С., Скрыбин В. В., Агеев П. О., 2018

УДК 629.13.02/.07

## КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА КОРПУСА МОТОРА-РЕДУКТОРА

А. А. Анциферов, В. В. Двирный

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: antsiferov72@mail.ru

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

*Разработана конструкторская и технологическая часть изготовления корпуса с применением материала, используемого в авиационной промышленности, которая позволит уменьшить затраты на изготовление и механическую обработку, последовательность сборки изделия, ремонтпригодность без полного разбора изделия.*

*Ключевые слова: корпус, литьё под давлением, механическая обработка, конструкция, сборка, изделие.*

## DESIGN AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF THE CASE GEAR MOTOR

A. A. Antsiferov, V. V. Dvirnyy

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: antsiferov72@mail.ru

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: dvirnyi@iss-reshetnev.ru

*The design and technological part of the manufacture of the body using the material used in the aviation industry, which will reduce the cost of manufacturing and machining, the Assembly sequence of the product. Maintainability without a full analysis of the products.*

*Keywords: housing, injection molding, machining, construction, Assembly, product.*

Практически все моторы-редукторы конструктивно позволяют применять их для любого расположения выходного вала в пространстве, в том числе и цилиндрические мотор-редукторы.

На данный момент все моторы-редукторы имеют корпус, изготовленный по стандартной технологии [1]. Моторы-редукторы, как правило, легче альтернативных приводов, состоящие из сборки двигателя и редуктора более компактны, а также процессы их установки и обслуживания значительно упрощены. Данный тип привода имеет широкий спектр применения, в том числе может использоваться и в наземных антеннах параболического исполнения.

Данный тип корпуса спроектирован из конструкционного дюралюминиевого сплава Д19, применяемый в авиационной промышленности, в состав которого входят—от 2 до 5 % Cu, 0,15–2,7 % Mg, 0–1,0 % Mn, до 0,7 % Fe, до 0,7 % Si и небольшие количества цинка и титана в виде примесей.

Корпус имеет универсальную конструкцию, построенную по модульному принципу (см. рисунок). В зависимости от решаемых задач может комплекто-

ваться фланцами под различные типы электродвигателей.

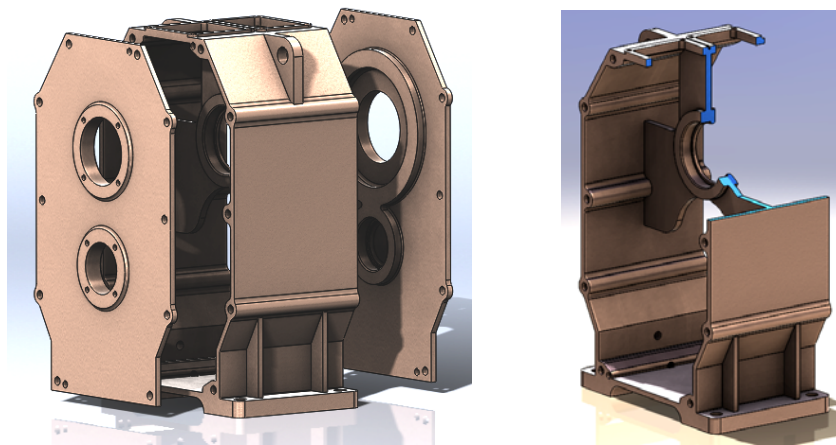
В данном корпусе предусмотрены два смотровых отверстия с крышками, расположенные сверху, что обеспечивает простоту при сборке и настройке привода, а также для заливки масла для смазывания зацепления [5].

Опоры для валов расположены в стенке внутри корпуса. При этом одна опора тихоходного вала расположена внутри корпуса.

Корпус редуктора выполнен с разъёмными торцевыми крышками по осям валов, в плоскости «Х», крышки подшипников привёртываемые.

Технология изготовления корпуса предусматривает литьё под давлением в металлический кокиль. Литьё под давлением повышает прочность материала, обеспечивает получение заготовок, близких по форме к готовой детали, с высокой точностью и шероховатостью поверхности [3].

Это позволяет в последующем минимизировать механическую обработку заготовки корпуса и торцевых крышек.



Корпус с двумя разъёмными крышками и корпус в разрезе

В конструкции изделия предусмотрен возможный метод получения заготовки каждой детали. Так, для литой заготовки из дюралюминиевого сплава Д19, деталь имеет плавное закругление и по возможности одинаковую толщину стенок. При разной толщине стенки обеспечен плавный переход от одной толщины к другой. При конструировании литой детали предусмотрен возможный разъем модели в направлении ее выемки из формы. Форма корпуса имеет простую геометрическую форму.

Трудоёмкость получения заготовок при литье под давлением снижается в 3–8 раз. При этом способе обеспечивается экономия более 35 % металла и создаются условия для применения автоматических и полуавтоматических машин. Повышается производительность труда в 3–4 раза и увеличивается эффективность использования площадей в литейных цехах, не менее чем в 2 раза, снижается на 10–30 % себестоимость отливок [2].

Механической обработке подвергают только посадочные места и поверхности сопряжения [5]. Механическая обработка частей корпуса производится на горизонтальном обрабатывающем центре с ЧПУ типа: ТАЖМАС-ZPS H500.

Расчёт корпуса при приложенных нагрузках на виброустойчивость, механические, динамические воздействия в программе SolidWorks Simulation, SPINCH показал соответствие всем нормам безопасности и прочности, оценивается как хорошее. В некоторых параметрах даже превосходящие параметры нагружения на деформацию.

Суммируя вышеизложенный материал, можно сделать вывод, что впервые применённая конструкция корпуса с разъёмными торцевыми крышками по вертикали, способствует применению унифицированных изделий типа: вал, зубчатое колесо и т. д. в случае их выхода из строя и быстрой замене, не прибегая к полной разборке привода.

Технология изготовления и механическая обработка корпуса снижает затраты и увеличивает экономию предприятия.

### Библиографические ссылки

1. Технология машиностроения. Нормирование сборочных операций : метод. указания / сост. В. Е. Авраменко. Красноярск : КГТУ, 1988. 48 с.
2. Балакшин Б. С. Теория и практика технологии машиностроения // Избр. тр. В 2 кн. / ред. Б. М. Базров. М. : Машиностроение, 1982. Кн. 1: Технология станкостроения. 1982. 239 с.
3. Беккер М. Б. Литье под давлением. М. : Машиностроение, 1990. 440 с.
4. Технология машиностроения (спец. часть) : учебник / А. А. Гусев, Е. Р. Ковальчук, И. М. Колесов и др. М. : Машиностроение, 1986. 480 с.
5. Дунаев П. Ф., Леликов О. П. Конструирование узлов и деталей машин : учеб. пособие для студ. 12-е изд., стереотип. М. : Академия, 2009. 496 с.

### References

1. Technology of mechanical engineering. Normalization of Assembly operations. Guidelines for course and diploma design / Comp. V. E. Avramenko. Krasnoyarsk : KSTU CPI, 1988. 48 p.
2. Balakshin B. S. Theory and practice of mechanical engineering technology: Selected works. Tr. In 2 vol. / Ed. B. M. Bazrov. M. : Mechanical Engineering, 1982. Kn. 1: machine tool Technology: scientific publication. 1982. 239 p.
3. Becker M. B. Diecasting. Mechanical Engineering, 1990. 440 с.
4. Technology of mechanical engineering (special part): Textbook for engineering specialties of universities / A. A. Gusev, E. R. Kovalchuk, I. M. Kolesov et al. M. : Mechanical engineering, 1986. 480 p.
5. Dunaev P. F., Lelikov O. P. Design of units and details of machines: textbook. textbook for students. Higher studies. Institutions. 12th ed., erased. M. : Academy, 2009. P. 496.

УДК 62-1/-9

## СИСТЕМА ВЫВЕСОК ДЛЯ РАСКРЫТИЯ ПАНЕЛЕЙ БАТАРЕЙ СОЛНЕЧНЫХ В УСЛОВИЯХ ГРАВИТАЦИИ ЗЕМЛИ

Е. И. Баданин\*, А. И. Лавриненко

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
\*E-mail: jeck26.90@mail.ru

*Для исключения отказов в полете, за счет обнаружения возможных ошибок конструирования и сборки, во время наземных экспериментальных испытаний особое внимание уделяется испытаниям конструкций, не способных поддерживать собственный вес в условиях земной гравитации, например, механических устройств батарей солнечных (МУБС).*

*Предложена система вывесок, которая обеспечивает имитацию невесомости МУБС космического аппарата (КА) на специализированном стенде, состоящем из силового каркаса и комплекта оборудования для отслеживания перемещения центра масс (ЦМ) батареи солнечной (БС).*

*Ключевые слова: экспериментальные испытания, механизмы раскрытия, земная гравитация, механические устройства, имитация невесомости, батарея солнечная.*

## SYSTEM OF SIGNBOARDS FOR DISCLOSING OF PANELS OF BATTERIES SOLAR IN THE CONDITIONS OF GRAVITATION OF THE EARTH

E. I. Badanin\*, A. I. Lavrinenko

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
\*E-mail: jeck26.90@mail.ru

*For an exception of refusals in flight, at the expense of detection of possible errors of designing and assemblage, during land experimental tests, the special attention is given to tests of the designs, not capable to support a body weight in the conditions of terrestrial gravitation, for example, mechanical devices of batteries solar.*

*The system of signboards which provides imitation of weightlessness mechanical devices of batteries solar of a space vehicle at the specialized stand, consisting of a power skeleton and the complete set of the equipment for tracing of moving of the center of weights of the battery solar (БС) is offered.*

*Keywords: experimental tests, disclosing mechanisms, terrestrial gravitation, mechanical devices, weightlessness imitation, the battery solar.*

**Введение.** Устройство КА представляет собой совокупность сложных систем, от работы каждой из которых зависит выполнение КА своих задач [1]. На заводе-изготовителе все системы спутника испытывают в отдельности, затем испытания проходит весь КА.

Механические испытания КА, служат для подтверждения механической стойкости конструкции и качества сборки спутника путем механических воздействий, которые проводятся на специальных стендах. Одним из видов испытаний механических устройств являются испытания функционирования БС в условиях воздействия гравитации Земли [2].

**Постановка задачи.** Система вывесок должна обеспечивать обезвешивание составных элементов крыла БС, с учетом положения центров масс, на всей траектории раскрытия МУБС в рабочее положение.

МУБС предназначены для перевода панелей с фотопреобразователями (ФП) из транспортировочного положения в рабочее, для приведения спутника в рабочую конфигурацию на орбите [4].

Конструкция БС состоит из следующих элементов: штанга, рама и панели с ФП, соединённые между собой шарнирными узлами (ШУ).

Логика раскрытия штанги и панелей крыла БС с 1 по 5 этапы показаны на рис. 1.

**Выводы.** Используя наработки в области существующих систем для имитации невесомости необходимо:

– обеспечить раскрытие БС с боковыми панелями в конструкции на специализированном стенде состоящего из силового каркаса (портал) и комплекта следящего оборудования;

– система вывесок должна быть пригодна к использованию для раскрытия крыла БС, как с системой синхронизации, так и без нее;

– система вывесок должна исключить влияние весовой составляющей звеньев БС на срабатывание ШУ БС, для обеспечения раскрытия с моментом силы на ШУ корневом – 11,5 кгс·см, и на пружине – 2,3 Н·м.

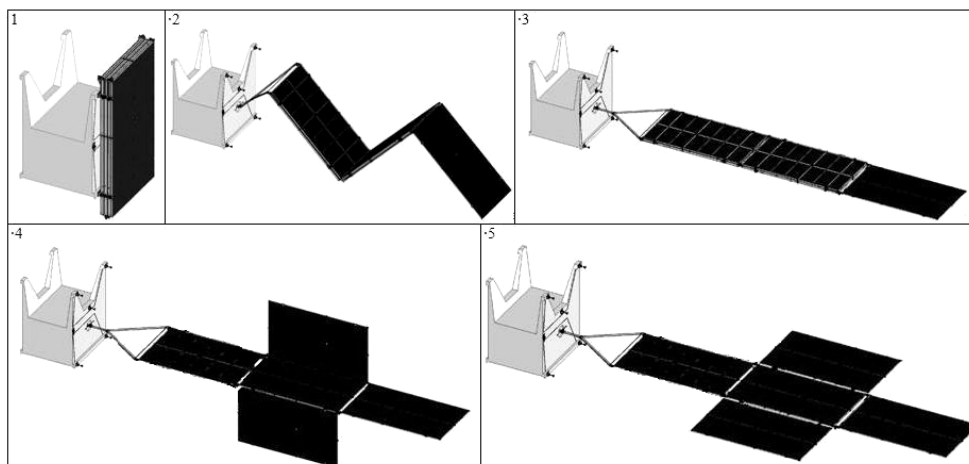


Рис. 1. Логика раскрытия крыла БС с устройством синхронизации

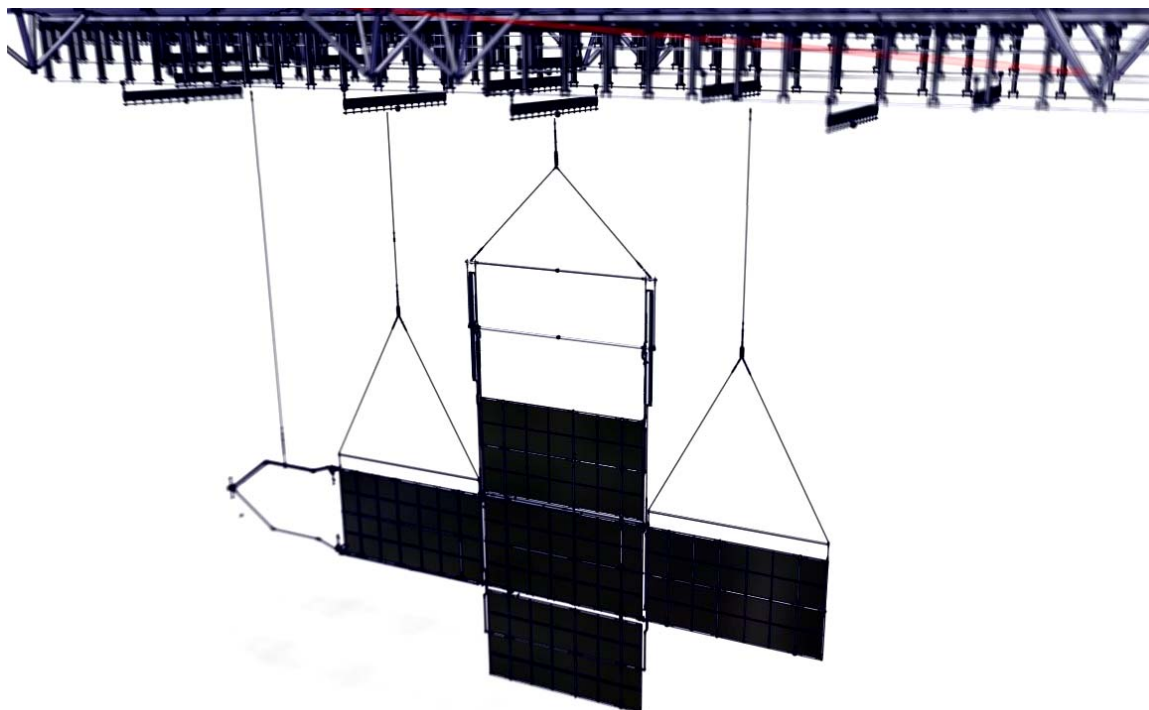


Рис. 2. Общий вид системы вывесок в составе специализированного стенда для раскрытия панелей БС в условиях гравитации Земли

**Анализ.** В результате проведенного анализа существующих систем (стойчного типа) для механических испытаний панелей БС, были выявлены следующие недостатки:

- невозможность проводить испытания на панелях БС с устройством синхронизации и состоящим более чем из 3-х панелей;
- большая масса поворотных балок ( $m = 5 \dots 10$  кг);
- высокий момент сопротивления раскрытию, от собственного момента инерции балок, и как следствие трудоемкость проведения работ по раскрытию;
- невозможность раскрытия боковых панелей.

Следует отметить, что выявленные недостатки относятся к системам со ступенчатой логикой рас-

крытия и системам с возможностью продольно-поперечного перемещения точки подвеса. Так же существуют системы, в которых применен метод обезвешивания панелей БС с помощью воздушных (гелиевых) шаров [3; 5]. Данный метод возможен и достаточно удобен при обезвешивании элементов КА простой конфигурации и малых масс, но, не универсален и трудоемок при обезвешивании крыла БС.

**Устройство системы вывесок в составе специализированного стенда.** В состав специализированного стенда с системой вывесок (рис. 2) входит оборудование для отслеживания перемещения центра масс и имитации невесомости крыла БС, которое представляет собой линейку П-образных кронштейнов, на ко-

торых закрепляются продольные направляющие посредством крепежных элементов, позволяющих обеспечить параллельность, прямолинейность и горизонтальность направляющих. Продольные направляющие монтируются в четырех горизонтальных плоскостях (ярусах) попарно, кроме верхней направляющей, смонтированной по центру линейки п-образных кронштейнов.

По двум направляющим на каждом ярусе перемещаются в продольном направлении по 4 каретки, кроме верхнего яруса, где каретка имеет другую конструкцию и перемещается по одной направляющей. На каждой из кареток, кроме верхних, имеется поперечная направляющая и перемещающаяся по ней каретка, конструкция которой аналогична конструкции верхних кареток.

К кареткам закрепляется система вывесок, в состав которой входят траверсы, талрепы, пакеты пружин и беспроводные датчики силы, с помощью которых обеспечивается имитация невесомости элементов крыла БС, регулировка и контроль положения БС.

Каретки, к которым крепится система вывесок, определяются в зависимости от количества элементов крыла БС, порядка и траектории их раскрытия.

Запасы безопасности определяются по формуле [5; 6]

$$\eta = \left( \frac{[\sigma]}{\sigma_p} - 1 \right) \cdot 100 \%,$$

где  $[\sigma]$  – допускаемое значение напряжений;  $\sigma_p$  – вычисленное значение напряжений, при прикладывании расчетных значений нагрузок.

Запас безопасности должен быть более следующих величин:

- 10 % по пределу текучести;
- 25 % по пределу прочности;
- 100 % от потери устойчивости в упругой области.

Для элементов конструкций, выполненных из композиционных материалов, запас безопасности определяется по разрушению первой пряди.

**Заключение.** Предложенная система вывесок позволяет:

- контролировать, с помощью датчиков, компенсацию весовой составляющей каждого элемента крыла БС (перевод из транспортировочного в рабочее положение) на всех этапах, в нормальных условиях, на траектории раскрытия БС КА.
- свести к минимальным значениям влияние весовой составляющей звеньев крыла БС (упругие колебания пружинных подвесов, от перемещения звеньев, на этапе раскрытия) на моменты сил пружинных приводов над силами сопротивления раскрытию

в каждом ШУ не более чем в 2 раза на всем угле раскрытия и не более чем в 3 раза в момент начала движения.

Использование разработанной универсальной системы вывесок позволяет производить работы по раскрытию панелей БС, как с устройством синхронизации, так и без него.

#### Библиографические ссылки

1. Академик Михаил Федорович Решетнев / А. Г. Козлов [и др.] ; Науч.-произв. об-ние прикл. механики. Железногорск, 2006. 334 с.
2. Суайнерд Г., Старк Д. Разработка систем космических аппаратов : пер. с англ. / под ред. П. Фортекью. М. : Альпина Паблишер, 2015. 765 с.
3. Дебда Д. Е., Пятибратов Г. Я. Проблемы создания комбинированных систем компенсации силы тяжести объектов обезвешивания. Новочеркасск : ЮРГТУ, 2000, 32 с. Деп. в ВИНТИ 16.02.2000, № 396-V00.
4. Графодатский О. С., Исляев Ш. Н. Взаимодействие спутников связи с окружающей средой. Томск : РАСКО, 1933. 208 с.
5. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения. Красноярск, 2011. 487 с.
6. Вентцель Е. С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. 2-е изд., стереотип. М. : Наука, 1988. 208 с.

#### References

1. Academician Michael Fedorovich Reshetnev / A. G. Kozlov et al. ; Research-and-production association of applied mechanics. Zheleznogorsk, 2006.
2. Suajnerd G., Stark D. Razrabotka sistem kosmicheskikh apparatov: per. s angl. / pod red. P. For-tesk'ju, M. : Al'pina Pablisher, 2015. 765 s.
3. Debda D. E., Pjatibratov G. Ja. Problems of creation of the combined systems of indemnification of a gravity of objects обезвешивания. Novocherkassk : ЮРГТУ, 2000, 32 с. Деп. In ВИНТИ 16.02.2000, № 396-V00.
4. Grafodatsky O. S., Isljaev S. N. Interaction of communication satellites with environment. Tomsk : RASCO Publ., 1933.
5. Tchebotaryov V. E., Kosenko V. E. Bases of designing of space vehicles of a supply with information. Krasnoyarsk, 2011.
6. Venttsel E. S. Research of operations. Problems, principles, methodology. 2 edition. Moscow, the Science, 1988.

© Баданин Е. И., Лавриненко А. И., 2018



## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА В КОНСТРУКЦИИ ХОЛОДИЛЬНИКА-ИЗЛУЧАТЕЛЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

А. П. Белоглазов<sup>1\*</sup>, А. Г. Еремин<sup>1</sup>, М. А. Ладыко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Ниагара»

Российская Федерация, 119049, г. Москва, ул. Донская, 6/2

<sup>2</sup>Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)

Российская Федерация, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4

\*E-mail: niagara-mos@inbox.ru

*Цель работы – исследование возможности использования углеродного материала в конструкции теплоотводящих панелей холодильника-излучателя космического аппарата. Рассмотрен вариант использования процесса пайки для обеспечения теплового контакта между теплопроводным углеродным полотном и нержавеющей сталью.*

*Ключевые слова: углеродное полотно, нержавеющая сталь, холодильник-излучатель, космический аппарат.*

## POSSIBILITY RESEARCH OF USING CARBON MATERIAL IN THE DESIGN OF SPACECRAFT RADIATOR

A. P. Beloglazov<sup>1\*</sup>, A. G. Eremin<sup>1</sup>, M. A. Ladyko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО “Niagara”

6/2, Donskaya Str., Moscow, 119049, Russian Federation

<sup>2</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University)

4, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russian Federation

\*E-mail: niagara-mos@inbox.ru

*The work purpose – possibility research of using carbon material in the design of radiator heat transfer panels of spacecraft. The variant of using the soldering process to ensure thermal contact between the heat-conducting carbon weave and stainless steel is considered.*

*Keywords: carbon weave, stainless steel, radiator, spacecraft.*

Неотъемлемой частью космического аппарата является, так называемый, холодильник-излучатель, обеспечивающий отвод тепла от функционирующих на спутнике приборов, либо отвод непретворенного тепла в случае наличия на космическом аппарате энергетической установки [1]. В конструктивном плане он представляет собой излучающую поверхность, выполненную в зависимости от температуры из алюминия, бериллия или меди. Выбор этих материалов обусловлен их хорошей теплопроводностью, обеспечивающей снижение числа подводимых к ним тепловую энергию элементов, в качестве которых могут выступать проточные трубки с теплоносителем, либо тепловые трубы.

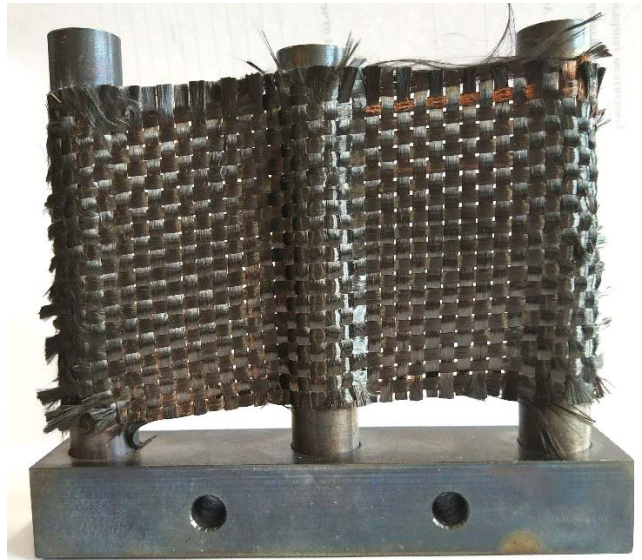
Излучающие площади холодильников-излучателей могут достигать сотен квадратных метров, что ставит актуальным вопрос снижения их массы. Широкое применение композиционных материалов в космической технике мотивировало работу по изучению возможности замены металлических излучающих поверхностей на углеродный композиционный материал [2].

Одним из основных вопросов, стоящих при реализации этой идеи, состоял в обеспечении контакта ме-

жду углеродным полотном и трубкой, выполненной, как правило, из нержавеющей стали. Контакт должен обеспечивать надежную механическую связь между трубкой и углеродным материалом во всем рабочем диапазоне температур и обладать минимальным термическим сопротивлением [3]. Решение этой задачи может быть реализовано путем применения в качестве материала излучающей поверхности – теплопроводного углеродного полотна и пайки его к нержавеющей трубке.

Исследования этих вопросов проводилось в несколько этапов. Первоначально изучалась возможность припайки углеродного волокна к нержавеющей пластине. Положительный результат позволил перейти к пайке углеродного волокна к трубкам. В результате был изготовлен макет элемента холодильника-излучателя, состоящий из трех трубок, припаянных к углеродному полотну (см. рисунок).

Следующий этап состоял в пайке труб к теплопроводному и, соответственно, высокомодульному углеродному волокну. В процессе этих работ выяснилась практическая невозможность такого полотна огибать трубку диаметром 20 мм для обеспечения большего контакта.



Углеродное полотно, припаянное к трубкам из нержавеющей стали

Технологическими приемами была достигнута необходимая прочность соединения высокомодульного углеродного волокна с трубкой из нержавеющей стали. Прочность соединения была подтверждена вибрационными испытаниями. Разработанная технология позволила далее изготовить макет элемента холодильника-излучателя. В настоящее время проводятся работы по изучению температурного поля этого макета.

В процессе работ по изготовлению макета элемента холодильника-излучателя из высокомодульного теплопроводного материала выявлен ряд технологических сложностей, которые могут возникнуть при изготовлении полномасштабных макетов холодильника-излучателя, которые требуют дополнительных исследований. Однако положительный эффект, достигаемый от внедрения углеродного теплопроводного материала в конструкцию холодильника-излучателя космического аппарата, делает необходимым продолжения этих работ в полном объеме.

#### Библиографические ссылки

1. Романов А. В. Системы обеспечения тепловых режимов герметичных отсеков и ядерных энергетических установок космических аппаратов : учебник. СПб. : ФГУП «КБ «Арсенал» им. М. В. Фрунзе», Балт. гос. техн. ун-т «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, СПб. : отд-ние Акад. космонавтики РФ им. К. Э. Циолковского, 2014. 248 с.

2. Андреев П. В., Еремин А. Г., Федоров М. Ю. Применение композиционных и керамических материалов в силовых элементах конструкции космических ядерных энергоустановок // Вестник МАИ. 2012. Т. 19, № 2. С. 106–111.

3. Tomboulian, Briana N. Lightweight, High-Temperature Radiator for In-Space Nuclear-Electric Power and Propulsion (2014). Doctoral Dissertation. May 2014. 247.

#### References

1. Romanov A. V. *Sistemy obespecheniya teplovykh rezhimov germetichnykh otsekov i yadernykh energeticheskikh ustanovok kosmicheskikh apparatov* [Systems of ensuring the thermal regime of the sealed compartments and the nuclear power plants of spacecraft]. St. Petersburg, 2014, 248 p.

2. Andreev P. V., Eremin A. G., Fedorov M. Yu. [The use of composite and ceramic materials for constructing of high-load elements of nuclear space power systems]. *Vestnik MAI*. 2012, Vol. 19, No. 2, P. 106–111 (In Russ.)

3. Tomboulian, Briana N. *Lightweight, High-Temperature Radiator for In-Space Nuclear-Electric Power and Propulsion* (2014). Doctoral Dissertation. May 2014. 247.

© Белоглазов А. П., Еремин А. Г., Ладыко М. А., 2018

УДК 629.7.018.4:620.178.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ВЫЯВЛЕНИЯ ТРЕЩИН ПО ПОРТРЕТАМ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

В. А. Бернс<sup>1,2</sup>, Е. П. Жуков<sup>1\*</sup>, Е. А. Лысенко<sup>3</sup>, В. В. Маленкова<sup>1,2</sup>, П. А. Лакиза<sup>2</sup><sup>1</sup>Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С. А. Чаплыгина  
Российская Федерация, 630051, г. Новосибирск, ул. Ползунова, 21<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет

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

<sup>3</sup>АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

\*E-mail: zh-ep@yandex.ru

*Проведены параметрические исследования чувствительности способа выявления трещин в металлических элементах конструкций летательных аппаратов по искажениям портретов вынужденных колебаний.*

*Ключевые слова: летательный аппарат, разрушение, вибродиагностика, портрет колебаний, нелинейные искажения.*

## RESEARCH ON THE CRACK DETECTION METHOD BY THE FORCED VIBRATIONS PORTRAITS

V. A. Berns<sup>1,2</sup>, E. P. Zhukov<sup>1\*</sup>, E. A. Lysenko<sup>3</sup>, V. V. Malenkova<sup>1,2</sup>, P. A. Lakiza<sup>2</sup><sup>1</sup>Siberian Aeronautical Research Institute named after S. A. Chaplygin  
21, Polzunov Str., Novosibirsk, 630051, Russian Federation<sup>2</sup>Novosibirsk State Technical University

20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation

<sup>3</sup>JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems

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

\*E-mail: zh-ep@yandex.ru

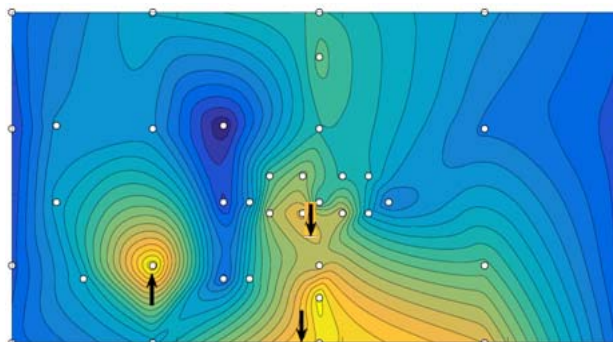
*Parametric studies on the sensitivity of the crack detection method in the metal elements of the airplane structures by the forced oscillations portraits distortions are carried out.*

*Keywords: airplane, fracture, vibration-based diagnostics, oscillation portrait, harmonic distortion.*

**Введение.** В процессе наземной экспериментальной отработки космических аппаратов в результате воздействия вибрационных и акустических нагрузок в элементах конструкции аппаратов могут возникать усталостные трещины [1; 2]. Для диагностирования трещин перспективными являются вибрационные методы, практическая реализация которых применительно к реальным конструкциям является актуальной задачей [3–5].

**Метод исследований.** На диагностируемую конструкцию устанавливались датчики ускорений, и с помощью независимых источников гармонических вибраций в ней создавались вибрационные колебания, которые фиксировались датчиками ускорений. Динамическим проявлением усталостной трещины являются соударения «берегов» и сухое трение в вершинах трещины под действием вибрационной нагрузки. В [6] показано, что идентификационным признаком ударных импульсов и сухого трения могут являться нелинейные искажения портрета колебаний, вертикальная развертка которого пропорциональна сигналу датчика ускорений, а горизонтальная – первой гармонике этого сигнала. Для численной оценки искажений

из ряда Фурье для портрета колебаний вычиталась первая гармоника, в остатке ряда определялся абсолютный максимум за период колебаний. Полученная величина нормировалась и обозначалась как  $\xi$ . Строилось поле распределения этого параметра по поверхности конструкции, и местоположения трещин определялись по положениям датчиков, величины  $\xi$  которых имеют локальные максимумы (см. рисунок, стрелками отмечены положения трещин).

Поле распределения параметра  $\xi$

**Результаты и обсуждения.** Эффективность обнаружения усталостных трещин по искажениям портретов колебаний проиллюстрирована на примере диагностирования металлической панели. Панель имела продольный и поперечный силовые наборы, а также местные подкрепления. Проведены экспериментальные исследования изменений портретов колебаний при появлении трещин в различных элементах панели на разных этапах развития. Установлено, что максимальные искажения портретов колебаний составляют сотни процентов и достоверно отслеживают расположения дефектов и их величины. Разработаны программы обработки результатов экспериментов, позволяющие устранить влияние начального состояния панели и проследить за развитием каждого дефекта в отдельности.

Параметрические исследования чувствительности предложенного метода выявления трещин показали, что увеличение амплитуды колебаний панели приводит к стабилизации качественной картины распределения локальных максимумов параметра  $\xi$ , и положения максимумов соответствуют местоположениям дефектов. Отмечено, что способ нормирования искажений портретов колебаний оказывает влияние на эффективность диагностирования трещин.

#### Библиографические ссылки

1. Экспериментальная отработка космических летательных аппаратов / В. А. Афанасьев, В. С. Барсуков, М. Я. Гофин и др. ; под ред. Н. В. Холодкова. М. : Изд-во МАИ, 1994. 412 с.
2. Выявление дефектов космических аппаратов в процессах испытаний на вибрационные и акустические воздействия в испытательной лаборатории / В. И. Халиманович, А. К. Шатров, Е. А. Лысенко и др. // Вестник СибГАУ. 2005. № 6. С. 174–178.
3. Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review / S. W. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime, D. W. Shevitz // Technical Report LA-13070-MS. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM. 1996. 132 p.
4. Dilena M., Morassi A. Damage detection in discrete vibrating systems // Journal of Sound and Vibration. 2006. Vol. 289. P. 830–850. Doi: 10.1016/j.jsv.2005.02.020.

5. Perera R., Fang S.-E., Huerta C. Structural crack detection without updated baseline model by single and multiobjective optimization // Mechanical System and Signal Processing. 2009. Vol. 23, Iss. 3. P. 752–768. Doi: 10.1016/j.ymssp.2008.06.010.

6. Диагностирование трещин в металлических панелях по нелинейным искажениям портретов колебаний / В. А. Бернс, Е. П. Жуков, В. В. Маленкова и др. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2018. Т. 20, № 2. С. 6–17. Doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-6-17.

#### References

1. Afanas'ev V. A. [et al.]. *Ekspperimental'naya otrabotka kosmicheskikh letatel'nykh apparatov* [Experimental verification of spacecraft]. Edited by Kholodkov N. V. Moscow, MAI publ., 1994, 412 p. (In Russ.)
2. Khalimanovich V. I., Shatrov A. K., Lysenko E. A., Evti'ev M. D. [Detection of defects in spacecrafts during vibration/acoustic tests under laboratory environment]. *Vestnik SibGAU*. 2005, No 6. P. 174–178 (In Russ.)
3. Doebling S. W., Farrar C. R., Prime M. B., Shevitz D. W. Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review. Technical Report LA-13070-MS. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, 1996. 132 p.
4. Dilena M., Morassi A. Damage detection in discrete vibrating systems. *Journal of Sound and Vibration*. 2006. Vol. 289. P. 830–850. Doi: 10.1016/j.jsv.2005.02.020.
5. Perera R., Fang S.-E., Huerta C. Structural crack detection without updated baseline model by single and multiobjective optimization. *Mechanical System and Signal Processing*. 2009. Vol. 23, Iss. 3. P. 752–768. Doi: 10.1016/j.ymssp.2008.06.010.
6. Berns V. A., Zhukov E. P., Malenkova V. V., Lysenko E. A. [Diagnosis of cracks in metal panels by non-linear distortions of vibration portraits]. *Metal Working and Material Science*, 2018, Vol. 20, No. 2. P. 6–17. Doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-6-17 (In Russ.)

© Бернс В. А., Жуков Е. П., Лысенко Е. А., Маленкова В. В., Лакиза П. А., 2018

УДК: 629.7.018.4:620.178.3

## МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАКЕТА АНТЕННЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ ЕГО СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ

В. А. Бернс<sup>1\*</sup>, В. Е. Левин<sup>2</sup>, Д. А. Красноруцкий<sup>2</sup>, Е. П. Жуков<sup>1</sup>, П. А. Лакиза<sup>2</sup><sup>1</sup>Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С. А. Чаплыгина  
Российская Федерация, 630051, г. Новосибирск, ул. Ползунова, 21<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет  
Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20

\*E-mail: v.berns@yandex.ru

*По результатам модальных испытаний составных частей конструкции скорректированы их математические модели, на основании синтеза которых построена модель полной конструкции и определены ее модальные характеристики.*

*Ключевые слова: модальные испытания, составные части конструкции, математическая модель, коррекция и синтез математических моделей, модальные характеристики.*

## MODAL ANALYSIS OF THE SPACECRAFT ANTENNA MOCKUP BASED ON THE RESULTS OF ITS COMPONENT PARTS TESTS

V. A. Berns<sup>1\*</sup>, V. E. Levin<sup>2</sup>, D. A. Krasnorutsky<sup>2</sup>, E. P. Zhukov<sup>1</sup>, P. A. Lakiza<sup>2</sup><sup>1</sup>Siberian Aeronautical Research Institute named after S.A. Chaplygin  
21, Polzunov Str., Novosibirsk, 630051, Russian Federation<sup>2</sup>Novosibirsk State Technical University  
20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation

\*E-mail: v.berns@yandex.ru

*Based on the results of modal tests of the structure component parts, we correct their mathematical models, in terms of their synthesis we build the model of the complete structure and determine its modal characteristics.*

*Keywords: modal tests, structure component parts, mathematical model, correction and synthesis of mathematical models, modal characteristics.*

**Введение.** Работа посвящена разработке метода определения характеристик собственных тонов колебаний конструкций, представляющих собой совокупность составных частей, по результатам модальных испытаний этих частей. Примерами таких конструкций являются крупногабаритные трансформируемые механические системы космических аппаратов [1]. Целесообразность решения проблемы модального анализа в такой постановке объясняется двумя причинами. Первая причина заключается в том, что во время испытаний обычно не удается реализовать условия закрепления объекта, соответствующие эксплуатационным. Второй причиной являются большие габариты и сложность конструкции в собранном виде, поэтому их экспериментальный модальный анализ сопряжен с серьезными трудностями [2].

**Описание метода.** Метод модального анализа конструкций реализуем в два этапа. На первом этапе проводим модальные испытания составных частей объектов, по результатам которых корректируем расчетные математические модели этих частей [3–5]. Для обеспечения достоверности скорректированных расчетных моделей нами разработан способ определения параметров собственных тонов колебаний, обладающий низкой чувствительностью к погрешностям экс-

перимента [6–7]. Способ был опробован и показал свою эффективность при проведении модальных испытаний самолетов Су-30, Як-152 и агрегата космического аппарата. Второй этап заключается в синтезе расчетных моделей составных частей для создания математической модели полной конструкции и определения ее модальных характеристик.

**Апробация метода.** Предлагаемый метод был опробован в модальном анализе макета зонтичной антенны космического аппарата (см. рисунок). Габаритные размеры макета: длина несущей штанги 2 250 мм, диаметр каркаса рефлектора 3 000 мм. Штанга крепилась к силовой колонне.

Были проведены модальные испытания штанги, каркаса рефлектора на подвеске известной жесткости и макета антенны в сборе. По результатам испытаний определены собственные частоты, формы и обобщенные массы составных частей макета, и скорректированы их расчетные модели. Синтез моделей производился по условию равенства перемещений и углов поворота штанги и рефлектора в местах стыковки.

В таблице представлены результаты определения собственных частот трех низших тонов колебаний макета, которые иллюстрируют эффективность разработанного метода модального анализа конструкций.



Макет зонтичной антенны космического аппарата

**Собственные частоты колебаний макета антенны**

Полная конструкция. Частоты колебаний, Гц				
Расчетная модель	Синтезированная модель	Корректированная синтезированная модель	Эксперимент	Погрешность, %
1	2	3	4	5
2,166	2,409	2,402	2,42	0,74
12, 127	12,306	12,048	12,00	0,40
50, 588	50,704	49,177	49,00	0,36

**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. Зимин В. Н. Экспериментальное определение динамических характеристик крупногабаритных трансформируемых космических конструкций // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2011. № 1. С. 47–56.

3. Межин В. С., Обухов В. В. Практика применения модальных испытаний для целей верификации конечно-элементных моделей конструкции изделий ракетно-космической техники // Космическая техника и технологии. 2014. № 1 (4). С. 86–91.

4. Дружинин Э. И. Формирование динамических моделей космических конструкций по данным натурных испытаний // Вестник СибГАУ. 2013. № 2 (48). С. 124–128.

5. Хейлен В., Ламменс С., Сас П. Модальный анализ: теория и испытания. М. : ООО «Новатест», 2010. 319 с.

6. Способ определения параметров собственных тонов колебаний конструкций в резонансных испытаниях : пат. 2658125 Рос. Федерация / В. А. Бернс, Е. П. Жуков, В. В. Маленкова; заяв. № 2017119498 ; приоритет 02.06.2017 ; дата гос. регистр. 19.06.2018.

7. Экспериментальный модальный анализ летательных аппаратов на основе монофазных колебаний / В. А. Бернс, Е. П. Жуков, Д. А. Маринин и др. // Известия Самарского научного центра РАН. 2018. Т. 20, № 4. С. 43–54.

formed space antennas (part 1)]. *Vestnik SibGAU*. 2007. no. 2. P. 51–57 (In Russ.)

2. Zimin V. N. *Ekspperimental'noe opredelenie dinamicheskikh kharakteristik krupnogabaritnykh transformiruemyykh kosmicheskikh konstruksiy* [Experimental dynamic characteristic determination of large transformable constructions of spacecraft]. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Serya Mashinostroenie*. 2011. No. 1. P. 47–56 (In Russ.)

3. Mezhin V. S., Obukhov V. V. *Praktika primeneniya modal'nykh ispytaniy dlya selei verifikatsii konechno-elementnykh modelei konstruksii 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. No. 1. P. 86–91 (In Russ.)

4. Druzhinin E. I. *Formirovanie dinamicheskikh modeley kosmicheskikh konstruksiy po dannym naturnykh ispytaniy* [Identification of dynamic models of space constructions according to actual test data]. *Vestnik SibGAU*. 2013. No. 2 (48). P. 124–128 (In Russ.)

5. Heylen W., Lammens S., Sas P. *Modal'nyi analiz teotiya i ispytaniya* [Modal Analysis Theory and Testing]. ООО “Novatest”, 2010. 319 p. (In Russ.)

6. *Sposob opredeleniya parametrov sobstvennykh tonov kolebaniy konstruksiy v rezonansnykh ispytaniyakh* [Eigen tones parameters determination method at resonance test] : Patent RF 2658125 / Berns V. A., Zhukov E. P., Malenkova V. V. ; *zayav. № 2017119498; prioritet 02.06.2017; data gos. registr. 19.06.2018* (In Russ.)

7. Berns V. A., Zhukov E. P., Marinin D. A., Malenkova V. V. *Ekspperimental'nyy modal'nyy analiz letatel'nykh apparatov na osnove monofaznykh kolebaniy* [Experimental modal analysis of aircrafts on the basis of monophasic vibrations]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2018. Vol. 20, No. 4. P. 43–54 (In Russ.)

**References**

1. Lopatin A. V., Rutkovskaya M. A. *Obzor konstruksiy sovremennykh transformiruemyykh kosmicheskikh antenn (chast' 1)* [The review of designs of modern trans-

© Бернс В. А., Левин В. Е., Красноруцкий Д. А., Жуков Е. П., Лакиза П. А., 2018

УДК 621.396.67

## ОСОБЕННОСТИ БОРТОВЫХ АНТЕННО-ФИДЕРНЫХ УСТРОЙСТВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В. Е. Братышева, Д. В. Орлов

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: Akimova-VikaE@mail.ru

*В АО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева» введена перспективная разработка - миниатюризация бортовых антенно-фидерных устройств космических аппаратов.*

*Ключевые слова: диаграмма, дистанционное зондирование, специфичность, миниатюризация, энергетические характеристики радиолинии.*

## FEATURES OF ONBOARD ANTENNA-FEEDER DEVICES OF SPACE CRAFT

V. E. Bratysheva, D. V. Orlov

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: Akimova-VikaE@mail.ru

*In JSC «ISS» Reshetnev Company» a promising development of miniaturization of onboard antenna-feeder devices of space vehicles.*

*Keywords: diagram, remote sensing, specificity, miniaturization, power characteristics of radio link.*

Обмен информацией между космическими аппаратами (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), метеорологического, военного, исследовательского назначения или другими КА и Землей является одной из главных задач. Антенно-фидерные устройства (АФУ) входят в линию связи как активный элемент, параметры которого, безусловно, сказываются на передаваемом сообщении. От характеристик антенны зависит не только дальность действия линии связи «КА – Земля», и наоборот, но и такие весьма важные характеристики линии связи, как быстрота передачи информации и её достоверность. Для примера приведём такую характеристику антенн, как ширина полосы рабочих частот.

Без применения АФУ на КА невозможно было бы осуществлять полёты с благополучной посадкой в заданном районе в условиях плохой видимости, невозможно было бы успешно исследовать космическое пространство и т.д. АФУ, образно говоря, выполняют роль «глаз и ушей» тех КА, на которых они установлены [1].

Особенности бортовых АФУ КА. При разработке и проектировании бортовых АФУ КА необходимо учитывать следующие особенности:

– на поверхности КА заказчиком отводится определенное место для установки антенн. Зачастую этого отведенного места бывает недостаточно для установления того АФУ, которое полностью бы отвечало заданным требованиям. Поэтому приходится использовать выносные элементы (кронштейны, штанги) или другие типы антенн (ленточные, выдвижные).

Порой в некоторых случаях допускается даже ухудшение параметров;

– в формировании диаграммы направленности (ДН) участвует не только собственно антенна, но и часть проводящей поверхности КА. По проводящей поверхности корпуса КА текут поверхностные токи, наводимые электромагнитными полями, создаваемыми самой антенной. Эти высокочастотные токи создают в пространстве, окружающем КА, электромагнитные поля, которые можно назвать вторичными. Вторичные поля взаимодействуют с полями антенн. Вследствие явления интерференции получается суммарное электромагнитное поле. Влияние корпуса КА необходимо всегда принимать во внимание. Это влияние является одним из основных факторов, определяющих специфику работы антенн КА;

– специфичность работы антенн КА, а именно, что им приходится работать с электронными приборами, рассчитанными на выполнение определённых функций в условиях наличия ионизации, резких перепадов давления, температуры, перегрузки, вибрация, и т. д.

Указанные выше особенности усложняют работу антенн, могут привести к нежелательным явлениям, искажающим характеристики антенн, и, безусловно, создаёт дополнительные требования в отношении конструкций и параметров такого рода антенн.

Перспективные разработки.

1. Миниатюризация бортовых АФУ КА. С середины 90-х годов XX века существенно изменились приоритеты в разработке КА. Видимое преимущество по

ряду направлений космической деятельности получило создание малых КА по сравнению с крупногабаритными и тяжелыми КА. В результате начавшегося и интенсивно продолжающегося процесса миниатюризации КА удалось снизить массы некоторых больших и тяжелых КА и создать новые аппараты аналогичного назначения с массой в несколько сотен килограмм [2–4]. Таким образом, наблюдается активный процесс перехода от разработок и внедрения малых КА вместо больших и тяжелых КА, т. е. происходит процесс миниатюризации КА, что в свою очередь приводит и к миниатюризации бортовой аппаратуры КА.

Учитывая выше приведенные особенности бортовых АФУ КА и наблюдаемую тенденцию к переходу от больших КА к малым КА, возникает актуальная задача по созданию малогабаритных, невыступающих бортовых АФУ КА, т. е. устранению недостатков в отношении массогабаритных характеристик и выступающей конфигурации, создание простых, надежных и высокотехнологичных антенн широкого назначения.

В ходе поиска решения данной задачи возник интерес к применению микрополосковых (печатных) антенн (МПА).

2. Улучшение электрических характеристик АФУ.

В работе выявлено, что при приеме сигналов с иностранных КА ДЗЗ в диапазоне частот 8 025–8 400 МГц энергетические характеристики радиолинии заметно лучше, чем при приеме с отечественных спутников. В связи с этим на приемных станциях приходится использовать антенны с большим диаметром, что в свою очередь приводит к удорожанию космической системы. Поэтому является актуальной задачей по разработке альтернативных вариантов антенн с улучшенными электрическими характеристиками (коэффициент усиления), что также способствует значительному уменьшению массы и энергопотребления передающих устройств [5].

В ходе поиска решения данной задачи рассмотрены следующие варианты:

- применение четырехзаходных спиральных антенн;
- применение направленных антенн с опорно-поворотным устройством.

### Библиографические ссылки

1. Пригода Б. А., Кокуньо В. С. Антенны летательных аппаратов. М. : Воениздат, 1964. 120 с.
2. Анализ современных возможностей создания малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли / Н. Н. Севастьянов, В. Н. Бранец, В. А. Панченко и др. // Сб. ст. МФТИ. 2009. Т. 1, № 3. 63 с.
3. Макриденко Л. А., Боярчук К. А. Микроспутники. Тенденция развития. Особенности рынка и социальное значение // Вопросы электромеханики : тр. НПП ВНИИЭМ. 2005. Т. 102. С. 12–27.
4. Гершензон В., Карпенко С. Малые спутники – провокация или перспективное направление // Экология и жизнь. 2011. № 12 (121). С. 51–57.
5. Гончаров А. К., Бекренев О. В., Варейчук Н. С. Инновационные технические решения создания приёмных комплексов с малым диаметром антенн // Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли : тезисы докл. междунар. науч.-техн. конф. М. : Корпорация «ВНИИЭМ», 2013. С. 31–34.

### References

1. Prigoda B. A., Kokun'ko V. S. Aerials of aircraft. Moscow : Military Publishing, 1964. 120 p.
2. Analysis of modern possibilities for creating small space vehicles for remote sensing of the Earth / N. N. Sevastyanov, V. N. Branets, V. A. Panchenko et al. // Collected papers of MIPT. 2009. Vol. 1, № 3. 63 p.
3. Makridenko L. A., Boyarchuk K. A. Microsatellites. The development trend. Features of the market and social significance // Journal of Electromechanics. Proceedings of NPP VNIIEEM. 2005. Vol. 102. P. 12–27.
4. Gershenzon V., Karpenko S. Small satellites – provocation or perspective direction // Ecology and life. 2011. № 12 (121). P. 51–57.
5. Goncharov A. K., Bekrenev O. V., Varejtshuk N. S. Innovative technical solutions for creation of receiving complexes with a small antenna diameter. Theses of the reports of the international scientific and technical conference “Actual problems of creation of space systems of remote sensing of the Earth”. M. : JSC VNIIEEM corporation, 2013. P. 31–34.

© Братышева В. Е., Орлов Д. В., 2018



УДК 629.76/78.001.63

## ОБОДНОЙ КРУПНОГАБАРИТНЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ РЕФЛЕКТОР СО СТОЙКАМИ ПОВЫШЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ

А. И. Величко, Ю. А. Кисанов, В. И. Церихов, И. В. Матросова

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

*Рассмотрены проблемы построения сетчатого ободного рефлектора, в котором силовой каркас состоит из складывающегося кольца, шарнирно соединенного со стойками повышенной жесткости, пружинного привода развёртывания и электромеханического привода контроля развёртывания.*

*Ключевые слова: крупногабаритный космический рефлектор, кольцевой силовой складывающийся обод, опорные стойки повышенной жесткости, пружинный привод развёртывания, электромеханический привод контроля развёртывания.*

## RIMMED LARGE-SIZED SPACE REFLECTOR WITH INCREASED STIFFNESS STRUTS

A. I. Velichko, Yu. A. Kisanov, V. I. Tserikhov, I. V. Matrosova

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: tmsmos@iss-reshetnev.ru

*The article considers the problem of constructing a mesh rim of a reflector, where the power frame consists of a folding ring pivotally connected to increased stiffness struts, spring drive deployment and electromechanical drive control deployment.*

*Keywords: large-sized space reflector, folding rim, increased stiffness struts, deploying spring gearing, electromechanical control deploying gearing.*

Предлагаемый рефлектор продолжает серию рефлекторов с опорными стойками и построен по известной схеме с кольцевым силовым каркасом и формообразующей структурой (ФОС) с двумя сетями (рис. 1). От существующих ободных рефлекторов [1–3] предлагаемый вариант отличается тем, что опорные точки для крепления двух встречно расположенных гибких сетей, одна из которых является формообразующей для отражающей поверхности, создаются с помощью стоек, связанных силовым кольцом.

Силовой каркас (рис. 2) состоит из стоек с жесткими внутренними фермами, соединенных шарнирно-стержневым кольцом и шпангоутов. Фермы компенсируют изгибные деформации стоек от воздействия ФОС.

Кольцо состоит из 12 граней (труб), соединенных шарнирными устройствами, энергией пружин которых производится развёртывание кольца и натяжение ФОС и шпангоутов. В соответствии с современными тенденциями развития приводов [4; 5] развёртывание производится в управляемом режиме под контролем электродвигателя и тросовой системы, охватывающей все шарниры.

Мотор-редуктор с тросовым барабаном крепится на одной из труб силового кольца.

В сложенном состоянии рефлектор представляет собой цилиндрическую упаковку, размеры которой определяются длиной грани многоугольника и габаритами шарнирных устройств (рис. 3).

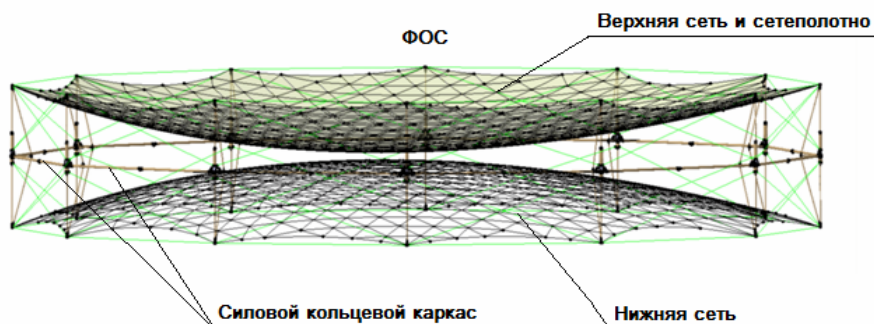


Рис. 1. Общий вид рефлектора

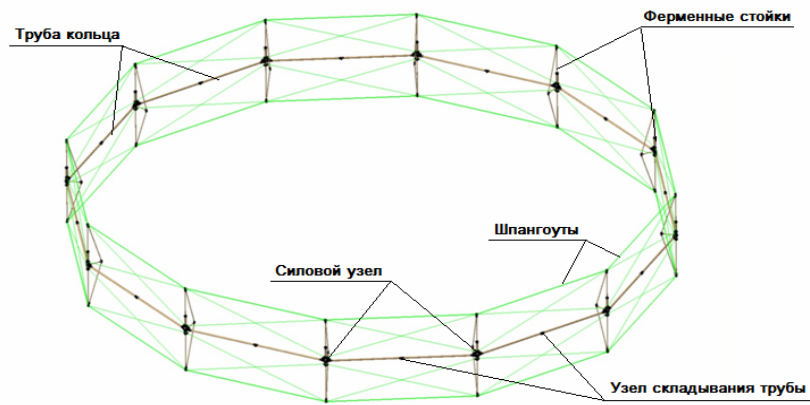


Рис. 2. Силовой кольцевой каркас

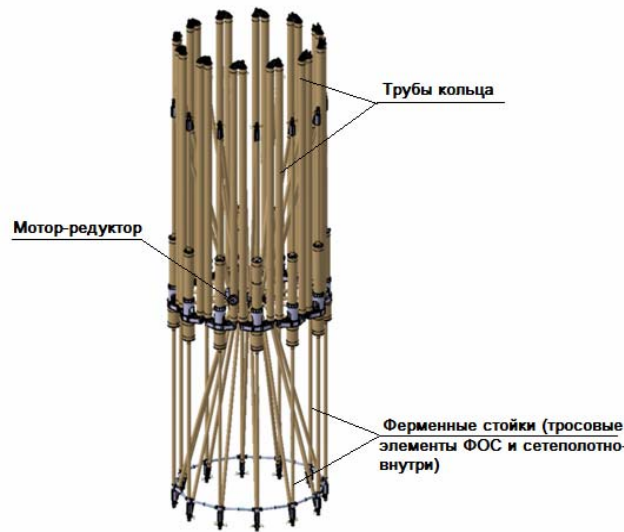


Рис. 3. Рефлектор в сложенном виде

### Библиографические ссылки

1. Application of the AstroMesh Reflector to Astrophysics Missions/ Geoff Marks, Charles Lillie, Steve Kuehn // 2011 Northrop Grumman Systems Corporation.
2. Lightweight, compactly deployable support structure/ Richard I. Harless// Patent No: US 6,313,811 B1. Date of Patent: Nov. 6, 2001.
3. United States Patent Tserodze et al. No. US 9,153,860 B2, Date of Patent: Oct. 6, 2015.
4. Тенденции развития приводов раскрытия / Л. В. Чуйкина, В. Г. Порпылев, Д. О. Чуйкин // Решетневские чтения (10–12 ноября 2010, г. Красноярск). Красноярск, 2010. Ч. 1. С. 93–94.
5. Привод развертывания трансформируемого сегчатого рефлектора с жесткой центральной частью / А. И. Величко, Ю. А. Кисанов, В. И. Церихов, И. В. Матросова // Решетневские чтения (10–14 ноября 2015, г. Красноярск). Красноярск, 2015. Ч. 1. С. 83–85.
6. Ободной крупногабаритный космический рефлектор / А. И. Величко, Ю. А. Кисанов, В. И. Церихов, И. В. Матросова // Решетневские чтения (8–11 ноября 2017, г. Красноярск). Красноярск, 2017. Ч. 1. С. 96–97.

### References

1. Application of the AstroMesh Reflector to Astrophysics Missions/ Geoff Marks, Charles Lillie, Steve Kuehn// 2011 Northrop Grumman Systems Corporation.
2. Lightweight, compactly deployable support structure / Richard I. Harless // Patent No: US 6,313,811 B1. Date of Patent: Nov. 6, 2001.
3. United States Patent Tserodze et al. No. US 9,153,860 B2, Date of Patent: Oct. 6, 2015.
4. The opened drives development tendencies / L. V. Chuykina, V. G. Porpylev, D. O. Chuykin // Reshernevskie chteniya, 10–12 nov., Krasnojarsk, 2010. Part 1. P. 93–94.
5. Drive of mesh transformable reflector deployment with solid central part / A. I. Velichko, Yu. A. Kisanov, V. I. Tserikhov, I. V. Matrosova // Reshernevskie chteniya, 10–14 nov., Krasnojarsk, 2015. Part 1. P. 83–85.
6. Rimmed large-sized space reflector / A. I. Velichko, Yu. A. Kisanov, V. I. Tserikhov, I. V. Matrosova // Reshernevskie chteniya, 8–11 nov., Krasnojarsk, 2017. Part 1. P. 96–97.

© Величко А. И., Кисанов Ю. А., Церихов В. И., Матросова И. В., 2018

УДК 629.78.015

**ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СОВРЕМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

А. С. Вехов, С. А. Титаренко

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

*Рассмотрена основная задача – выпуск конкурентоспособной продукции на основе аддитивных технологий в АО «ИСС».*

*Ключевые слова: космический аппарат, аддитивные технологии, производство.*

**THE USE OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN MODERN MANUFACTURING**

A. S. Vehov, S. A. Titarenko

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
 52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
 E-mail: vas@iss-reshetnev.ru

*Main task: the production of competitive products based on additive technologies in JSC “ISS”.*

*Keywords: spacecraft, additive technologies, production*

Применение новых технологий – одна из основополагающих задач при изготовлении современных, конкурентоспособных космических аппаратов. Для этого решается ряд сложных и многообразных задач по изготовлению деталей. Одной из таких задач является решение вопросов изготовления деталей со сложной геометрией, а также уменьшением их массы. Изготовление традиционным способом, приводит к большим, а зачастую к колоссальным затратам по трудоемкости и к невозможности механической выборки материала из-за недоступности места обработки режущим инструментом. Один из способов изготовления деталей со сложной геометрией является аддитивная технология.

Аддитивная технология (3D-печать) – это технология послойного формирования деталей. Она является не только инструментом для макетирования, но и полноценным производственным процессом для изготовления деталей со сложной геометрией.

В данной технологии применяется широкий спектр металлических порошков (рис. 1) на основе никеля, стали, титана, алюминия, бронзы и драгоценных металлов [1].

В основном 3D-принтеры состоят из рабочей платформы, резервуара с материалом и механизма

формирования и выравнивания слоя порошка (рис. 2). Толщина слоя составляет от 20 до 100 мкм. После формирования слоя происходит расплавление порошка, за счет перемещения луча с высокой плотностью энергии по контуру, соответствующего заданному сечению детали. Процесс нанесения материала и его сплавления повторяется слой за слоем до окончательного формирования детали. По окончании деталь извлекается из резервуара с порошком, после чего происходит ее дальнейшая обработка в соответствии с техническими требованиями [2; 3].

Например, аэрокосмическая компания Lockheed Martin переходит на более эффективное и экономичное в сравнении с традиционными методами аддитивное производство спутниковых титановых топливных баков (рис. 3). Компания Lockheed Martin уже сократила сроки производства крышек на 87 %, а весь цикл от заказа до поставки теперь занимает три месяца вместо двух лет.

Исследовательская и консалтинговая компания International Data Corporation (IDC) провела исследование рынка аддитивных технологий в европейском регионе. Специалисты компании прогнозируют стремительный рост годового оборота в течение пяти лет – с 3,6 до 7,4 млрд долларов.

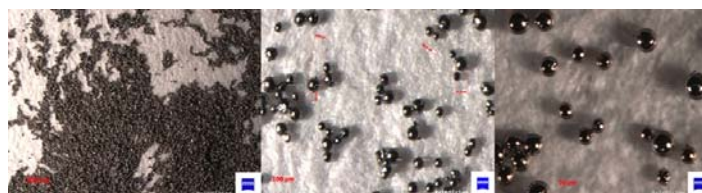


Рис. 1. Порошки для аддитивных технологий



Рис. 2. Процесс нанесения материала и его сплавления



Рис. 3. Топливный бак, изготовленный методом аддитивного производства

Общеввропейская выручка от продаж 3D-принтеров, расходных материалов, программного обеспечения и услуг в 2017 году составила порядка 3,6 млрд долл. Основываясь на текущих трендах и результатах проведенных опросов, аналитики IDC предсказывают стабильный и быстрый рост аддитивного рынка на уровне 15,3 % в год [4; 5].

Чтобы выпускать конкурентоспособную машиностроительную продукцию необходимо активно осваивать и развивать аддитивные технологии в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» (далее – АО «ИСС»).

Для развития аддитивных технологий в АО «ИСС» необходимо провести оснащение производства предприятия современным технологическим оборудованием, а также повести повышение квалификации специалистов предприятия через обучение. Для этого в АО «ИСС» необходимо провести:

- ознакомление специалистов с передовыми технологиями аддитивного производства: трехмерное формообразование методом лазерной наплавки, селективное лазерное и электронно-лучевое плавление;
- получение практического опыта работы на современном оборудовании аддитивного производства

и ознакомление с вариантами промышленного внедрения технологических процессов аддитивного производства.

Освоив аддитивные технологии в АО «ИСС» мы получим следующие преимущества:

Большая экономия сырья.

При применении аддитивных технологий используется только требуемое количество материала, которое нужно для производства продукции. Тогда как при традиционных способах изготовления потери сырья могут составлять до 80–85 %.

Возможность изготовления деталей со сложной геометрией.

Оборудование для аддитивных технологий позволяет изготавливать детали и сборочные единицы, которые невозможно получить другим способом. Например, получить сборочную единицу, состоящую из детали, размещенной внутри другой детали. Или получить очень сложные по геометрии детали, например, детали системы охлаждения на основе сетчатых конструкций (чего невозможно получить ни литьем, ни штамповкой).

Мобильность производства и ускорение обмена данными.

С применением аддитивных технологий отпадает необходимость использования стандартных чертежей. В основе данной технологии лежит компьютерная модель будущего изделия, которую можно передать в считанные минуты на другой конец мира – и сразу же начать её производство.

#### Библиографические ссылки

1. Неруш С. В., Евгенов А. Г. Исследование мелкодисперсного металлического порошка жаропрочного сплава марки ЭП648-ВИ применительно к лазерной LMD-наплавке, а также оценка качества наплавки порошкового материала на никелевой основе на рабочие лопатки ТВД // Тр. ВИАМ. 2015. № 3. С. 1.
2. Аддитивное производство из металла / 3D-печатать [Электронный ресурс]. URL: <https://www.laser-bulat.ru/articles/148/> (дата обращения: 04.09.2018).
3. Международный научно-исследовательский журнал [Электронный ресурс]. URL: <https://research-journal.org/technical/obzor-metodov-additivnogo-formirovaniya-izdelij/> (дата обращения: 04.09.2018).
4. Зленко М. А., Нагайцев М. В., Довбыш В. М. Аддитивные технологии в машиностроении : пособие для инженеров. М. : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.

5. Аддитивные технологии : информационный бюллетень. 2018. № 24 (59). 37 с.

#### References

1. Nerush S. V., Evgenov A. G. Investigation of fine metal powder of high-temperature alloy grade ЭП648-VI with respect to the laser LMD-surfacing, as well as evaluation of the quality of welding of the powder material Nickel-based on the rotor blades of the HPT // Trudy VIAM. 2015. No. 3. P. 1.
2. Article Additive manufacturing, metal 3D printing. Available at: <https://www.laser-bulat.ru/articles/148/> (accessed: 04.09.2018).
3. International research journal. Available at: <https://research-journal.org/technical/obzor-metodov-additivnogo-formirovaniya-izdelij/> (accessed: 04.09.2018).
4. Zlenko M. A., Nagaytsev M. V., Dovbysh V. M. Additive technologies in mechanical engineering // Handbook for engineers. M. : SSC RF FSUE "NAMI", 2015. 220 p.
5. Additive technology : Newsletter. 2018. № 24 (59). 37 p.

© Вехов А. С., Титаренко С. А., 2018

УДК 678; 677.4; 532.64

## ОЦЕНКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ В РАЗВЕРТЫВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЯХ\*

С. Ю. Воронина, А. Ю. Власов, К. А. Пасечник, И. В. Обверткин

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

*Получен композит, обладающий эффектом памяти формы. Определены коэффициенты фиксации формы и восстановления формы (около 100 %). Установлено, что температура, активирующая начало восстановления композита в первоначальную форму, составляет около 46 °С.*

*Ключевые слова: полимер с памятью формы, углеткань, температура стеклования, композиционный материал, коэффициент фиксации формы.*

## EVALUATION OF INTELLIGENT PROPERTIES OF A COMPOSITE ON THE BASIS OF A POLYMER MATRIX WITH THE SHAPE MEMORY EFFECT OF A FORM IN REFLECTOR DESIGNS

S. Y. Voronina, A. Y. Vlasov, K. A. Pasechnic, I. V. Obvertkin

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

*Composite material with the effect of memory of forms. The coefficients of shape retention ratio and shape recovery ratio (100 %) are determined. It was found that the temperature that activates the reduction of the composite in its original form is about 46 °C.*

*Keywords: shape memory polymer, carbon fabrics, glass transition temperature, composite material, shape fixation ratio.*

Термопластичные полиуретаны являются популярным семейством полимеров с памятью формы (SMP) из-за их превосходной стойкости к истиранию и погодным условиям, а также механической прочности. Полимеры с памятью формы (SMP) – это тип полимерного интеллектуального материала, который может поддерживать деформированное состояние (временную форму) и возвращаться в исходное состояние (постоянная форма) при различных внешних воздействиях [1]. Полимеры с памятью формы были установлены как ценные функциональные материалы в течение десятилетий, потому что SMP позволяют материалу «запомнить» свою первоначальную форму и восстановить это в ответ на внешний раздражитель, например, тепло, свет, электричество, влажность или pH. В частности, термически чувствительные SMP были предметом многих отличных отзывов, потому что их можно сначала деформировать на высокой температуре, обычно выше перехода стеклования (T<sub>g</sub>) и затем заморозить до временной формы при низкой температуре [2].

Армированные волокном композиты на основе полимерной матрицы с памятью формы могут быть использованы в активно-деформируемых конструк-

циях. В этих конструкциях изгибная деформация является основным режимом для деформирования тонких оболочек [3]. Следовательно, процесс восстановления формы композиционной конструкции из SMP затрагивает вопросы динамики разворачивания конструкции. В связи с этим, существует необходимость изучения температуры срабатывания «интеллектуального композита» для моделирования процесса раскрытия конструкции за счет эффекта «памяти формы» у композита.

Целью работы являлось определение температуры активации эффекта «памяти формы», в композите с полиуретановой матрицей, а также определение степени фиксации.

Объектом исследования являлся образец с полиуретановой матрицей *Diaplex MP5510* (Япония), обладающей памятью формы. В качестве армирующего была использована углеткань Ст 12073 (Россия). Исходный образец был деформирован при высокой температуре с помощью прибора для определения эластичности при цилиндрическом изгибе «КОНСТАНТА-ИЦ», затем охлажден до комнатной температуры (см. рисунок). После оценки фиксации формы, образец был заново нагрет.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Министерства образования и науки Российской Федерации) по договору 02.G25.31.0147.



Испытания композита на изгиб с помощью прибора «КОНСТАНТА-ИЦ»

В качестве показателей, определяющих свойства «памяти формы» были рассчитаны степень фиксации формы ( $R_f$ ) и степень восстановления формы ( $R_r$ ). Таким образом, было определено, что для изменения формы образца без критичных повреждений необходимо температурное воздействие  $T_g+20$  °С. Интеллектуальные свойства матрицы (реактопласта) в композите проявляются без изменений на протяжении 10 циклических испытаний. Показатели интеллектуальных свойств композита составили: степень восстановления и фиксации формы – около 100 %, время восстановления – около 2 мин. Температура, активирующая начало восстановления композита в первоначальную форму составляет около 46 °С.

#### Библиографические ссылки

1 Yunxin Li, Jianying Hu, Zishun Liu A constitutive model of shape memory polymers based on glass transition and the concept of frozen strain release rate // *International Journal of Solids and Structures*. 2017. Doi: 10.1016/j.ijsolstr.2017.06.039.

2 Ban J., Mu L., Yang J., Chen S., Zhuo H. New stimulus-responsive shape-memory polyurethanes capable of UV light-triggered deformation, hydrogen bond-

mediated fixation, and thermal-induced recovery, *J. Mater. Chem. A*, 2017, Doi: 10.1039/C7TA04463A.

3. Liu Y., Han C., Tan H., Du X. Thermal, mechanical and shape memory properties of shape memory epoxy resin // *Materials Science and Engineering A* 527, 2010, 2510–251.

#### References

1 Yunxin Li, Jianying Hu, Zishun Liu A constitutive model of shape memory polymers based on glass transition and the concept of frozen strain release rate // *International Journal of Solids and Structures*, 2017. Doi: 10.1016/j.ijsolstr.2017.06.039.

2 Ban J., Mu L., Yang J., Chen S., Zhuo H. New stimulus-responsive shape-memory polyurethanes capable of UV light-triggered deformation, hydrogen bond-mediated fixation, and thermal-induced recovery, *J. Mater. Chem. A*, 2017, Doi: 10.1039/C7TA04463A.

3. Liu Y., Han C., Tan H., Du X. Thermal, mechanical and shape memory properties of shape memory epoxy resin // *Materials Science and Engineering A* 527, 2010, 2510–251.

© Воронина С. Ю., Пасечник К. А.,  
Власов А. Ю., Обвёрткин И. В., 2018

УДК 621.792.053

## ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ТОКОПРОВОДЯЩИХ КЛЕЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ

В. Д. Ворончихин<sup>1\*</sup>, В. В. Свередюк<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>АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29

\*E-mail: vvd-77@mail.ru

*Представлены основные принципы создания клеевых композиций, содержащих в качестве токопроводящих наполнителей углеродные материалы различной морфологической структуры.*

*Ключевые слова: токопроводящий клей, эластомер, углеродные наполнители.*

## THE BASICS OF CREATING A CARBON-CONTAINING CONDUCTIVE ADHESIVE COMPOSITIONS

V. D. Voronchikhin<sup>1\*</sup>, V. V. Sveredyuk<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>JSC „Krasnoyarsk Machine Building Plant“  
29, Krasnoyarsky Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation

\*E-mail: vvd-77@mail.ru

*The paper presents the basic principles of creating adhesive compositions containing as conductive fillers carbon materials of different morphological structure.*

*Keywords: conductive adhesive, elastomers, carbon fillers.*

Одним из распространенных способов соединения деталей при конструкционной сборке является их склеивание. Представленный на рынке ассортимент клеев достаточно разнообразен [1] и выбор типа клея определяется сферой применения изделий, в которых он рекомендуется к использованию.

Современные клеевые композиции, применяемые в авиакосмической отрасли, по областям их преимущественного применения условно разделяются на две укрупненные группы [2]:

– клеи конструкционного назначения (эпоксидные пленочные клеи, фенолкаучуковые пленочные и жидкие клеи, пастообразные клеи холодного отверждения);

– клеи функционального назначения (термостойкие, резинотехнического назначения, клеи со специальными свойствами, например, токопроводящие).

Наиболее интересными с научной точки зрения и максимально востребованными на практике в авиа- и ракетостроении являются токопроводящие клеи, в том числе на основе эластомерных материалов. Основным назначением подобных клеевых композиций является соединение изделий из разнородных материалов и снятие статического электричества.

Преимуществами токопроводящих эластомерных клеев для применения в авиакосмической промышленности являются [3]:

– низкие температуры обработки (токопроводящий клей подвергается структурированию или отверждению при температуре ниже 150 °С);

– эластичность токопроводящего слоя, образующегося при высыхании клея (эластичность слоя может компенсировать коэффициент линейного теплового расширения при изменении температуры эксплуатации клеевого соединения);

На начальном этапе создания токопроводящих эластомерных клеевых композиций необходимо четко установить требования, предъявляемые к создаваемым клеевым композициям по типу соединяемых материалов (металлы, композиционные материалы и др.), уровню электропроводимости, уровню прочности соединения, условиям статического и динамического нагружения, температурные режимы эксплуатации, оценить возможность воздействия агрессивных сред различного характера и величину эксплуатационного ресурса.

В процессе создания токопроводящих эластомерных клеевых композиций необходимо последовательно решить следующие задачи:

1. Определить совместимость эластомерной матрицы с иными компонентами композиции (наполнителями, смолами, структурирующими агентами, противостарителями, модификаторами клейкости и др.).



2. Установить зависимости электропроводности полимерных композиций от химической природы и соотношения эластомер – токопроводящий наполнитель и определить оптимальное соотношение применяемых компонентов для получения нужного уровня электропроводности клеевой пленки.

3. Изучить влияние морфологической структуры токопроводящих наполнителей на электропроводность создаваемых композиций.

4. Установить степень влияния каждого из применяемых компонентов на электропроводность создаваемых композиций и определить их оптимальное соотношение для получения нужного уровня электропроводности клеевой пленки.

5. Выбрать растворитель, обеспечивающий при высыхании клеевого слоя неизменность структуры композита при образовании пленки и определить оптимальное содержание растворителя в клее.

6. Изучить технологические свойства токопроводящей клеевой композиции и технические свойства пленок и клеевых соединений и разработать рекомендации по применению созданной клеевой композиции в реальных условиях.

Уровень электропроводящих свойств клеевой композиции определяется, в первую очередь, типом полимерной основы и типом применяемого наполнителя.

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. Электропроводность эластомерной матрицы зависит от микро- и макроструктуры образующих ее макромолекул, а также от температуры и величины прилагаемого механического воздействия [4].

Требуемый уровень электропроводности клеевых композиций обеспечивается введением в их состав различных порошкообразных наполнителей, степень влияния которых зависит от их типа, морфологической структуры и количества. Наибольшее распространение получили тонкодисперсные порошки металлов, карбонильный никель, углеродные материалы [5; 6].

Несмотря на высокую эффективность применение тонкодисперсных порошков металлов (например, серебра) приводит к высокой стоимости клеевых композиций. Как следствие, применение токопроводящих углеродных материалов является перспективным направлением в создании токопроводящих клеевых композиций.

Наиболее распространенным электропроводящим наполнителем эластомерных систем является электропроводящий технический углерод [7]. Углеродные наполнители могут быть использованы как самостоятельно, так и в комбинации с порошками металлов, например, графит и карбонильный никель [5]. Возможно применение в составе токопроводящих клеевых композиций углеродных нанотрубок в виде столбчатых структур, расположенных на углеродном основании [8].

## Библиографические ссылки

1. Петрова А. П. Клеящие материалы : справ. М. : Редакция журнала «Каучук и резина», 2002. 196 с.
2. Шарова И. А., Лукина Н. Ф. Свойства и назначение авиационных клеев // Новости материаловедения. Наука и техника. 2016. № 2 (20). С. 41–49.
3. Шестаков А. С., Привалов В. И. Токопроводящие клеи. Механизмы проводимости // Информационно-технологический вестник. 2016. № 4 (10). С. 90–96.
4. Сажин Б. И. Электропроводность полимеров. Л. : Химия, 1964.
5. Наполнители для токопроводящих клеев / А. П. Петрова, Н. Ф. Лукина, Б. Ф. Павлюк и др. // Новости материаловедения. Наука и техника. 2017. № 5–6 (28). С. 47–55.
6. Петрова А. П., Лукина Н. Ф. Клеи для многоразовой космической системы // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 1. С. 131–136.
7. Раздьяконова Г. И. Свойства и перспективные направления использования электропроводных марок технического углерода // Проблемы шин и резинокордных композитов : труды XX симп. М. : НТЦ «НИИШП», 2011. С. 121–126.
8. Carbon nanotube composite structure and adhesive member: app. 2011077784 A1, WO; publ. 30.06.11.

## Reference

1. Petrova A. P. Kleiyashchie materialy. Spravochnik [Adhesive materials. Handbook]. M. : Redakciya zhurnala "Kauchuk i rezina", 2002. 196 p.
2. Sharova I. A., Lukina N. F. Svoystva i naznachenie aviacionnyh kleev [Properties and purpose of aviation adhesives] // Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika. 2016. № 2 (20). P. 41–49. (In Russ.)
3. Shestakov A. S., Privalov V. I. Tokoprovodyashchie klei. Mekhanizmy provodimosti [Conductive adhesives. Conductivity mechanisms] // Informacionno-tekhnologicheskij vestnik. 2016. № 4 (10) P. 90–96. (In Russ.)
4. Sazhin B. I. EHlektroprovodnost' polimerov [Electrical conductivity of polymers]. L. Himiya, 1964. 116 p.
5. Napolniteli dlya tokoprovodyashchih kleev [Fillers for conductive adhesives] / Petrova A. P., Lukina N. F., Pavlyuk B. F. i dr. // Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika. 2017. № 5–6 (28). P. 47–55 (In Russ.)
6. Petrova A. P., Lukina N. F. Klei dlya mnogorazovoj kosmicheskoy sistemy [Adhesives for reusable space system] // Aviacionnye materialy i tekhnologii. 2013. № 1. P. 131–136 (In Russ.)
7. Razd'yakonova G. I. [Properties and promising areas of use of conductive grades of carbon black] // Trudy XX Simp. "Problemy shin i rezinokordnyh kompozitov" [Proceedings of XX Symp. "Problems of tyres and rubber-cord composites"]. M. : NTC «NIISHP», 2011. P. 121–126 (In Russ.)
8. Carbon nanotube composite structure and adhesive member: app. 2011077784 A1, WO; publ. 30.06.11.

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРБИТАЛЬНОЙ ЮСТИРОВКИ КРУПНОГАБАРИТНОГО РЕФЛЕКТОРА

Н. Н. Голдобин

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

*Рассмотрены результаты анализа эффективности средств орбитальной юстировки крупногабаритного трансформируемого рефлектора зонтичного типа диаметром 12 м. Показаны результаты расчета с использованием конечно-элементной модели рефлектора.*

*Ключевые слова: антенна космического аппарата, рефлектор, орбитальная юстировка.*

## ANALYSIS OF EFFICIENCY OF ORBITAL ADJUSTMENT OF THE LARGE-SIZED REFLECTOR

N. N. Goldobin

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: goldobin@iss-reshetnev.ru

*In this paper, the results of the analysis of the effectiveness of means for orbital adjustment of a large-sized transformable reflector of an umbrella type with a diameter of 12 meters are considered. The calculation results are shown using the finite element model of the reflector.*

*Keywords: an antenna of a spacecraft, a reflector, orbital adjustment.*

В связи с постоянно растущими требованиями, предъявляемыми к космическим антеннам, как, например, увеличение рабочего частотного диапазона, точность наведения и формы радиоотражающей поверхности может быть увеличена за счет проведения орбитальной юстировки рефлектора.

Задача орбитальной юстировки рефлектора в общем случае представляет собой совокупность управляющих воздействий специальных устройств, направленных на компенсацию отклонений положения и формы отражающей поверхности, возникающих в процессе эксплуатации рефлектора на рабочей орбите, с целью ее приведения к требуемому состоянию с точки зрения радиотехнических характеристик антенны.

В качестве типового рефлектора для анализа орбитальной юстировки выбран крупногабаритный сетчатый рефлектор зонтичного типа диаметром 12 м (см. рисунок) [1]. Управляющие органы используемой концепции системы орбитальной юстировки рефлектора включают:

– устройство для изменения пространственного положения рефлектора относительно облучающей системы: двухступенной привод с вращательными степенями свободы относительно двух взаимно перпендикулярных осей, установленный в месте стыка штанги со спицей рефлектора;

– устройство для изменения геометрической формы силового каркаса: расположенный на конце мачты

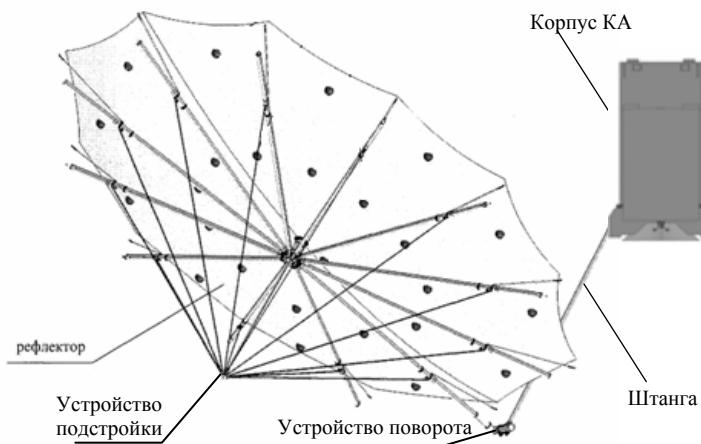
механизм, изменяющий длины оттяжек-подкосов (см. рисунок); при этом изменение длин оттяжек-подкосов, закрепленных на концах спиц, приводит к перемещению спиц друг относительно друга и относительно фланца рефлектора.

Следует отметить, что в определенных пределах регулировки функции угловых приводов могут выполняться согласованным изменением углового положения спиц относительно фланца рефлектора.

Использование устройства поворота рефлектора позволяет компенсировать угловое отклонение фокальной оси. Однако оно не позволяет полностью компенсировать отклонение фокуса (это возможно только в случае, если отклонение рефлектора произошло относительно оси поворота, а также если расстояние от оси поворота до фокуса не изменилось).

Поэтому устройство поворота рефлектора следует применять только для компенсации углового отклонения фокальной оси рефлектора.

Использование устройства изменения формы рефлектора влияет на угловое отклонение фокальной оси. В первую очередь это связано с тем, что рефлектор крепится к штанге за конец спицы. По этой причине работа управляющих средств по достижению необходимой точности положения и формы отражающей поверхности рефлектора должна выполняться совместно и за несколько итераций.



Расположение исполнительных средств для проведения орбитальной юстировки

### Результаты расчета

Геометрические параметры рефлектора	Номер расчетного случая				
	Настроенный рефлектор	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Координаты фокуса, м	$x = 8,300$ $y = 0,000$ $z = 0,000$	$x = 8,208$ $y = -0,516$ $z = 0,000$	$x = 8,394$ $y = 0,499$ $z = -0,000$	–	–
Отклонение фокуса, $\Delta F$ , м	$\delta x = 0,000$ $\delta y = 0,000$ $\delta z = 0,000$	$\delta x = -0,092$ $\delta y = -0,516$ $\delta z = 0,000$	$\delta x = 0,094$ $\delta y = 0,499$ $\delta z = 0,000$	$\delta x = \pm 0,004$ $\delta y = \pm 0,013$ $\delta z = \pm 0,000$	$\delta x = \pm 0,000$ $\delta y = \pm 0,000$ $\delta z = \pm 0,024$
	$\Delta F = 0,000$	$\Delta F = 0,528$	$\Delta F = 0,511$	$\Delta F = 0,013$	$\Delta F = 0,024$
Отклонение фокальной оси, $\varphi$ , °	$Ry = 0,00$ $Rz = 0,00$	$Ry = 0,00$ $Rz = 1,92$	$Ry = 0,00$ $Rz = -1,99$	$Rz = \pm 0,16$	$Ry = \pm 0,3$
	$\Delta\varphi = 0,00$	$\Delta\varphi = 1,96$	$\Delta\varphi = 2,04$	–	–
СКО поверхности от ПНС, мм	0,1	6,7	6,9	0,1	0,1

С целью определения влияния воздействий от устройств изменения положения и формы рефлектора на контролируемые геометрические параметры рефлектора (отклонения фокуса и фокальной оси, СКО относительно параболоида наилучшего соответствия (ПНС) [2]) был проведен ряд расчетов по имитации работы данных управляющих средств с использованием КЭМ выбранного сетчатого рефлектора.

Расчеты выполнялись для приращений длин оттяжек, связанных с концами спиц, от  $-20$  мм до  $+20$  мм относительно их исходных длин. Рассматривались следующие расчетные случаи:

1. Длины всех оттяжек уменьшены на 20 мм, что соответствует развалу рефлектора.

2. Длины всех оттяжек увеличены на 20 мм, что соответствует прискладыванию рефлектора.

3. Длины оттяжек изменены, имитируя поворот отражающей поверхности рефлектора как жесткого целого относительно оси  $Z$  (поворот в плоскости  $OXY$ ) в системе координат (СК) антенны. В СК антенны отражающая поверхность рефлектора описывается каноническим уравнением параболоида с фокальной осью вдоль оси  $X$ .

4. Длины оттяжек изменены, имитируя поворот отражающей поверхности рефлектора как жесткого целого относительно оси  $Y$  (поворот из плоскости  $OXY$ ) в СК антенны.

Воздействия прикладывались к настроенному рефлектору, у которого отклонения фокуса и фокальной оси, а также СКО относительно ПНС имеют минимально возможное значение. В данном случае ПНС вычислялся для массива точек, расположенных в местах пересечения шнуров фронтальной сети ФОС, которые, в соответствии с требованиями к конструкции рефлектора, должны находиться на поверхности параболоида, т. е. СКО относительно ПНС должно быть равно 0 мм. Результаты расчета представлены в таблице.

Результаты проведенного анализа могут быть сделаны следующие выводы:

– воздействия от устройства изменения формы рефлектора позволяют проводить подстройку при отклонениях формы отражающей поверхности с СКО от ПНС не более 6,8 мм;

– использование устройства для изменения пространственного положения рефлектора позволяет

управлять угловыми отклонениями фокальной оси рефлектора, вызванными влиянием внешних, внутренних факторов, в том числе вызванными работой устройства изменения формы рефлектора;

– возможность подстройки положения и формы отражающей поверхности рефлектора с использованием указанных средств должна быть проверена в ходе численного эксперимента и подтверждена по результатам соответствующих испытаний. Данные работы будут выполнены в ходе дальнейших исследований.

#### Библиографические ссылки

1. Пат. RU2350519 (С1), МПК В64G 1/22; H01Q 15/16. Развертываемый крупногабаритный рефлектор космического аппарата [Электронный ресурс] / Тестоедов Н. А. (RU) [и др.] ; заяв. ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» (RU). № 2007122219/11; заявл. 13.06.2007 ; опубл. 27.03.2009. URL: [http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content\\_ru/ru/inform\\_resources/](http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content_ru/ru/inform_resources/) (дата обращения: 15.05.2018).

2. Голдобин Н. Н. Математические методы, используемые для оценки точности положения и формы крупногабаритного рефлектора космического аппарата // Вестник СибГАУ. Красноярск, 2014. С. 93–100.

#### References

1. Pat. RU2350519 (C1), MPK B64G 1/22; H01Q 15/16. Razvertyvayemyy krupnogabaritnyy reflektor kosmicheskogo apparata [Elektronnyy resurs] / Testoyedov N.A. (RU) [i dr.]; zayavitel' OAO «Informatsionnyye sputnikovyye sistemy» imeni akademika M. F. Reshetnova» (RU). № 2007122219/11; zayavl. 13.06.2007 ; opubl. 27.03.2009. URL: [http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content\\_ru/ru/inform\\_resources/](http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content_ru/ru/inform_resources/) (accessed: 15.05.2018).

2. Goldobin N. N. Matematicheskiye metody, ispol'zuyemyye dlya otsenki tochnosti polozheniya i formy krupnogabaritnogo reflektora kosmicheskogo apparata // Vestnik SibSAU. Krasnoyarsk, 2014. P. 93–100.

© Голдобин Н. Н., 2018

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Ц. Джан, В. Н. Зимин, А. В. Крылов, С. А. Чурилин

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

*Рассматриваются крупногабаритные трансформируемые космические конструкции, имеющие разные конфигурации в транспортном состоянии и рабочем положении. Представлены результаты исследования динамики раскрытия таких конструкций.*

*Ключевые слова: трансформируемые конструкции, динамика, моделирование, движение, конфигурация, модель.*

## SOME ASPECTS OF MODELING OF TRANSFORMABLE SPACE STRUCTURES DYNAMICS

Ts. Dzhan, V. N. Zimin, A. V. Krylov, S. A. Churilin

Bauman Moscow State Technical University  
5/1, Baumanskaya 2-ya Str., Moscow, 105005, Russian Federation  
E-mail: zimmin@bmstu.ru

*Large transformable space structures having different configuration in transport and operating positions are under consideration. Results of the deployment dynamics investigations for such structures are presented.*

*Keywords: transformable structures, dynamics, modeling, movement, configuration, model.*

Интенсивное развитие космической техники ставит задачи создания принципиально новых крупногабаритных космических конструкций. Необходимым этапом их разработки является предварительное изучение характеристик свободного и управляемого движения методом математического моделирования динамики создаваемых крупногабаритных трансформируемых космических конструкций.

Вопросы математического моделирования динамики таких систем – предмет широкого исследования. Основные методы анализа механического поведения больших космических конструкций изложены [1]. Трансформируемые большие космические конструкции имеют различные конфигурации в транспортном состоянии и в рабочем положении на орбите. Процесс раскрытия (развертывания) разрабатываемых трансформируемых конструкций, как правило, индивидуален для каждой системы, тем не менее, в ряде случаев можно определить общий подход к моделированию динамики их раскрытия (развертывания). В качестве модели принимается простая, но достаточно хорошо учитывающая особенности ряда конструкций, состоящих из десятков, сотен и даже тысяч взаимосвязанных между собой шарнирными узлами элементов [2]. Под моделью динамики таких конструкций обычно понимают систему дифференциальных уравнений движения составляющих элементов этих сис-

тем, а под математическим моделированием – численное решение этих уравнений.

Элементы больших космических конструкций могут быть выполнены как из традиционных металлов, так и композиционных материалов. Раскрытие (развертывание) трансформируемых конструкций из транспортного состояния в рабочее положение на орбите обычно происходит автоматически при срабатывании механизма расчехлки за счет первоначально накопленной энергии пружин, расположенных в шарнирных узлах. Процесс раскрытия таких конструкций является чрезвычайно ответственным и определяется выполнением в заданной последовательности следующих его стадий: начальное страгивание элементов конструкции; перемещение и разворот элементов конструкции на соответствующие расстояния и углы до рабочего их положения (состояния); установка или фиксация в рабочем состоянии при определенной ориентации смежных элементов конструкции.

Таким образом, при рассмотрении таких конструкций мы имеем дело с системой многих тел. Для полного описания динамики системы многих тел требуется большое количество параметров, которые характеризуют геометрию, распределение масс, природу внешних сил и сил, действующих в местах соединений. Поэтому составить уравнения движения

трансформируемой конструкции с достаточно большим числом элементов и дать численное их решение при заданных начальных условиях и заданных возмущениях, которые могут иметь место в процессе раскрытия, весьма сложно.

Во-первых, это связано с необходимостью получения системы дифференциальных уравнений достаточно большого порядка, описывающей непрерывное движение системы многих тел.

Во-вторых, в процессе раскрытия при определенном относительном положении смежных элементов конструкции на них накладываются связи, ограничивающие их взаимное перемещение. Техническое исполнение налагаемых связей может быть самым разнообразным: различного рода упоры (фиксаторы). Установка элементов конструкции на упоры (фиксаторы) может происходить как поэтапно в процессе раскрытия трансформируемой конструкции, когда в некоторой последовательности происходит ограничение на относительное положение отдельных смежных элементов конструкции, так и одновременно (в один этап) всех элементов – в момент ее полного раскрытия.

Таким образом, установка элементов конструкции на упоры (фиксаторы) эквивалентна наложению импульсных связей в произвольный момент времени. При наложении таких связей возникает явление удара, которое приводит к скачкообразному изменению скоростей элементов раскрываемой конструкции.

Простейшая расчетная схема упоров (фиксаторов) может быть представлена в виде безмассовых упругого и демпфирующего элементов с соответствующими характеристиками. В большинстве практических случаев для определения коэффициентов жесткости упругого элемента и вязкой компоненты демпфирования модели упора (фиксатора) проводят экспериментальные исследования раскрытия элементов трансформируемой конструкции.

Значения коэффициентов жесткости упругого элемента и вязкой компоненты демпфирования модели упора (фиксатора) подбираются путем сравнения экспериментальных и численных результатов для трансформируемых конструкций, состоящих из малого числа звеньев. При установке элементов конструкции на упоры или фиксаторы при различных соотношениях коэффициентов жесткости упругого элемента и вязкой компоненты демпфирования модели возникают или затухающие осцилляционные движения, или аperiодические режимы движения элементов конструкции.

Для исследования процесса раскрытия (развертывания) трансформируемых космических конструкций можно воспользоваться программным комплексом MSC.ADAMS или программным комплексом автоматизированного динамического анализа многокомпонентных механических систем EULER. В данных программных комплексах построены модели и проведен численный анализ динамики раскрытия плоских кольцевых космических конструкций. Сопоставление экспериментальных данных с численными результа-

тами, полученными с использованием программных комплексов, подтвердило адекватность разрабатываемых моделей реальным изделиям.

Работоспособность трансформируемых конструкций определяется, главным образом, тем, насколько велики возникающие в них усилия при раскрытии (развертывании).

Задача определения прочности элементов трансформируемой космической системы при ее раскрытии (развертывании) формулируется следующим образом: определить напряженно-деформированное состояние упругой конструкции с заданными начальными скоростями и начальными перемещениями. Начальные перемещения принимаются равными нулю, а начальные скорости элементов конструкции принимаются равными скоростям, полученным в результате интегрирования уравнений движения.

Расчетная модель основана на методе конечных элементов, и анализ ее динамики сводится к решению задачи Коши для системы обыкновенных линейных дифференциальных уравнений второго порядка. Для прямого интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка использованы специальные процедуры, ориентированные на метод конечных элементов. Шаг интегрирования для обеспечения точности и устойчивости вычислительной схемы выбран на основе результатов решения задачи по определению частот собственных колебаний конструкции. Прочностной расчет проведен с использованием программного комплекса MSC.NASTRAN.

Уменьшить или исключить ударные нагрузки в процессе свободного (неконтролируемого) раскрытия (развертывания) можно за счет уменьшения величины первоначальной потенциальной энергии пружин, т.е. изменением упругой характеристики используемых в конструкции пружинных элементов. При этом соответственно уменьшаются угловые скорости в момент установки смежных элементов конструкции на упоры (фиксаторы). Это приведет к уменьшению величины скоростей, определяющих величину ударного импульса, действующего на рассматриваемую упругую трансформируемую конструкцию. Однако данный подход не всегда реализуем, так как с обеспечением плавного и надежного раскрытия (развертывания) трансформируемой конструкции необходимо еще гарантировать их последующее функционирование в рабочем состоянии на орбите. Поэтому для обеспечения «управляемого» перехода системы из транспортно-го состояния в рабочее положение необходимо либо дополнительно предусмотреть в конструкции привод с системой тросовой синхронизации, либо заменить пружины приводами. Это существенно и усложнит конструкцию, и увеличит ее массовые характеристики. Возможно создание больших трансформируемых космических конструкций на орбите, использующих для раскрытия (развертывания) приводы из материалов, обладающих эффектом памяти формы [3].

Существует несколько видов силовых приводов на основе материалов с памятью формы. Один вид мож-

но назвать одномерным приводом прямого действия, другой – силовым приводом с последствием, в схеме которого для создания усилия используется пружина.

#### Библиографические ссылки

1. Механика больших космических конструкций / Н. В. Баничук, И. И. Карпов, Д. М. Климов и др. М. : Факториал, 1997. 302 с.
2. Виттенбург Й. Динамика систем твердых тел. М. : Мир, 1980. 292 с.
3. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов / Г. А. Молодцов, Б. Е. Биткин, В. Ф. Симонов, Ф. Ф. Урмансов. М. : Машиностроение, 2000. 352 с.

#### References

1. Banichuk N. V., Karpov I. I., Klimov D. M. et al. *Mekhanika bol'shikh kosmicheskikh konstruktсий* [Mechanics of large space structures]. Moscow, Faktorial Publ., 1997, 302 p.
2. Vittenburg Y. *Dinamika system tverdykh tel* [Dynamics of solids systems]. Moscow, Mir Publ., 1980, 292 p.
3. Molodtsov G. A., Bitkin B. E., Simonov V. F., Urmansov F. F. *Formostabil'nyye i intellektual'nyye konstruktсии iz kompozitsionnykh materialov* [Form-stable and intelligent structures made of composite materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000, 352 p.

© Джан Ц., Зимин В. Н., Крылов А. В.,  
Чурилин С. А., 2018

## ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ АРМИРОВАНИЯ ШТАНГИ РЕФЛЕКТОРА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

А. С. Евдокимов, О. К. Валишевский, Д. О. Шендалев

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: evdokimov-as@iss-reshetnev.ru

*Рассматривается штанга крупногабаритного трансформируемого рефлектора. Представлены результаты расчета температурных деформаций для различных схем армирования труб звеньев штанги. Приведен сравнительный анализ механических и теплофизических свойств штанги с разными схемами армирования.*

*Ключевые слова: штанга, конечно-элементная модель, деформации, углепластик, схема армирования.*

## OPTIMIZATION OF LAMINATE OF REFLECTOR BOOM FOR DECREASE TEMPERATURE DEFORMATIONS

A. S. Evdokimov, O. K. Valishevsky, D. O. Shendalev

JSC 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 is considered. Article presents calculation results of temperature deformations for different boom tube laminate. Comparison analysis of mechanical and thermophysical properties of boom with different laminates.*

*Keywords: boom, finite element model, deformations, CFRP, laminate.*

К таким крупногабаритным конструкциям, как штанга, предъявляются высокие требования по стабильности при воздействии температурных факторов. Штанга должна удерживать рефлектор в рабочем положении с высокой точностью на всем сроке эксплуатации.

На рис. 1 показан общий вид рефлектора в рабочем положении (ОКР «Рефлектор-2025»). Штанга является ключевым конструктивным элементом, определяющим наибольший вклад в суммарные отклонения за счет температурных деформаций. Целью оптимизации являлось снижение уровня температурных деформаций штанги за счет схемы армирования труб звеньев штанги.

Длина штанги в рабочем положении достигает нескольких метров. Штанга (2) состоит из следующих конструктивных элементов: корневое звено, концевое звено и шарнирные узлы. Корневое и концевое звенья представляют собой цилиндрические трубы сплошного сечения, выполненные из углепластика. На конце корневого звена устанавливается шарнирный узел, через который штанга закрепляется на борту космического аппарата (3). Промежуточный шарнирный узел соединяет корневое и концевое звенья между собой. На концевом звене крепится рефлектор (1).

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 [2]. При правильном и рациональном использовании такой закономерности можно найти комбинацию углов укладки слоев, которая позволит существенно снизить температурные деформации.

Для звеньев штанги рассматривалась структура из шести слоев: три пары слоев с вариацией углов намотки  $[\pm A/\pm B/\pm B]$ , где «А» – угол намотки (армирования) слоя углепластика, предназначенный для обеспечения жесткости, а «В» – угол намотки (армирования) слоя углепластика, предназначенный для обеспечения теплопроводности по поперечному сечению. Диапазон изменения углов намотки «А» и «В»: от 5° до 65°.

Исходными данными для расчёта температурных деформаций штанги является информация о распределении температуры по элементам звеньев штанги, полученная в результате теплового анализа. В силу необходимости последовательного решения тепловой и механической задач был выбран программный комплекс ANSYS [1], который позволяет осуществлять передачу данных поля температуры по слоям на механическую модель. Поэтому создание тепловой и механической моделей и непосредственно сами расчёты выполнены в программном комплексе ANSYS [3].



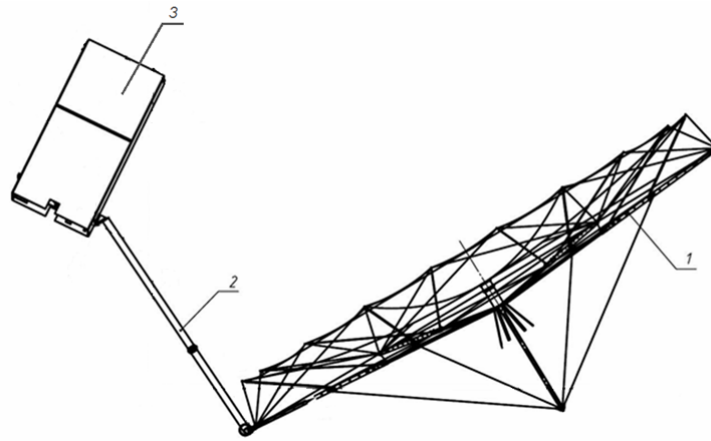


Рис. 1. Общий вид рефлектора в рабочем положении:  
1 – рефлектор; 2 – штанга; 3 – космический аппарат

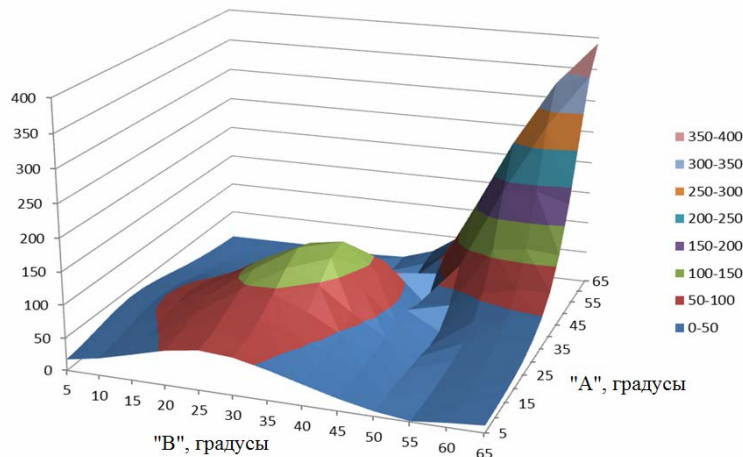


Рис. 2. Угловые отклонения конца штанги, угл. мин

При расчете температурных деформаций рассматривался предельный случай теплового потока, направленного с одной стороны перпендикулярно продольной оси штанги. При этом параметры орбиты, взаимное затенение и переизлучение между элементами конструкции штанги не учитывались, полагая, что в этом случае деформации будут максимальными.

В результате расчетов были вычислены линейные и угловые отклонения штанги, а также модуль упругости, модуль сдвига и коэффициент линейного температурного расширения для пакета из шести слоев с различными углами армирования.

Был проведен сравнительный анализ, который показал, что угол армирования слоев существенно влияет на деформации.

На рис. 2 показан график угловых отклонений конца штанги для различных углов намотки.

Выбор схемы армирования для штанги осуществлялся, исходя из требований по жесткости и минимальных отклонений штанги. В результате была выбрана схема армирования с минимальным значением КЛТР, удовлетворяющая этим требованиям. Таким

образом, оптимизация схемы армирования позволяет снизить температурные деформации почти в 40 раз.

#### 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 s.
2. Kompozicionnie materialy: Spravochnik / V. V. Vasilyev, V. D. Protasov, V. V. Bolotin et al. M. : Mashinostroyeniye, 1990. 512 s.
3. ANSYS, “ANSYS Academic Research”, 13.0 Ed, 2010.

© Евдокимов А. С., Валишевский О. К., Шендалев Д. О., 2018

## КОНСТРУКЦИЯ КРУПНОГАБАРИТНОГО ЗОНТИЧНОГО РЕФЛЕКТОРА С ШЕСТЬЮ СПИЦАМИ

А. П. Жуков<sup>1</sup>, О. К. Валишевский<sup>2</sup>, Д. О. Шендалев<sup>1</sup>, А. С. Евдокимов<sup>1</sup>,  
С. В. Пономарев<sup>1</sup>, В. С. Пономарев<sup>1</sup>, А. И. Величко<sup>2</sup>, В. И. Халиманович<sup>2</sup>

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

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

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

E-mail: zh@niipmm.tsu.ru

*Рассматривается конструкция перспективного крупногабаритного зонтичного сетчатого рефлектора с шестью спицами. Анализ конструкции производился методом конечных элементов с учетом геометрической нелинейности. Результаты расчетов показали принципиальную работоспособность предложенной конструкции.*

*Ключевые слова: сетчатый рефлектор, метод конечных элементов.*

## STRUCTURE OF THE LARGE-SIZED UMBRELLA-TYPE REFLECTOR WITH SIX SPOKES

A. P. Zhukov<sup>1</sup>, O. K. Valishevsky<sup>2</sup>, D. O. Shendalev<sup>1</sup>, A. S. Evdokimov<sup>1</sup>, S. V. Ponomarev<sup>1</sup>,  
V. S. Ponomarev<sup>1</sup>, A. I. Velichko<sup>2</sup>, V. I. Halimanovich<sup>2</sup>

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

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

E-mail: zh@niipmm.tsu.ru

*This work presents the prospective large-sized umbrella-type mesh reflector structure with six spokes. The analysis of structure is based on the finite-element method including geometrical nonlinearity. The results of calculations show the principal capacity for work of the proposed structure.*

*Keywords: mesh reflector, finite element method.*

В настоящей работе анализируется конструкция крупногабаритного зонтичного сетчатого офсетного рефлектора с силовым каркасом из шести спиц (см. рисунок).

Характерные геометрические параметры отражающей поверхности (ОП) составили следующие величины: диаметр вырезающего цилиндра – 12 м; фокусное расстояние – 7,4 м; клиренс – 3 м.

Анализ производился геометрически нелинейным методом конечных элементов, где для каждой составной части рефлектора определялся соответствующий тип конечных элементов.

Можно выделить несколько основных этапов в разработке конструкции рефлектора, а именно:

Описание модели, включающее: конструктивную схему рефлектора; характерные геометрические параметры и математическое описание формы ОП офсетного отражателя [1; 2]; схемы звеньев сетчатых спиц, штанги (с расчетом жесткости [3; 4]) и основания силового каркаса; расположение шнуров фронтальной (тыльной) сетей, а также шнуров силового каркаса; определение среднеквадратического откло-

нения улов ОП от теоретического профиля [2]; массы элементов рефлектора.

Проектный расчет прочности конструкции отражателя в рабочем положении в условиях космического пространства, где рассмотрено: состояние конструкции отражателя, в котором определяются действующие внутренние усилия; распределение отклонений отражающей поверхности отражателя от идеального параболоида; натяжения шнуров фронтальной и тыльной сетей, а также шнуров силового каркаса; действующие нагрузки в звеньях спиц силового каркаса; расчет устойчивости конструкции отражателя.

Проектный расчет точности рефлектора с учетом влияния эксплуатационных факторов: оценка влияния на точность внутренних усилий конструкции рефлектора; оценка влияния на точность солнечного светового давления.

Проектный расчет собственных форм и частот рефлектора на этапе раскрытия, в котором получены собственные формы и частоты рефлектора в нераскрытом и раскрытом положениях.

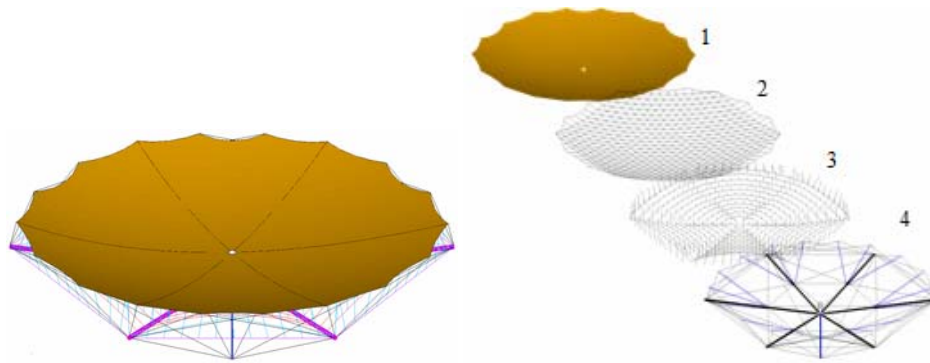


Схема конструкции зонтичного рефлектора с шестью спицами:  
1 – отражающая поверхность; 2 – фронтальная сеть; 3 – тыльная сеть; 4 – силовой каркас

Проектный расчет собственных форм и частот рефлектора в рабочем положении. Проектный расчет температурных полей и влияние температурных деформаций на точность формы ОП. Расчет проведен для геостационарной и высокоэллиптической орбит Земли под действием солнечного и инфракрасного излучения.

Для вышеперечисленных этапов, были произведены соответствующие расчеты, показывающие принципиальную работоспособность предложенной конструкции.

#### Библиографические ссылки

1. Tibert G. Deployable tensegrity structures for space applications. Doctoral thesis. Royal Institute of Technology, Department of Mechanics, Stockholm, Sweden. 2002. 220 p
2. Яшук А. А. Моделирование, алгоритмы и комплекс программ прогнозирования термомеханического поведения крупногабаритного зонтичного рефлектора : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск : ТГУ. 2005. 125 с.
3. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. М. : Наука, 1979. 744 с.

4. Прочность, устойчивость, колебания : справочник : в 3 т. / под ред. И. А. Биргера, Я. Г. Пановко. М. : Машиностроение, 1968. Т. 1. 831 с.

#### References

1. Tibert G. Deployable tensegrity structures for space applications. Doctoral thesis. Royal Institute of Technology, Department of Mechanics, Stockholm, Sweden. 2002. 220 p
2. Yashchuk A. A. Modelirovanie, algoritmy i kompleks programm prognozirovaniya termomekhanicheskogo povedeniya krupnogabaritnogo zontichnogo reflektora: dis. kand. fiz.-mat. nauk. Tomsk, TGU. 2005. 125 p. (in Russ.).
3. Rabotnov Yu. N. Mekhanika deformiruемого tverdogo tela. M. : Nauka, 1979. 744 p. (in Russ.).
4. Prochnost, ustojchivost, kolebaniya. Spravochnik v 3 t. / Pod red. I. A. Birgera, Ya. G. Panovko. M. : Mashinostroenie, 1968. T. 1. 831p. (in Russ.).

© Жуков А. П., Валишевский О. К., Шендалев Д. О., Евдокимов А. С., Пономарев С. В., Пономарев В. С., Величко А. И., Халиманович В. И., 2018

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ PULSESPI ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРЕЦИЗИОННОМУ КОНТРОЛЮ ТЕРМОДЕФОРМАЦИЙ

П. С. Завьялов<sup>1</sup>, М. С. Кравченко<sup>1\*</sup>, В. В. Уржумов<sup>1</sup>, В. А. Куклин<sup>2</sup>, В. М. Михалкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН  
Российская Федерация, 630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41

<sup>2</sup>АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

\*E-mail: max@tdisie.nsc.ru

*Для определения термодформаций антенн применяется система на основе метода электронной спекл-интерферометрии (ESPI), обладающего чувствительностью порядка 0,05 мкм. Испытания системы проводятся на тестовом объекте размером 1,5 м.*

*Ключевые слова: электронная спекл-интерферометрия, метод пространственного фазового сдвига, система измерения термодформаций поверхностей PulsESPI System.*

## METROLOGICAL CHARACTERISTICS INVESTIGATION OF THE PULSESPI SYSTEM FOR THERMODEFORMATIONS PRECISION CONTROL

P. S. Zavyalov<sup>1</sup>, M. S. Kravchenko<sup>1\*</sup>, V. V. Urzhumov<sup>1</sup>, V. A. Kuklin<sup>2</sup>, V. M. Mihalkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS  
41, Russkaya Str., Novosibirsk, 630058, Russian Federation

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

\*E-mail: max@tdisie.nsc.ru

*Based on the method of electronic speckle interferometry (ESPI) system used to determine the thermal deformations of the antenna. The method has a sensitivity 0.05  $\mu\text{m}$ . Experiments with the system are carried out on a test object measuring 1,5 m.*

*Keywords: electronic speckle interferometry, method of spatial phase shift, measurement system for thermal deformations of surfaces PulsESPI System.*

Для определения температурного влияния на геометрические параметры элементов космических аппаратов в условиях имитации факторов воздействия космического пространства необходим высокоточный и надёжный контроль термодформаций объектов размером около 1,5 м. Требуемые метрологические характеристики контроля обеспечиваются методом спекл-интерферометрии [1]. Так, предъявляемым требованиям для выполнения контроля термодформаций элементов космических аппаратов соответствует метод электронной спекл-интерферометрии (electronic speckle interferometry – ESPI). ESPI [2; 3] имеет широкое применение при неразрушающем контроле деформаций, смещений, вибраций разного рода исследуемых сред, а также, в отличие от стандартных способов интерферометрии, этот метод даёт возможность контролировать объекты с оптически грубой поверхностью (случайно-неоднородной), которой обладает большинство элементов аппаратов в авиакосмической промышленности.

В оптической схеме ESPI когерентное излучение лазера 1 направляется зеркалом 3 и рассеивается объективом 4 на поверхности объекта 7 (рис. 1). Про-

странственное разделение опорного и объектного плеча происходит на светоделителе 2. Далее осуществляется сложение опорной волны, рассеянной объективом 5 и направленной светоделителем 8, с рассеянной объектом волной, формирующейся объективом 6. От относительного фазового сдвига этих волн в результате деформаций на объекте 7 зависит распределение интенсивности итоговой спекл-картины. Камерой 9 регистрируются начальное и деформированное состояния объекта. Компьютером 10, в результате выполнения ряда арифметических действий, образуется картина интерференционных полос (рис. 2), которая расшифровывается и преобразуется в поле перемещений контролируемой поверхности.

В рамках выполнения СЧ ОКР на создание рабочего места измерения термодформаций поверхностей, приобретена система измерения термодформаций поверхностей PulsESPI System (далее – PulsESPI System), производства компании Carl Zeiss Optotechnik GmbH, Германия.

Известно, что, ранее, ESPI-система использовалась для измерения деформаций рефлектора в термовакуумной камере в DLR в Берлине [4].

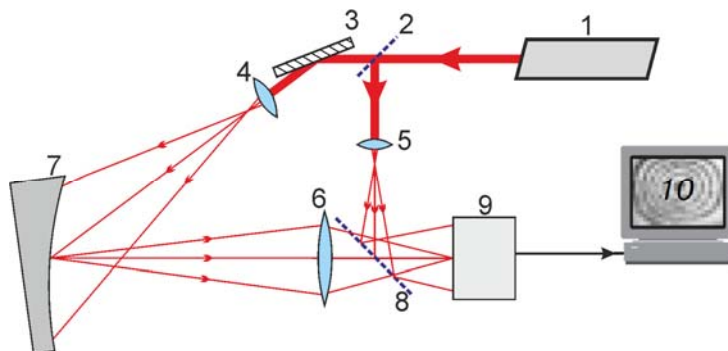


Рис. 1. Принципиальная схема спекл-интерферометра (обозначение см. в тексте)



Рис. 2. Интерференционные полосы

Измерения базируются на методе пространственного фазового сдвига [5], чувствительность которого 50 нм. Данный метод показывает хорошие результаты в количественном анализе корреляционных полос высокого контраста, полученных с использованием импульсного лазера [6]. Основными компонентами PulsESPI System являются системы: рубиновый импульсный лазер (длина волны 694 нм, энергия импульса 1 Дж, длительность импульса 20 нс, длина когерентности 1 м), синхронизации, регистрации изображений (разрешение  $1280 \times 1024$  пикс, размер пикселя  $6,7 \times 6,7$  мкм), анализа данных (FRAMESplus).

Для проведения испытаний PulsESPI System разработан стенд, схема которого представлена на рис. 3.

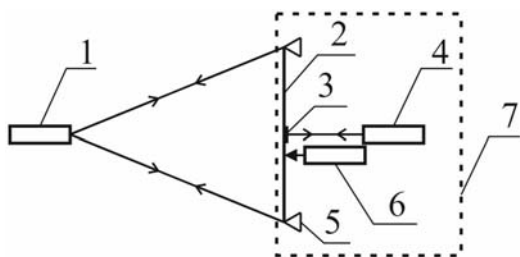


Рис. 3. Схема стенда для испытаний PulsESPI System

В качестве объекта испытаний используется алюминиевый лист 2 с размерами  $1,5 \times 1,5$  м. С одной стороны объекта размещалась PulsESPI System 1, а с другой стороны объекта помещается отражатель 3 и интерферометр перемещений Renishaw XL-80 4. Объект жестко закрепляется к неподвижным колоннам 5, тем самым обеспечивается необходимая жесткость закрепления. Измеряемая Renishaw область, с помощью актюатора 6 деформируется. В качестве результатов измерений сравниваются показания перемещения в точке, которые регистрирует Renishaw, и соответствующая ей точка с карты деформаций, получаемой с PulsESPI System.

Интерферометр Renishaw и колонны объекта закреплены на массивном основании 7, что обеспечивает их неподвижность друг относительно друга во время испытаний. Для обеспечения точности измерений были устранены внешние источники вибраций, устранены колебания точки измерения, изолированы оптические пути, обеспечена синхронность регистрации показаний XL-80 Renishaw и PulsESPI System на уровне не более 0.01 с.

Проведено три вида испытаний:

1. Объект неподвижен, воздействия на объект не оказываются. В результате определялась погрешность измерений между соседними кадрами (измерениями).

2. Деформация между двумя соседними кадрами постоянно увеличивается. Начинается с величины 0,5 мкм между кадрами и заканчивается величиной 8 мкм. Данное испытание проводилось для определения диапазона измерения между двумя соседними кадрами.

3. Деформация между кадрами постоянная (около 4 мкм). При этом регистрируется несколько десятков кадров. Определяется суммарная деформация, при которой погрешность измерений не превышает  $\pm 1$  мкм. Определялся суммарный диапазон измерений деформаций.

В результате, погрешность измерения между двумя последовательными измерениями (кадрами) составила не более  $\pm 0,1$  мкм. Максимальная деформация между двумя последовательными измерениями (кадрами) – не более 5 мкм. При большем шаге, возникают проблемы с обработкой изображений, возникает пропуск полос. Максимальная суммарная деформация за весь период испытаний составила не более 200 мкм. При больших диапазонах погрешность становится более  $\pm 1$  мкм.

#### Библиографические ссылки

1. Рябухо В. П. Спекл-интерферометрия // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7, № 5. С. 102–109.
2. Ульянов С. С. Что такое спеклы // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 5. С. 112–116.
3. Каленков Г., Штанько А. Цифровая корреляционная спекл-интерферометрия // Фотоника. 2010. № 4. С. 58–60.

4. Measurement of the Thermal Deformation of a Highly Stable Antenna with Pulse ESPI / Nösekabel E. H., Ernst T. et al. // 18th International Congress on Photonics, Munich, Germany, 2007. Vol. 6616. P. 18–21.

5. Pedrini G., Tiziani H. J. Double-pulse electronic speckle interferometry for vibration analysis. // Applied optics, 1994. Vol. 33, No. 34. P. 7857–7863.

6. Pulsed laser in E.S.P.I. / Cookson T.J., Butters J. N. et al. // Optics and Laser Technology, 1978. Vol. 10. P. 119–124.

#### References

1. Ryabukho V. P. Speckle-interferometry // Sorosovsky Educational Journal. 2001. T. 7. № 5. P. 102–109.
2. Ulyanov S. S. What is speckle // Sorosovsky Educational Journal. 1999. № 5. P. 112–116.
3. G. Kalenkov A. Shtan'ko. Digital correlation speckle-interferometry // Photonics. 2010. № 4. P. 58–60.
4. Measurement of the Thermal Deformation of a Highly Stable Antenna with Pulse ESPI / Nösekabel E. H., Ernst T. et al. // 18th International Congress on Photonics, Munich, Germany, 2007. Vol. 6616. P. 18–21.
5. Pedrini G., Tiziani H. J. Double-pulse electronic speckle interferometry for vibration analysis. // Applied optics, 1994. Vol. 33, No. 34. P. 7857–7863.
6. Pulsed laser in E.S.P.I. / T. J. Cookson, J. N. Butters et al. // Optics and Laser Technology, 1978. Vol. 10. P. 119–124.

© Завьялов П. С., Кравченко М. С., Уржумов В. В., Куклин В. А., Михалкин В. М., 2018

УДК 678.6

## ФЕНОПЛАСТЫ, СОДЕРЖАЩИЕ ФЕНОЛФОРМАЛЬДЕГИДНЫЕ СМОЛЫ

Т. С. Зайцева

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
\*E-mail: zaytseva0508@gmail.com

*Представлены основные принципы получения фенопластов из феноло-формальдегидной смолы и изготовление деталей на их основе.*

*Ключевые слова: фенолформальдегидные смолы, фенопласты.*

## PHENOLIC PLASTICS CONTAINING PHENOL-FORMALDEHYDE RESIN

T. S. Zaitseva

JSC „Krasnoyarsk Machine Building Plant“  
29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
\*E-mail: zaytseva0508@gmail.com

*The paper presents the basic principles of obtaining phenolic plastics from phenol-formaldehyde resin and manufacturing parts based on them.*

*Keywords: phenol-formaldehyde resins, phenolic plastics.*

При создании широкого спектра изделий общего и специального назначения в качестве связующих используют термореактивные материалы [1–4] фенолформальдегидные смолы (фенопласты) в которых формальдегид взят хотя бы в небольшом избытке. Получаемые смолы резольного типа обладают способностью плавиться и растворяются в органических растворителях, с последующим переходом при нагревании в неплавкое и нерастворимое состояние за счет образования пространственной структуры при участии реакционноспособных атомов водорода фенола и избытка метилольных групп [2].

Применение фенолов различной структуры в процессе синтеза фенолформальдегидных смол является основой для проведения работ по созданию модифицированных смол, обладающих повышенными эксплуатационными характеристиками, требуемым уровнем реологических свойств, прочностью и электрическими показателями.

В зависимости от требуемого комплекса свойств в качестве основного сырья для получения продуктов конденсации с формальдегидом могут быть использованы следующие одноатомные фенолы (фенол, орто-, мета- и пара-крезолы, 2,3-, 2,4-, 2,5-, 2,6-, 3,4- и 3,5-ксиленолы), многоатомные фенолы (диоксibenзолы, триоксibenзол, орто-оксидифенил, пара-оксидифенил), фенольные соединения с гетероатомами (диоксидифенилсульфоны, хлорфенолы, нафтолсульфокислоты) и другие.

Высшие ароматические фенолы могут быть использованы в синтезе термостойких полимеров. Полициклические соединения – пирен, нафталин, антра-

цен, карбазол, фенантрен, аценафтен и другие в комбинации с фенолом также применяют для получения модифицированных фенольных смол. Эти смолы обладают высокой термостойкостью (до +400 °С), которая возрастает с увеличением числа ароматических циклов в молекулярной цепи.

В процессе создания фенопластов производится смешение резольных смол с другими функциональными компонентами (такими как наполнители, пластификаторы, антистатики, красители и др.) с получением пресс-порошков, которые для удобства последующей переработки компактируют в таблетки. При этом основным методом переработки пресс-материалов является метод горячего прессования.

В процессе прессования, в котором материал, находящийся под давлением в нагретой форме, расплавляется, заполняет все формуемое пространство и выдерживается до полного отверждения при температуре до +170 °С и повышенном давлении. Происходящая в олигомерной фазе химическая реакция образования пространственной структуры обеспечивает переход пресс-материала в неплавкое состояние и формирование изделия. При этом процесс прессования характеризуется тремя основными показателями температурой, давлением и временем выдержки.

Изменение этих технологических параметров сказывается не только на длительности технологического цикла прессования, но и на качестве готовых изделий [5].

Основными направлениями использования фенолформальдегидных пресс-порошков являются создание специальных изделий электротехнического

назначения (выключатели, патроны, штепсельные розетки, вилки), детали для теле- и радиоаппаратуры, в автомобилестроении, в авиационной и космической технике [1; 2].

#### 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. Бахман А., Мюллер К. Фенопласты. М. : Химия, 1978. 288 с.
3. Петов Н. А. Производство пресс-материалов в России // Полимерные материалы. 2008. № 10. С. 4–9.
4. ГОСТ 28804–90. Массы формовочные фенольные. Общие технические условия. М. : Стандартинформ, 2007. 12 с.
5. 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. Technologii proizvodstva, svojstva i oblasti primeneniya kompozicij na osnove fenolformal'degidny'x smol [Production technologies, properties and applications of compositions based on phenol-formaldehyde resins] // Nauchnoe obozrenie. Texnicheskie nauki. 2017. № 2. P. 96–114 (In Russ.)
2. Baxman A., Myuller K. Fenoplasty. M. : Ximiya, 1978. 288 p.
3. Petov N. A. Proizvodstvo press-materialov v Rossii [Production of press materials in Russia] // Polimerny'e materialy. 2008. № 10. P. 4–9 (In Russ.)
4. GOST 28804–90. Massy formovochny'e fenol'ny'e. Obshhie texnicheskie usloviya. M. : Standartinform, 2007. 12 p.
5. Polimerny e kompozicionny e materialy. Svojstva. Struktura. Technologii. / Pod red. A. A. Berlina. SPb. : Professiya, 2009. 560 p.

© Зайцева Т. С., 2018



УДК 629.78.064.56

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ ШТАНГИ ФЕРМЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ АНТЕННЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

С. А. Зоммер, С. И. Немчанинов

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: semen\_zommer@mail.ru

*Описывается анализ основных конструкций длинномерных трансформируемых штанг, выбор типовой конструкции разрабатываемой штанги и процесс создания параметрической модели секции штанги, удовлетворяющей заданным требованиям.*

*Ключевые слова: космический аппарат, антенные системы, трансформируемая штанга.*

## DESIGNING OF THE DEPLOYABLE MAST OF TRUSS STRUCTURE FOR THE ANTENNA SYSTEMS OF THE SPACECRAFT

S. A. Zommer, S. I. Nemchaninov

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: semen\_zommer@mail.ru

*The article describes the analysis of the basic designs of long-length deployable masts, the choice of the standard design of the mast being developed and the process of creating a parametric model of the mast section meeting the specified requirements.*

*Keywords: spacecraft, antenna systems, deployable mast.*

Актуальность работы обусловлена тенденциями в современных направлениях развития систем спутниковой связи в части увеличения размеров трансформируемых рефлекторов, а как следствие, размещения их в рабочем положении на значительном расстоянии от корпуса космического аппарата. Используемые в настоящее время устройства перевода рефлекторов из сложенного положения на космическом аппарате в требуемое положение относительно облучателя практически исчерпали свои возможности по жесткости в рабочем положении.

Критичность технологии создания высокоточных размеростабильных штанг определяется требованиями к точности положения площадки для стыковки с рефлектором и размеростабильностью штанги на протяжении 15 летнего срока активного существования:

– повторяемость раскрытия не более 0,1 мм в линейном выражении и не более 0,003° в угловом выражении;

– размеростабильности не более 1,2 мм в линейном выражении и не более 0,0078° в угловом выражении.

Критичность технологии создания длинномерных трансформируемых штанг ферменной конструкции и телескопических штанг определяется длиной штанги и требованием к жесткости в развернутом положении:

– длина (30–60) и более метров;

– частота собственных колебаний не менее 0,1 Гц.

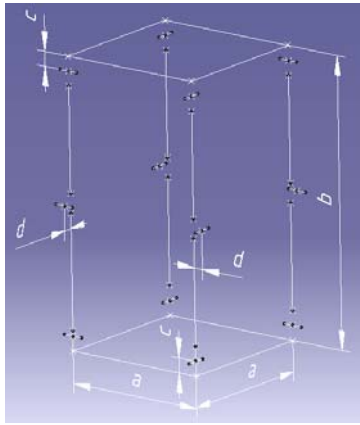
В результате проведения обзора и патентного поиска конструкций трансформируемых ферменных

штанг, были определены основные концепции, кинематические схемы и основные параметры разработанных на сегодняшний день ферменных трансформируемых штанг, которые могут использоваться в качестве средств выдвижения или отодвижения для антенных систем космического аппарата.

В качестве прототипа для разрабатываемой длинномерной трансформируемой штанги ферменной конструкции было решено использовать концепцию жесткой шарнирной ферменной штанги.

Используя принципы выбранной концепции возможно формировать длинномерные штанги с высокими показателями жесткости, размеростабильности и повторяемости раскрытия. Также данная концепция подразумевает использование жестких силовых элементов в виде композитных труб, соединенных фитингами, в случае горизонтальных площадок, и шарнирными узлами между вертикальными звеньями.

Создание параметрической модели сборки секции трансформируемой штанги позволит быстро изменять геометрию конструкции. Что позволяет разрабатывать конструкцию без привязки к определенной геометрии. Таким образом, при наличии исходных данных без определенных геометрических требований, целесообразно спроектировать параметрическую модель, все элементы которой, будут способны перестраиваться в зависимости от заданных исходных данных. На рисунке, *a* изображена параметрическая модель штанги, с изображением взаимозависимых параметров, настраиваемых пользователем.



а



б

Параметрическая и твердотельная модели секции штанги

При дальнейшем анализе готовой модели на жесткость, размеростабильность и повторяемость раскрытия возможно изменение её геометрических параметров в случае несоответствия полученных значений анализа с требуемыми.

Параметрическая модель секции штанги может быть использована как универсальный инструмент для проектов, требующих разработку длинномерных трансформируемых штанг ферменной конструкции.

Проектирование штанги проводилось в системе автоматизированного проектирования (САПР) CATIA (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application) V5 24R.

Возможности программного аппарата CATIA позволяют импортировать созданный механизм в сборки более высокого уровня, в которых будет проводиться трехмерное твердотельное моделирование. При этом появляется возможность использовать анализ пересечений деталей во время раскрытия секции.

В качестве контекста для моделирования твердотельных элементов используется параметрическая модель сборки каркаса секции. Созданная 3D твердотельная параметрическая модель является основой для дальнейшего детального проектирования всех элементов конструкции секции длинномерной трансформируемой штанги ферменной конструкции (см. рисунок, б).

Данная модель позволяет производить быстрое изменение геометрической конфигурации секции, так как имеет широкий набор изменяемых параметров, определяющих все геометрические характеристики фермы.

Таким образом, в результате выполненной работы были обозначены основные требования к длинномерным трансформируемым штангам ферменной конструкции и проведен патентный поиск. На основе проведенного анализа выбранная типовая конструкция, максимально подходящая для решения поставленных задач. Создана параметрическая модель секции штанги, позволяющая за короткий промежуток времени получить большое количество конструктивных вариантов исполнения штанги.

#### References

1. Mikulas M. M., Thomson, M. State of the art and technology needs for large space structures, vol.1: New and Projected Aeronautical and Space Systems, Design Concepts, and Loads of Flight-Vehicle Materials, Structures, and Dynamics – Assessment and Future Directions. ASME, New York, 1994. Ch. 3. P. 173–238.
2. Pellegrino S. Large retractable appendages in spacecraft. Journal of Spacecraft and Rockets 32, 6 (1995), 1006–1014.
3. Jensen F., Pellegrino, S. Arm development—review of existing technologies. Tech. Rep. CUED/D-STRUCT/TR198, Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge, UK, 25 June, 2001.
4. Webb J. E. Deployable lattice column. United States Patent 3,486,279. Filed 30 November, 1967, Granted 30 December, 1969.
5. AEC-Able Engineering Company, Inc. <http://www.aec-able.com> (15 November, 2001).

© Зоммер С. А., Немчанинов С. И., 2018

УДК 629.78.064.56

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАСКРЫТИЯ ЗОНТИЧНОГО РЕФЛЕКТОРА С ЖЕСТКОЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТЬЮ

А. В. Иванов, В. В. Шальков

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: 2481ghj@mail.ru

*Описывается анализ основных конструкций механизмов раскрытия зонтичных рефлекторов с жесткой центральной частью, выбор типовой конструкции разрабатываемого механизма раскрытия, разработка конструкции механизма раскрытия рефлектора.*

*Ключевые слова: космический аппарат, антенные системы, трансформируемый зонтичный рефлектор, механизм раскрытия.*

## DESIGN OF THE MECHANISM OF THE DISCLOSURE OF THE UMBRELLA REFLECTOR WITH THE HARD CENTRAL PART

A. V. Ivanov, V. V. Shal'kov

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: 2481ghj@mail.ru

*The article describes the analysis of the basic constructions of the mechanisms of opening the umbrella reflectors with a rigid central part, the choice of the standard design of the disclosed opening mechanism, and the design of the mechanism for opening the reflector.*

*Keywords: Spacecraft, antenna systems, deployable umbrella reflector, opening mechanism.*

В последнее время наблюдается высокий интерес к трансформируемым сетчатым рефлекторам с жесткой центральной частью. Связанно это с тем, что наличие жесткой центральной части позволяет задавать более жесткие требования по точности к рефлектору и тем самым получать более точную отражающую поверхность рефлектора. Однако наличие жесткой центральной части, приводит к тому, что исполнительные механизмы привода управления должны быть расположены у каждой спицы и объединены кольцевой связью.

Подобное расположение исполнительных механизмов привода управления может привести к асинхронному раскрытию рефлектора. На сегодняшний день, разработка механизма раскрытия рефлектора с высокой степенью синхронности раскрытия является весьма актуальной задачей.

Проведения обзора и патентного поиска конструкций механизмов раскрытия зонтичных рефлекторов с жесткой центральной частью, позволило определить основные концепции, кинематические схемы и основные параметры разработанных на сегодняшний день механизмов раскрытия, которые могут использоваться для раскрытия рефлекторов с жесткой центральной частью.

В качестве прототипа для разрабатываемого механизма раскрытия рефлектора с жесткой центральной

частью было решено использовать концепцию механизма с двойным зубчатым кольцом и рычажными узлами.

Для того чтобы обеспечить момент, приходящий на каждую спицу в конце раскрытия, значение которого напрямую зависит от момента сопротивления при натяжения сетеполотна и определить значения ключевых параметров, была разработана параметрическая кинематическая схема разрабатываемого механизма (рис. 1, а).

В разработанной параметрической модели, было рассмотрено три положения механизма:

- транспортировочное положение (фиолетовые линии на рис. 1, а);
- промежуточное положение (голубые линии на рис. 1, а);
- рабочее положение (зеленые линии на рис. 1, а).

Данная параметрическая модель, помимо изменения конфигураций механизма, путем задания различных параметров, способна проводить силовой расчет получаемых конфигураций.

Использование параметрической кинематической модели позволило определить оптимальные значения ключевых параметров механизма:

- длина тяги = 125 мм;
- длина плеча = 60 мм;
- угол поворота спиц = 76°.

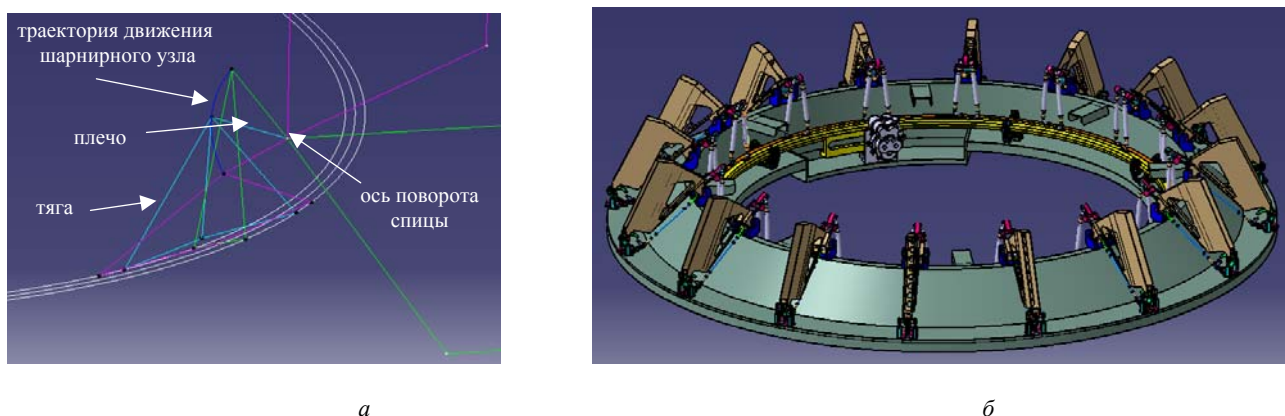


Рис. 1. Параметрическая и твердотельная модели механизма раскрытия

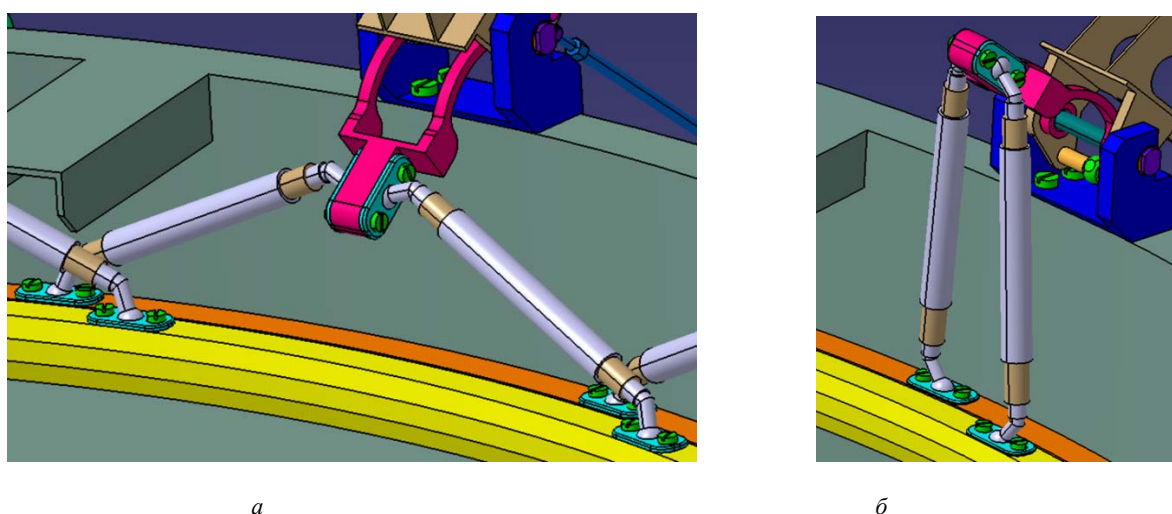


Рис. 2. Транспортировочное и рабочее положение тяг

Данные значения ключевых параметров, позволяют получить момент, приходящий на спицу в конце раскрытия примерно 2,6 кг·м, при крутящем моменте привода 2,1 кг·м.

Параметрическая модель механизма раскрытия может быть использована, как универсальный инструмент для проектирования аналогичных механизмов, с другими значениями ключевых параметров.

Проектирование механизма раскрытия проводилось в системе автоматизированного проектирования. Созданная 3D твердотельная модель проектируемого механизма раскрытия рефлектора с жесткой центральной частью представлена на рис. 1, б.

В выбранной концепции, на стадии проектирования, была произведена модернизация рычажных узлов, которая заключалась в использовании сферических шарниров в соединениях: кольцо-тяги, тяга-спица. Это позволило снизить количество тяг до двух и тем самым получить более надежную и точную конструкцию. Транспортировочное и рабочее положения рычажного узла представлены на рис. 2, а, б соответственно.

Спроектированный механизм раскрытия рефлектора с жесткой центральной частью, на протяжении всего раскрытия создает жесткую связь между приводом и спицами, а также обладает малым количеством точек регулировки, что позволяет получить механизм с высокой степенью синхронности раскрытия.

Раскрытие рефлектора выполняется следующим образом. Электромеханический привод начинает вращать кольца, соединенные с кольцами рычажные механизмы переводят спицы из транспортировочного положения в рабочее положение.

Таким образом, в результате выполненной работы был проведен анализ аналогов, на основе которого были определены принцип работы и конструктивные особенности разрабатываемого механизма раскрытия зонтичного рефлектора.

Далее была разработана параметрическая модель механизма раскрытия рефлектора в целях определения оптимальных значений ключевых параметров, после чего, была спроектирована твердотельная модель механизма раскрытия рефлектора.

### Библиографические ссылки

1. Величко А. И., Кисанов Ю. А. Привод разворачивания трансформируемого сетчатого рефлектора с жесткой центральной частью. 2015.
2. Тимофеев А. Н. Инженерно-квалификационная модель трансформируемого рефлектора антенны. 2017. 168 с.
3. Конструкторская документация на рефлектор КА «Луч-5А».
4. Баничук Н. В., Карпов Н. И. Механика больших космических конструкций. 1977. 302 с.

### References

1. Velichko A. I., Kisanov Yu. A. The deployment of a transformable mesh reflector with a rigid central part. 2015.
2. Timofeev A. N. Engineering-qualifying model of a transformable antenna reflector. 2017. 168 p.
3. Design documentation for the reflector of the spacecraft "Luch-5A".
4. Banichuk N. V., Karpov N. I. Mechanics of large space structures. 1977. 302 p.

© Иванов А. В., Шальков В. В., 2018

## МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОГО МАКЕТА МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

А. А. Иголкин, А. И. Сафин, А. Г. Филипов\*

Самарский национальный исследовательский институт имени академика С. П. Королева  
Российская Федерация, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34  
\*E-mail: iskander-filipov@yandex.ru

*Приведена методика экспериментального определения динамического поведения изделий ракетно-космической техники на примере малого космического аппарата. Приведено сравнение полученных экспериментальным путём модальных характеристик (собственных форм и частот) с расчётными модальными характеристиками конечно-элементной модели (КЭМ) того же объекта. Экспериментальное определение собственных форм и частот проводилось с помощью метода сканирующей лазерной виброметрии, расчётный модальный анализ – методом конечных элементов с использованием пакета конечно-элементного анализа MSC.Patran/Nastran. Сформулированы цели и задачи, приведено описание основных этапов модального анализа. Для получения достоверных нагрузок, действующих на элементы космических аппаратов, требуется уточнение их конечно-элементных моделей. Полученные в результате проведения работ динамические характеристики элементов конструкции космического аппарата (КА) позволят в дальнейшем создавать более достоверные и точные динамические модели КА на этапе проектирования, что в свою очередь повысит точность расчётов нагружения КА и надёжность изделий в целом.*

*Ключевые слова:* модальный анализ, космический аппарат, динамическая модель, конечно-элементная модель, амплитудно-частотная характеристика, верификация.

## MODAL ANALYSIS OF THE DYNAMIC MODEL OF A MOCKUP, A SMALL SPACECRAFT

A. A. Igolkin, A. I. Safin, A. G. Filipov\*

Samara National Research Institute named after academician S. P. Korolev  
34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation  
\*E-mail: iskander-filipov@yandex.ru

*The article describes method of experimental determination of dynamic behavior of rocket and space equipment, using the example, a small spacecraft. Experimentally obtained modal characteristics (natural modes and frequencies) are compared with modal characteristics calculated for the said spacecraft using the finite element model (FEM). The natural modes and characters of the spacecraft were experimentally obtained using scanning laser vibrometry; the modal analysis was performed using finite elements and the MSC.Patran/Nastran FEM package. Objectives and tasks have been formulated; main stages of the modal analysis have been described. FEMs of spacecraft parts must be improved to obtain precise loads applied to such parts. Dynamic characteristics of spacecraft structural elements obtained during the research will allow creating more precise and reliable spacecraft dynamic models at the design stage; this, in its turn, will improve precision of load calculations and reliability of the spacecraft in general.*

*Keywords:* modal analysis, spacecraft, dynamic model, finite element model, amplitude-frequency characteristic, verification.

**Введение.** Модальный анализ элементов аэрокосмической техники составляет часть комплексной программы наземной экспериментальной отработки перспективных образцов ракетно-космической техники.

Анализ мод колебаний на основе данных, полученных в результате испытаний, обеспечивает получение определённого описания реакции конструкции, которая может быть оценена в сравнении с проектной спецификацией. Анализ также позволяет получить модальную модель, которая позволяет определить влияние конструктивных модификаций или предсказать поведение конструкции при изменяющихся рабочих условиях.

Целью настоящей работы являлось получение экспериментальных и расчётных параметров динамического поведения объекта испытания (ОИ) для после-

дующего сравнения и верификации (подтверждения) расчётной конечно-элементной динамической модели изделия.

**Расчётный модальный анализ КЭМ ОИ.** Процедура экспериментального подтверждения (верификации) начинается с построения КЭМ. В настоящей работе КЭМ и расчёты её собственных форм и частот (модальный анализ) выполнены с использованием программного комплекса MCS Patran/Nastran.

При пренебрежении демпфированием собственные частоты КЭМ с  $n$  степенями свободы описываются уравнением [1]:

$$[M]\{\bar{u}\} + [K]\{u\} = 0,$$

где  $[K]$  и  $[M]$  – матрицы жёсткости и масс;  $\{\bar{u}\}$ ,  $\{u\}$  – векторы ускорений и перемещений в узлах КЭМ.

## Сравнение частот «основных» целевых мод

Номер моды	Расчетные частоты, Гц		Экспериментально определенные частоты, Гц	Погрешность, %	
	до коррекции	после коррекции		до коррекции	после коррекции
1	16,67	13,75	14,85	12,26	-7,41
2	17,11	18,76	22,399	-23,61	-16,25
3	30,91	26,25	28,784	7,39	-8,8
4	50,4	34,75	34,579	45,75	0,49

В результате расчётного модального анализа в диапазоне частот от 5 до 130 Гц получены АЧХ ОИ.

**Модальные испытания.** Модальным испытаниям подвергался динамический макет малого космического аппарата. ОИ был закреплён на систему обезвешивания и установлен на вибростол. Датчик опорного сигнала, измеряющий виброускорение, крепился на подвижную часть катушки вибростола.

В процессе испытаний выделили целевые резонансные частоты колебаний ОИ в диапазоне частот от 5 до 70 Гц, так как в рассматриваемом диапазоне частот находятся интересующие нас первые тона конструкции.

**Результаты испытаний и сравнение их с расчётными данными.** Мы выбрали те тона, модальная эффективная масса которых превышает 10 % от суммарной физической массы (момента инерции), то есть «основные» целевые моды. Как правило, только эти моды используются при верификации КЭМ [2]. В качестве примера, показывающего влияние подбора жесткостных характеристик элементов КЭМ, приведена в таблице. Из неё видно, что подбором параметров можно обеспечить, для какой-то из мод, уменьшение погрешности. В моде 4, с самой высокой погрешностью до корректировки, нам удалось достичь почти идеального результата. Погрешность же в других тонах пока не приемлема.

Погрешность определения собственных частот на первой стадии исследования доходила до 45,75 % (см. таблицу), так как ОИ имеет неопределённости в значениях ряда параметров. Например, обязательной верификации требуют толщины оболочек и другие параметры конструкции, физические свойства материалов (модули упругости, модули сдвига и т. д.), допущения в части выбранного типа механических связей между элементами конструкции и линейность этих связей [2]. Это лишний раз подтвердило необходимость проведения модальных испытаний.

Выполненный предварительный коррекционный анализ и последующее уточнение жесткостных параметров некоторых элементов конструкции позволили снизить эти погрешности определения частот, но результаты на начальном этапе верификации далеки до приемлемых уровней, заданных в работах [3–5]. Следующий этап в настоящей работе – верификация КЭМ.

**Заключение.** Полученные в результате проведения работ динамические характеристики элементов

конструкции КА позволят в дальнейшем создавать более достоверные и точные динамические модели КА на этапе проектирования, что в свою очередь повысит точность расчётов нагружения КА и надёжность изделий в целом.

## Библиографические ссылки

1. Хейлен В., Ламменс С., Сас П. Модальный анализ: теория и испытания. М. : ООО «Новатест», 2010. 319 с.
2. Межин В. С., Обухов В. В. Практика применения модальных испытаний для целей верификации конечно-элементных моделей конструкции изделий ракетно-космической техники // Космическая техника и технологии. 2014. № 1 (4). С. 86–91.
3. Пересыпкин К. В., Кожиченкова М. С. Формирование облика усиления размеростабильной платформы с помощью численной оптимизации // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С. П. Королёва. 2013. № 4 (42). С. 223–230.
4. MIL-HDBK 340A: Test Requirements for Launch // Upper Stage and Space Vehicles, 1999.
5. ESA-ECSS-E-ST-32-11C: Space Engineering- Modal Survey Assessment, European Cooperation for Space Standardization. Noordwijk (the Netherlands), 2008.

## References

1. Heylen W., Lammens S., Sas P. Modal analysis theory and testing. M. : LLC “Novatest”, 2010. 319 p.
2. Mezhin V. S., Obukhov V. V. Practice applications of modal tests for the purposes of verification of final and element models of design of products of the missile and space equipment // Space engineering and technologies. 2014. No. 1 (4). P. 86–91.
3. Peresypkin K. V., Kozhichenkova M. S. Forming the conceptual structure of a Dimensionally stable platform by numerical optimization // Vestnik Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov. 2013. № 4 (42). P. 223–230.
4. MIL-HDBK 340A: Test Requirements for Launch // Upper Stage and Space Vehicles, 1999.
5. ESA-ECSS-E-ST-32-11C: Space Engineering- Modal Survey Assessment, European Cooperation for Space Standardization. Noordwijk (the Netherlands), 2008.

© Иголкин А. А., Сафин А. И., Филипов А. Г., 2018

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ В КОСМИЧЕСКОЙ ИНДУСТРИИ

О. А. Исеева<sup>1</sup>, М. С. Писарев<sup>1</sup>, В. В. Двирный<sup>1</sup>, Г. Г. Крушенко<sup>2,3</sup>

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

<sup>2</sup>Красноярский научный центр СОРАН

Институт вычислительного моделирования СОРАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44

<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: iseeva.olena@iss-reshetnev.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, вязкоупругое состояние, демпфирование, сэндвич-панель.*

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

O. A. Iseeva<sup>1</sup>, M. S. Pisarev<sup>1</sup>, V. V. Dvirniy<sup>1</sup>, G. G. Krushenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

<sup>2</sup>Krasnoyarsk Science Centre SB RAS

Institute of Computational Modelling SB RAS

50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>3</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

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

E-mail: iseeva.olena@iss-reshetnev.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, viscoelastic state, damping, sandwich panel.*

**Введение.** В последние годы все шире внедрение в конструкции космических аппаратов умных материалов. Доминантным признаком умных материалов является «эффект памяти формы». Этот эффект заключается в том, что упомянутые материалы после принудительного изменения формы способны восстанавливать первоначальную форму в результате возвращения исходного физического состояния.

Особенности термомеханического поведения полимеров с памятью формы связаны с наличием релаксационного перехода: стеклования при охлаждении и размягчения при нагреве. В высокоэластическом состоянии макромолекулы полимера обладают повышенной сегментарной подвижностью, в связи с чем возможно проявление больших обратимых деформаций. При стекловании подвижность молекулярных сегментов значительно снижается. Это приводит, во-первых, к повышению жесткости материала: модуль Юнга многих полимеров увеличивается на два порядка. Во-вторых, позволяет сохранить созданную в вы-

сокоэластическом состоянии деформацию. При деформировании высокоэластичного материала сегменты макромолекул занимают новое равновесное положение, и после охлаждения с последующим снятием нагрузки они уже не обладают достаточной свободой для возвращения в исходное состояние. При этом если между макромолекулами имеется достаточное количество сшивок (поперечных связей химической или физической природы), обеспечивающих сохранение их положения относительно друг друга, то в процессе последующего нагрева наблюдается восстановление недеформированной формы [1].

Полимеры с памятью формы имеют широкий спектр применения, например, приводы, электромеханические системы, преобразование и развертывание космических конструкций, управление структурами, самовосстановление и т. д. Использование композитных материалов в аэрокосмической промышленности все больше увеличивается, поскольку они часто демонстрируют более высокую жесткость с низкой



плотностью по сравнению с обычными материалами. Тем не менее, они обычно имеют низкие динамические показатели из-за их высокой жесткости и низких характеристик демпфирования. Контроль и снижение шума и вибраций тем самым находятся в центре текущих проблем. Много исследований было сосредоточено на композитных структурах, изготовленных на основе вязкоупругих материалов для обеспечения затухания вибрации [2–4]. Было проведено множество исследований с целью оптимизации конструкции многослойных структур путем изменения толщины вязкоупругого слоя, ориентации волокна или соотношения сторон структуры.

В работе [5] подчеркивается удивительная способность демпфирования полимера с памятью формы путем его использования в сложных структурах, таких как сэндвич-панели. Эти возможности проверяются не только при моделировании конечных элементов, но и экспериментально. Проверяется способность КЭМ с использованием температурно-временной суперпозиции представлять поведение сэндвича. Широкий диапазон частот и температур был исследован в эксперименте и моделировании, результаты демонстрируют впечатляющие демпфирующие свойства композитного сэндвича.

Методика, предложенная в статье [5], применима к любому вязкоупругому материалу, проявляющему частотные и температурно-зависимые свойства с высоким демпфированием.

**Заключение.** Полимеры с памятью формы известны уже несколько десятилетий. Цикл памяти формы включает в себя этапы создания «замороженного» деформированного состояния в процессе охлаждения, разгрузки и последующего восстановления оригинальной формы при нагреве. У полимеров с памятью формы есть способность изменять свою форму в ответ на внешний импульс, чаще всего термическую активацию. Когда полимер с памятью формы нагревается выше температуры стеклования  $T_g$ , он мягкий и эластичный, и его легко изменить. Если полимер с памятью формы затем охлаждается ниже  $T_g$ , он сохраняет заданную форму (характеристику фиксации формы). При нагревании выше  $T_g$  материал автономно возвращается к своей первоначальной постоянной форме.

Сегодня интеллектуальные материалы все чаще используются для квазистатических и динамических состояний в различных температурных диапазонах, что требует тщательных исследований свойств материала в широких частотных диапазонах и диапазонах температур.

Инструментами влияния на характер восстановления формы являются варьирование скорости охлаждения/нагрева, величины прикладываемой деформации, времен выдержки на различных этапах, а также неполное охлаждение и нагрев, так что процесс стеклования оказывается незавершенным. В связи с этим во многих работах материалы с памятью формы рассматриваются с точки зрения программирования их свойств на этапе восстановления [1].

## Библиографические ссылки

1. Тихомирова К. А., Труфанов Н. А. Экспериментальное обоснование определяющих соотношений для аморфного полимера с памятью формы при больших деформациях // Вестник ПНИПУ. Механика. 2015. № 2. С. 151–163.
2. Hogsberg, J. B. Explicit solution for the natural frequency of structures with partial viscoelastic treatment [Электронный ресурс] // *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2016. Vol. 23, Iss. 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) (дата обращения: 12.08.2018).
3. Grootenhuis P. The control of vibrations with viscoelastic materials [Электронный ресурс] // *Journal of Sound and Vibration*. 1970. Vol. 11, Issue 4. P. 421–433. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X70800049#aep-article-footnote-id1> (дата обращения: 12.08.2018).
4. Aumjaud P., Smith C., Evans K. A novel viscoelastic damping treatment for honeycomb sandwich structures [Электронный ресурс] // *Composite Structures*. 2015. Vol. 119. P. 322–332. URL: <https://clck.ru/EHdGW> (дата обращения: 12.03.2018).
5. Pauline Butaud. Sandwich structures with tunable damping properties: On the use of Shape Memory Polymer as viscoelastic core [Электронный ресурс] / Butaud Pauline, Foltete Emmanuel, Ouisse Morvan // *Composite Structures*. 2016. Vol. 153. P. 401–408. URL: [www.elsevier.com/locate/compstruct](http://www.elsevier.com/locate/compstruct) (дата обращения: 12.03.2018).

## References

1. Tihomirova K. A., Trufanov N. A. [Experimental substantiation of the determining relationships for a shape memory amorphous polymer at large deformations]. *Vestnik PNIPIU. Mehanika*. 2015. No. 2. P. 151–163. (In Russ.)
2. Hogsberg J. B. Explicit solution for the natural frequency of structures with partial viscoelastic treatment. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2016. Vol. 23, No. 7. P. 784–790. Available at: [http://orbit.dtu.dk/files/127799172/hogsberg\\_2016\\_viscoelastic\\_frequency\\_postprint.pdf](http://orbit.dtu.dk/files/127799172/hogsberg_2016_viscoelastic_frequency_postprint.pdf) (accessed: 12.08.2018).
3. Grootenhuis P. The control of vibrations with viscoelastic materials. *Journal of Sound and Vibration*. 1970. Vol. 11, No. 4. P. 421–433. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X70800049#aep-article-footnote-id1> (accessed: 12.08.2018).
4. Aumjaud P. A novel viscoelastic damping treatment for honeycomb sandwich structures. *Composite Structures*. 2015. Vol. 119. P. 322–332. Available at: <https://clck.ru/EHdGW> (accessed: 12.03.2018).
5. Pauline Butaud, Emmanuel Foltete, Morvan Ouisse. Sandwich structures with tunable damping properties: On the use of Shape Memory Polymer as viscoelastic core. *Composite Structures*. 2016. Vol. 153. P. 401–408. Available at: [www.elsevier.com/locate/compstruct](http://www.elsevier.com/locate/compstruct) (accessed: 12.03.2018).

© Исева О. А., Писарев М. С., Двирный В. В., Крушенко Г. Г., 2018

УДК 629.783

## ВЫБОР УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ЮСТИРОВКИ РЕФЛЕКТОРА КРУПНОГАБАРИТНОЙ ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ АНТЕННЫ

Г. И. Калабегашвили, Е. В. Бикеев, М. Г. Матыленко

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

*В процессе эксплуатации крупногабаритных трансформируемых антенн связных космических аппаратов возникает необходимость их орбитальной юстировки. Проведен анализ требований к орбитальной юстировке КТА и сделан выбор устройства регулировки положения рефлектора.*

*Ключевые слова: крупногабаритная трансформируемая антенна, рефлектор, орбитальная юстировка.*

## SELECTION OF THE DEVICE FOR ORBITAL ALIGNMENT OF THE REFLECTOR OF A LARGE TRANSFORMABLE ANTENNA

G. I. Kalabegashvili, E. V. Bikeev, M. G. Matylenko

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: oakheart@iss-reshetnev.ru

*When creating a transformable antennas for communications spacecraft, the problem arises due to the orbital alignment. In this work, the requirements analysis of antenna orbital adjustment and equipment selection of reflector position regulation were carry out.*

*Keywords: transformable antenna, reflector, the orbital alignment.*

В мировом спутникостроении широко применяются крупногабаритные трансформируемые конструкции [1]. Одной из таких конструкций являются крупногабаритные трансформируемые антенны (КТА) [2]. КТА представляет собой сложнейшую техническую систему от точности геометрии, которой после раскрытия зависит обеспечение качественным сигналом абонентов в требуемой зоне обслуживания.

Конструкция КТА (см. рисунок) представляет собой облучатель, устанавливаемый на корпус КА и крупногабаритный рефлектор на штанге, обеспечивающей рабочее положение рефлектора относительно облучателя [4–5]. Радиотражающая же поверхность рефлектора представляет собой офсетную вырезку из параболоида вращения. Одним из факторов, влияющих на качество сигнала, является взаимное расположение составных частей (СЧ) КТА – ошибка размещения рефлектора относительно облучателя непосредственно влияет на форму диаграммы направленности (ДН) антенны и ее ориентацию [3]. Например, отклонение рефлектора относительно облучателя КТА от требуемого углового положения на одну угловую секунду, при расположении КА на геостационарной орбите, приводит к тому, что ее ДН отклоняется от требуемой точки на Земле на 200 метров, а отклонение на один градус – уже приводит к отклонению ДН на 630 километров.

На взаимное положение СЧ КТА (рефлектора и облучателя) после раскрытия влияют множество фак-

торов, в том числе такие факторы как ошибки изготовления, ошибки раскрытия и ошибки, вызванные температурными и упругими деформациями конструкции. Все выше перечисленные ошибки при проектировании и изготовлении КТА исключить не представляется возможным.



Типовая компоновка связного КА с КТА

Наиболее целесообразным и менее затратным является использование в составе КТА устройств регулировки положения ее СЧ, что позволит во время

эксплуатации КА на орбите, проводить орбитальную юстировку КТА, а значит, иметь возможность скомпенсировать ошибки взаимного положения рефлектора и облучателя относительно требуемого.

К взаимному расположению облучателя и рефлектора КТА традиционно предъявляются следующие требования:

– положение фокуса радиотражающей поверхности рефлектора должно находиться в сфере радиусом  $R$  относительно фазового центра облучателя;

– ось радиотражающей поверхности рефлектора, должна быть параллельна и сонаправлена проектной оси антенны. В первом приближении должна быть параллельна продольной оси КА, ориентируемой на Землю.

По ряду причин управление взаимным расположением облучателя и рефлектора КТА выбрано через управление положением рефлектора.

В рамках работ по разработке системы контроля геометрии антенны (СКГА) [6–7], проведены работы по анализу требований к орбитальной юстировке КТА и определена оптимальная конфигурация устройства регулировки положения рефлектора (УРПР) выработаны основные требования к его составным частям (диапазон движения приводов, точность перемещения и т. д.).

Анализ нескольких вариантов состава УРПР показал, что наиболее оптимальным составом для решения задачи орбитальной юстировки КТА сформулированной выше является:

– трехступенной блок механики, установленный в узле крепления штанги к корпусу КА. Обеспечивает поворот фланца стыковки с штангой рефлектора в двух взаимно перпендикулярных плоскостях вокруг осей собственной системы координат, линейное перемещение фланца стыковки с штангой антенны вдоль продольной оси симметрии штанги.

– двухступенной блок механики, установленный в узле крепления штанги к рефлектору. Обеспечивает поворот фланца стыковки с рефлектором в двух взаимно перпендикулярных плоскостях вокруг осей собственной системы координат.

Необходимо отметить, что полученное решение хоть и соответствует поставленной выше задаче орбитальной юстировки, но является не достаточно оптимальным с точки зрения массы. Для оптимизации в части массы средств орбитальной юстировки требуется другая формулировка задачи орбитальной юстировки.

#### Библиографические ссылки

1. Tibert G. Deployable tensegrity structures for space applications. Doctoral thesis [Электронный ресурс]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2002. URL: [http://www.mech.kth.se/thesis/2002/phd/phd\\_2002\\_gunnar\\_tibert.pdf](http://www.mech.kth.se/thesis/2002/phd/phd_2002_gunnar_tibert.pdf) (дата обращения: 12.08.2018).

2. Бей Н. А., Зимин В. Н. Трансформируемые антенны больших размеров для геостационарных космических аппаратов // Антенны. 2005. № 10. С. 24–27.

3. Айзенберг Г. З., Ямпольский В. Г., Терешин О. Н. Антенны УКВ / под ред. Г. З. Айзенберга. В 2 ч. Ч. 1. М.: Связь, 1977. 288 с.

4. Пат. № 2370864 (РФ). Зонтичная антенна космического аппарата / В. И. Халиманович, А. И. Величко, Г. В. Шипилов, А. В. Романенко и др. 2008.

5. Пат. № 2350519 (РФ). Развертываемый трансформируемый рефлектор космического аппарата / Н. А. Тестоедов, В. И. Халиманович, А. И. Величко, Г. В. Шипилов, А. В. Романенко и др. 2007.

6. Система контроля геометрии крупногабаритной трансформируемой антенны и ее наведение // Решетневские чтения : материалы XVII Междунар. науч. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем акад. М. Ф. Решетнева : в 2 ч. / М. Г. Матыленко, Е. В. Бикеев, А. А. Алексеенко, М. О. Дорофеев ; под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. Ч. 1. С. 194–196.

7. Система наведения крупногабаритной трансформируемой антенны / А. А. Алексеенко, Е. В. Бикеев, М. В. Лукьяненко, М. Г. Матыленко, М. О. Дорофеев // Вестник СибГАУ. 2014. № 1(53). С. 104–108.

#### References

1. Tibert G. Deployable tensegrity structures for space applications. Doctoral thesis. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2002. URL: [http://www.mech.kth.se/thesis/2002/phd/phd\\_2002\\_gunnar\\_tibert.pdf](http://www.mech.kth.se/thesis/2002/phd/phd_2002_gunnar_tibert.pdf) (accessed: 12.08.2018).

2. Zimin V. N. Transformable large antenna for geostationary spacecraft // Antennas. 2005. № 10. P. 24–27.

3. Ayzenberg G. Z., Yampol'skiy V. G., Tereshin O. N. *Antenny UKV*. [Ultrashort waves antennas], 1977, Svyaz', 288 p.

4. Khalimanovich V. I., Velichko A. I., Shipilov G. V., Romanenko V. I. *Zontichnaya antenna kosmicheskogo apparata* [Umbrella antenna spacecraft]. Patent RF, no. 2370864. 2008. 10 p.

5. Testoev N. A., Khalimanovich V. I., Shipilov G. V., Romanenko V. I. *Razvertivaemyy krupnogabaritnyy reflektor kosmicheskogo apparata* [Spacecraft large deployable reflector]. Patent RF, No. 2350519. 2009. 19 p.

6. Matylenko M. G., Bikeev E. V., Alekseenko A. A., Dorofeev M. O. [Control system of large-sized transformed antenna geometry]. *Reshetnevskie chteniya : materialy XVII Mezhdunar. nauch. konf., posvyashch. pamyati gener. konstruktora raket.-kosmich. sistem akad. M. F. Resheteva* [In proc. of the 17th international scientific conference "Reshetnevskie chteniya"]. Krasnoyarsk, 2013. P. 194–196 (In Russ.)

7. Alekseenko A. A., Bikeev E. V., Luk'yanenko M. V., Matylenko M. G., Dorofeev M. O. [The guidance system of large flexible antenna]. *Vestnik SibGAU*. 2014. Vol. 1, No. 53. P. 104–108. (In Russ.)

© Калабегашвили Г. И., Бикеев Е. В., Матыленко М. Г., 2018

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ РАЗВЕРТЫВАЕМЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ФЕРМЕННОГО ТИПА

Ю. А. Кисанов<sup>1</sup>, В. Е. Мешковский<sup>2</sup>, А. Н. Сдобников<sup>2</sup>, С. А. Чурилин<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт специального машиностроения МГТУ имени Н. Э. Баумана  
Российская Федерация, 105005, г. Москва, Госпитальный пер., 10  
E-mail: sm11@bmstu.ru

*Рассматриваются вопросы численного моделирования конструкций космических трансформируемых отражателей ферменного типа в среде программного комплекса MSC.Patran/Nastran и приводятся результаты численного анализа напряжённо-деформированного состояния силовых элементов таких конструкций.*

*Ключевые слова: трансформируемый рефлектор, ферменная конструкция, напряжённо-деформированное состояние, компьютерное моделирование, численный анализ, метод конечных элементов.*

## COMPUTER SIMULATION OF TRUSSED SPACE SYSTEMS LARGE DEPLOYABLE REFLECTORS

Yu. A. Kisanov<sup>1</sup>, V. Ye. Meshkovsky<sup>2</sup>, A. N. Sdobnikov<sup>2</sup>, S. A. Churilin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

<sup>2</sup>Scientific Research Institute of Mechanical Engineering of Bauman Moscow State Technical University  
10, Gospitalny Per., Moscow, 105005, Russian Federation  
E-mail: sm11@bmstu.ru

*This paper presents the results of space transformable trussed reflectors structures computer simulations using MSC.Patran/Nastran software. There are results of such structures loaded units stressed and deformed state in this paper.*

*Keywords: transformable reflector, trussed structure, stressed and deformed state, computer simulation, numerical analysis, finite element method.*

Возрастающие потребности в трансформируемых рефлекторах с апертурой более 12 метров для телекоммуникационных приложений ставят перед разработчиками таких систем задачи поиска наилучших концептуальных решений, отвечающих требованиям минимальной массы, высокой точности отражающей поверхности и необходимой динамической жёсткости [1–3].

В докладе рассмотрен вариант топологической схемы наращиваемой конструкции отражателя с выбором наиболее рационального конструктивного решения, использующего типовой раскладывающийся модуль с сетеполотном, натянутым на каркас из криволинейных стержней, имеющих геометрию, максимально приближённую к параболической поверхности отражателя.

Предлагаемая схема отвечает требованиям экспериментальной отработки конструкции и её функционирования в эксплуатационном режиме при использовании технологии последовательного монтажа на орбите.

Рефлекторы с таким объёмным жестким ферменным каркасом представляют собой разновидность шарнирно-стержневых конструкций, среди которых

можно назвать рефлекторы на основе кольцевых ободов (Northrop Grumman, Harris) и так называемые модульные рефлекторы японской фирмы Toshiba. Использование жёсткого стержневого каркаса обеспечивает возможность максимально реализовать точностные возможности фацетной аппроксимации формообразующей структуры (ФОС) ферменного рефлектора. В общем случае такая ФОС состоит из жёстких элементов лицевой сети каркаса (узлы и стержни) и гибкой структуры (сетеполотна) внутри треугольников жёсткой сети.

На рис. 1 показан общий вид модульной конструкции трансформируемого рефлектора ферменного типа в развёрнутом положении и общий вид фацеты модуля рефлектора.

В докладе обсуждается возможность фацетирования отражающей поверхности рефлектора с помощью жёстких элементов каркаса, а также основные преимущества фацетированной ФОС [4; 5].

Результаты численного моделирования формы сетеполотна, натянутого на фацетный каркас из криволинейных стержней, показаны на рис. 2. Задача решается в нелинейной постановке в среде MSC.Patran/Nastran.

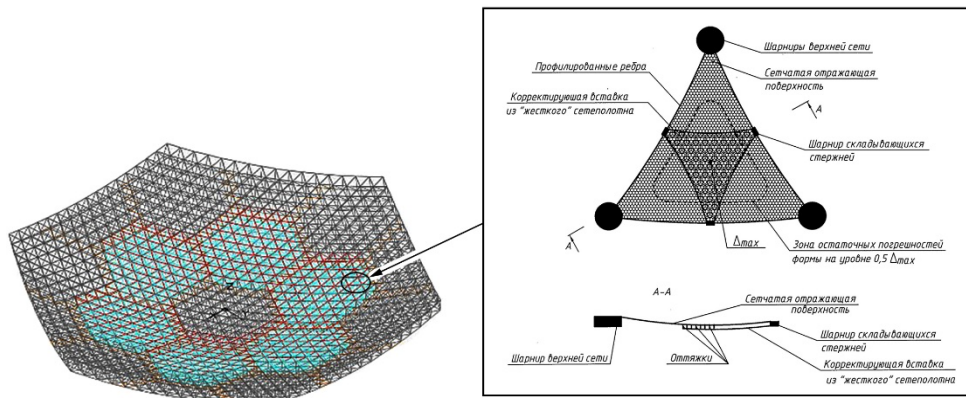


Рис. 1. Модульная структура трансформируемого рефлектора ферменного типа в развернутом состоянии

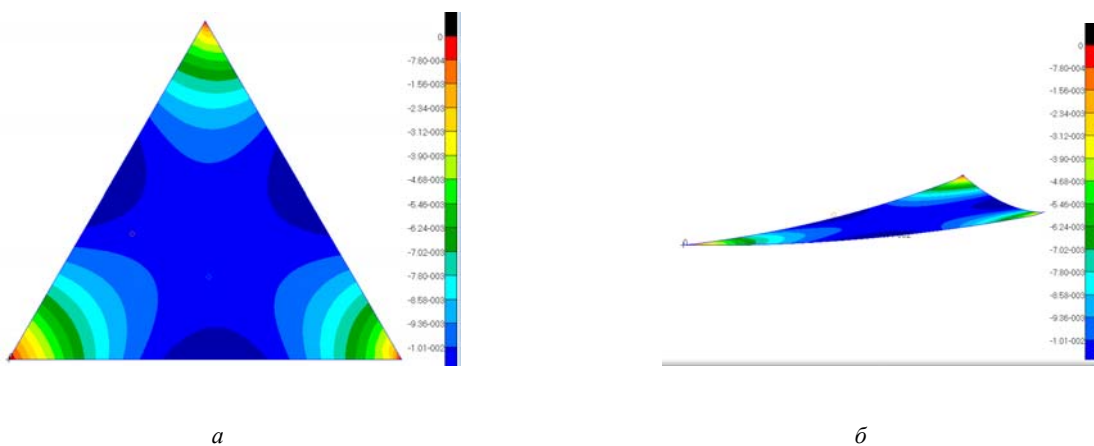


Рис. 2. Деформированная форма сетеполотна facets, натянутого на силовой каркас  
а – вид сверху; б – пространственная форма

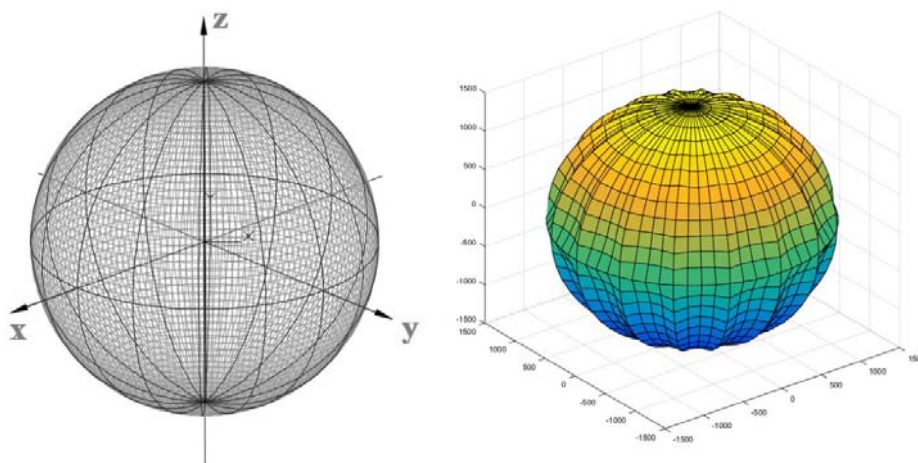


Рис. 3. Космический калибровочно-юстировочный аппарат

Принципы развёртывания с использованием зарекомендовавших себя в предыдущих разработках [6] шарнирных соединений и определения деформированной формы сетеполотна для сферической оболочки, используемой в качестве калибровочно-юстировочного спутника, наглядно показал возможности топологических схем ферменного типа.

На рис. 3 показан общий вид такой сферической оболочки отражателя диаметром 3 метра и результат численного моделирования её деформированного состояния. Максимальное отклонение сетеполотна от идеальной сферической поверхности не превышает 5 мм.

В докладе подробно рассматриваются метод расчёта, характер деформирования сетеполотна, а также

особенности получаемой квазисферической формы оболочки отражателя.

#### Библиографические ссылки

1. Tibert G. Deployable tensegrity structures for space applications : Doctoral thesis – Royal Institute of Technology, Department of Mechanics, Stockholm, Sweden. 2002. 220 p.
2. Величко А. И., Белов С. В., Пономарев С. В. Моделирование рефлектора с тензоридным ободом // Решетнёвские чтения : материалы XVII Междунар. науч. конф. (12–14 ноября 2013, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. С. 61–62.
3. Пономарев С. В. Трансформируемые рефлекторы антенн космических аппаратов // Вестник Томского государственного университета. 2011. № 4. С. 110–119.
4. Фейзулла Н. М., Кисанов Ю. А. Особенности формообразования поверхности космических антенн с сетчатым отражателем : сб. ст. / под ред. А. А. Пистолькорса. М. : Радио и связь, 1987. С. 107–115.
5. Мешковский В. Е. Влияние температурных деформаций на точность формы отражающей поверхности ферменного рефлектора крупногабаритной космической антенны на орбите // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 11 (656). С. 3–11.
6. Бугаев Ю. Н., Завалий В. Н., Кисанов Ю. А., Курушкин С. М., Мешковский В. Е., Овчаров В. П., Суетенко А. В., Филин Е. Н., Церихов В. И., Чернец-

кий Н. П. Раскрывающийся сферический отражатель излучения // Патент 2396649 RU. 2009.

#### References

1. Tibert G. Deployable tensegrity structures for space applications : Doctoral thesis – Royal Institute of Technology, Department of Mechanics, Stockholm, Sweden. 2002. 220 p.
2. Velichko A. I., Belov S. V., Ponomarev S. V. [Modelling a reflector with tensegrity rim]. Materialy XVII Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya" [Materials XVII Intern. Scientific. Conf. "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2013. P. 61–62. (In Russ.)
3. Ponomarev S. V. [Transformable reflectors of spacecraft antennas]. Vestnik of Tomsk State University. 2011. No. 4. P. 110–119. (In Russ.)
4. Feyzulla N. M., Kisanov Yu. A., *Osobennosti formoobrazovaniya poverkhnosti kosmicheskikh antenn s setchatym otrazhatelem* [Features of space antennas with reticulated reflectors surface shaping ]. *Sbornik statej pod. red. A. A. Pistol'korsa, Radio I sviaz'*, Moskva, 1987. P. 107–115. (In Russ.)
5. Meshkovskiy V. E. [Influence of thermal deformations on the accuracy of the reflecting surface of a large truss space antenna]. Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. Moscow, 2014. #11(656). P. 3–11. (In Russ.)
6. Unfolding spherical radiation reflector, patent RU 2396649 C1 (In Russ.)

© Кисанов Ю. А., Мешковский В. Е., Сдобников А. Н., Чурилин С. А., 2018

## СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И БАТАРЕИ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Л. А. Кожевникова

Сибирский федеральный университет  
 Российская Федерация, 662971, г. Железногорск Красноярского края, ул. Кирова, 12а  
 E-mail: larisa036@rambler.ru

*Рассматриваются некоторые изобретения и проблемы изготовления солнечных элементов, разработанных для КА.*

*Ключевые слова: фотоэнергетика, солнечные батареи.*

## SOLAR CELLS AND BATTERIES FOR SPACE APPLICATION

L. A. Kozhevnikova

Siberian Federal University  
 12a, Kirova Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region Russia, 662971, Russian Federation  
 E-mail: larisa036@rambler.ru

*Some inventions and manufacturing of solar cells developed for spacecraft are considered.*

*Keywords: photovoltaics, solar panels.*

**Введение.** Разработка и изготовление солнечных элементов на основе различных полупроводниковых материалов. Проектирование и изготовление солнечных батарей для космических аппаратов со сроком активного существования до 15 лет.

В настоящее время в НПП «Квант» ведутся работы по трем основным направлениям развития космической фотоэнергетики и ее элементной базы, а именно:

**Создание солнечных батарей на основе монокристаллического кремния.** Созданные в НПП «Квант» кремниевые солнечные батареи соответствуют мировому уровню, что было подтверждено при выполнении ряда зарубежных заказов по их изготовлению в интересах Индии, Франции, Голландии, Чехии, Израиля, Китая. Эти батареи обладают:

– наивысшей начальной удельной энергетической характеристикой  $\sim 200 \text{ Вт/м}^2$ ;

– наименьшей деградацией за срок активного существования;

– двусторонней чувствительностью, что используется на низколетящих космических аппаратах и позволяет увеличить выходную мощность солнечных батарей на 10–15 % за счет преобразования альбедо Земли (в частности, солнечные батареи для КА «Заря», «Звезда», российского сектора МКС, СБ для КА «Монитор-Э») (рис. 1).

**Создание солнечных батарей на основе многокаскадных фотоэлектрических преобразователей с использованием сложных полупроводниковых материалов на инородных подложках.** Пока это лишь сделанная на компьютере картинка, однако наночастицы-биосенсоры, по словам учёных, будут выглядеть примерно так (иллюстрация с сайта physorg.com) (рис. 2).

Наночастица, она же – перекати-поле, будет постепенно выстраиваться вокруг ядра. (NASA хочет кое-что разместить внутри своих астронавтов. Причём это кое-что настолько крошечное, что будет находиться в живых клетках покорителей космоса).

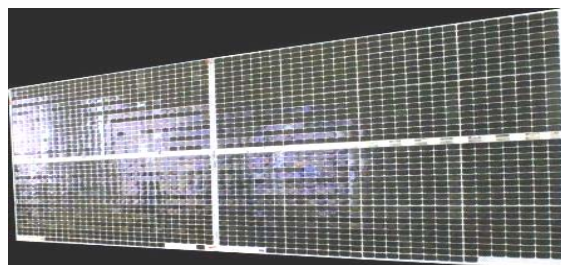


Рис. 1. Солнечные преобразователи с двусторонней чувствительностью

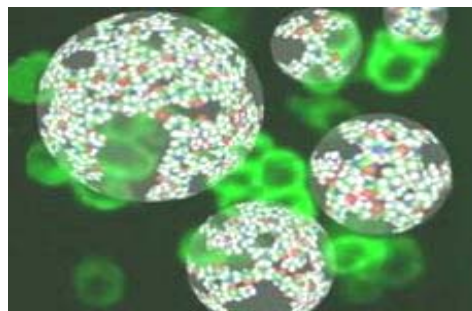


Рис. 2. Биосенсоры

*Космические каскады. Трехкаскадные арсенид-галлиевые фотоэлектрические преобразователи.*

В космических аппаратах применяют два вида солнечных батарей – кремниевые и арсенид-галлиевые на германиевой подложке. Первые производят дешевле и проще, поэтому они занимают подавляющую долю российского рынка. Для вторых требуются дефицитные материалы, они стоят значительно дороже кремниевых, но гораздо эффективнее. Поэтому, несмотря на высокую цену, заказы на арсенид-галлиевые батареи растут, а значит, в России выгодно развивать собственное производство этих солнечных модулей.

**Создание гибких тонкопленочных солнечных батарей на основе аморфного кремния с максимальной удельной энергомассовой характеристикой и минимальной стоимостью.** Это совершенно новое направление в космической фотоэнергетике. Наиболее перспективным типом таких фотоэлектрических преобразователей в настоящее время являются 3-х-каскадные ФЭП на основе аморфного кремния (a-Si) (рис. 3).

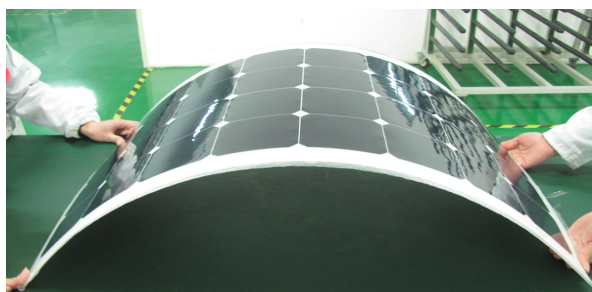


Рис. 3. Гибкая тонкопленочная БС на основе аморфного кремния

Первоначально созданные для целей наземной фотоэнергетики солнечные батареи из аморфного кремния в настоящее время рассматриваются для использования в условиях космоса, вследствие:

возможности получения высоких энергомассовых характеристик солнечных батарей, в 4–5 раз выше, чем у солнечных батарей, изготовленных на основе монокристаллического кремния, несмотря на их меньший начальный КПД;

высокой радиационной стойкости;

возможности снижения на порядок и более удельной стоимости солнечной батареи по сравнению с монокристаллическим вариантом.

Существенным преимуществом гибких тонкопленочных солнечных батарей является их малый стартовый (транспортный) объем, возможность создания

на их основе легко развертываемых солнечных батарей рулонного типа и т. д.

В качестве базовой технологии изготовления фотоэлектрических преобразователей на основе аморфного кремния для космического применения рассматривается освоенная совместным российско-американским предприятием ООО «Совлак» (соучредители НПП «Квант», ECD Ltd. USA) технология наземного применения. Эта технология обеспечивает формирование каскадной трехпереходной фотоэлектрической структуры на основе сплавов a-Si на тонкой ленточной подложке.

#### Библиографические ссылки

1. Каталог разработок [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rusanonet.ru/products/21131/> (дата обращения: 08.09.2018).
2. Руденко Б. О. О чем пишут научно-популярные журналы мира // Наука и жизнь. 2008. № 6. С. 111–112.
3. Новости технологии [Электронный ресурс]. URL: <https://www.techcult.ru/tag/satellite> (дата обращения: 08.09.2018).
4. Нанотехнологии в космонавтике [Электронный ресурс]. URL: <http://newnano.ru/nanotehnologii-kak-nauka/nanotehnologii-v-kosmonavtike/> (дата обращения: 08.09.2018).
5. Поулек В., Либра М., Стребков Д.С., Харченко В. В. Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии. 2013. 324 с.

#### References

1. The catalogue of developments. Available at: <http://www.rusanonet.ru/products/21131/> (accessed: 08.09.2018).
2. Rudenko B. O. *What I write popular science journals of the world. "Science and life"* 2008. № 6. P. 111–112.
3. Technology news. Available at: <https://www.techcult.ru/tag/satellite> (accessed: 08.09.2018).
4. Nanotechnology in space. Available at: <http://newnano.ru/nanotehnologii-kak-nauka/nanotehnologii-v-kosmonavtike/> (accessed: 08.09.2018).
5. Poulek V., Libra M., Strebkov D. S., Kharchenko V. *Photovoltaic conversion of solar energy*. 2013. 324 p.



## СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ КОЛЕБАНИЙ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В. М. Копылов

Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт  
робототехники и технической кибернетики  
Российская Федерация, 194064, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий просп., 21  
E-mail: v.kopylov@rtc.ru

*Предложен подход к измерению деформаций и усилий в упругом теле, закрепленном на жестком объекте (например, космическом аппарате), с помощью комбинации прямых интерферометрических измерений расстояния и последующей математической обработки с использованием конечно-элементной модели тела.*

*Ключевые слова: протяженные упругие элементы, КА наблюдения, интерферометр, форма колебаний.*

## A METHOD FOR MEASURING SMALL OSCILLATIONS OF SPACECRAFT PAYLOAD

V. M. Kopylov

Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics  
21, Tikhoretsky Av., Saint Petersburg, 194064, Russian Federation  
E-mail: v.kopylov@rtc.ru

*In this paper a way to measure deformations and stress in flexible body, firmly fixed on the spacecraft, is suggested. This method is based on combination of direct interferometric distance measuring and following mathematical processing using a finite element body model.*

*Keywords: Long flexible parts, observations spacecraft, interferometer, mode shape.*

В настоящее время существует множество космических аппаратов (КА) наблюдения, в составе которых используются протяженные упругие элементы. Опубликован ряд работ [1; 2], позволяющих учесть колебания инструмента наблюдения в алгоритмах управления КА.

Общими недостатками этих работ, затрудняющими их практическое использование, являются отсутствие в настоящее время способа получения необходимых данных о колебаниях системы в реальном времени, и большая вычислительная сложность задачи. В данной статье предложен способ получения картины колебаний такого объекта.

В соответствии с конденсированным представлением конечно-элементной модели упругого тела [3], для каждого элемента можно получить матрицу форм колебаний, описывающую связь между обобщенной координатой колебаний  $q$  на определенной собственной частоте и вектором  $R_i$ .

$$R_i[6 \times 1] = F_i[6 \times n] \cdot q[n \times 1]. \quad (1)$$

Зная модальный вклад, можно получить матрицу связи усилий и деформаций  $AB[6 \times n]$ . Первые три столбца этой матрицы соответствуют моментам упругих колебаний, а вторые три – силам.

Алгоритм вычисления матрицы представлен формулами

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_i \\ Y_s \end{bmatrix}; \quad Y_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \Delta z & -\Delta y \\ 0 & 1 & 0 & -\Delta z & 0 & \Delta x \\ 0 & 0 & 1 & \Delta y & -\Delta x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T,$$

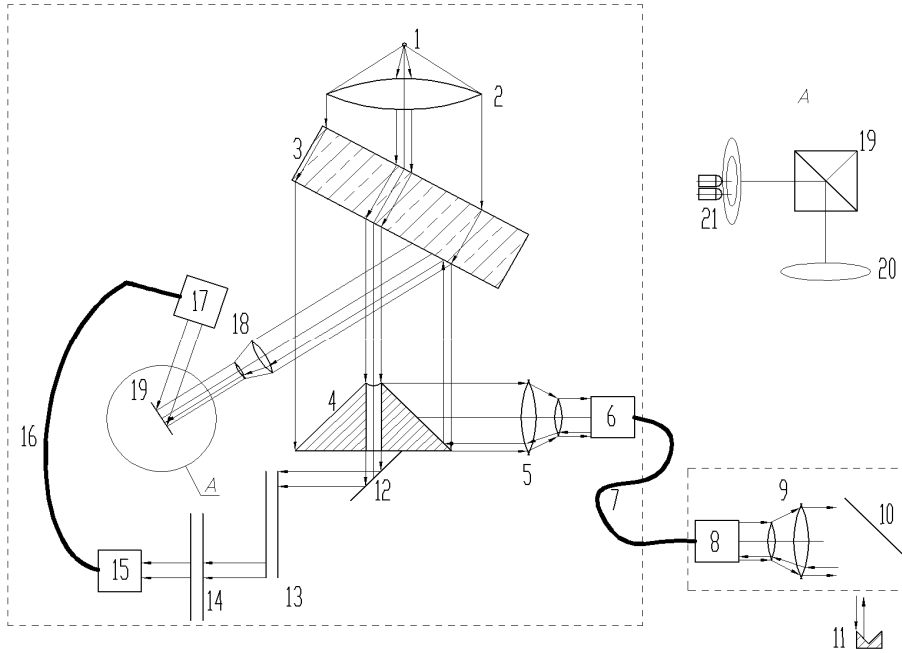
$$AB[6 \times n] = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = Y^T [6 \times s] M [s \times s] F [s \times n], \quad (2)$$

где  $s$  – число конечных элементов, столбцы матрицы форм  $F$  содержат идущие подряд строки матриц  $F_i$  (кроме строки, соответствующей точке закрепления объекта, которая содержит нули);  $M$  – диагональная матрица парциальных масс. Матрицы  $F_i$  и  $M$  могут быть получены в результате частотного анализа.

Уравнение колебаний упругого тела будет иметь вид [4]

$$\begin{aligned} & (\ddot{q} + \mu \cdot v \cdot \dot{q} / \pi + \mu^2 \cdot q) + \\ & + (H \cdot A + \rho \times H \cdot B) \cdot \dot{\omega} + H \cdot B \cdot \dot{u} + I = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\mu_i$  – диагональная матрица собственных частот колебаний;  $v_i$  – диагональная матрица логарифмических декрементов затухания;  $H$  – матрица поворота;  $\rho$  – радиус-вектор точки закрепления;  $I$  – инерционный член;  $\omega$  – вектор угловой скорости;  $u$  – вектор линейной скорости.



Оптическая схема интерферометра

Для определения вектора  $q$  производятся замеры смещения точек на поверхности объекта вдоль определенных направлений  $V_i$ . Матрица  $T_i$ , совмещающая ось  $Ox$  с направлением  $V_i$ , может быть получена из кватерниона оптимального поворота [5]:

$$\Lambda_i = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} + x_i}{2\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}} & 0 \\ -z_i \sqrt{\frac{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - x_i \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}}{2}} & \lambda_{i0} \\ y_i \sqrt{\frac{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - x_i \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}}{2}} & \lambda_{i1} \\ & \lambda_{i2} \\ & \lambda_{i3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$T_i = \begin{bmatrix} \lambda_{i0}^2 + \lambda_{i1}^2 - \lambda_{i2}^2 - \lambda_{i3}^2 & 2(\lambda_{i1}\lambda_{i2} - \lambda_{i0}\lambda_{i3}) & 2(\lambda_{i1}\lambda_{i3} + \lambda_{i0}\lambda_{i2}) \\ 2(\lambda_{i1}\lambda_{i2} + \lambda_{i0}\lambda_{i3}) & \lambda_{i0}^2 + \lambda_{i2}^2 - \lambda_{i1}^2 - \lambda_{i3}^2 & 2(\lambda_{i2}\lambda_{i3} - \lambda_{i0}\lambda_{i1}) \\ 2(\lambda_{i1}\lambda_{i3} - \lambda_{i0}\lambda_{i2}) & 2(\lambda_{i2}\lambda_{i3} + \lambda_{i0}\lambda_{i1}) & \lambda_{i0}^2 + \lambda_{i3}^2 - \lambda_{i1}^2 - \lambda_{i2}^2 \end{bmatrix}$$

Таким образом, для определения компонент вектора  $q$  достаточно решить систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} (T_1 F_1 q)_x = |V_1(t)| - |V_1(0)|, \\ \vdots \\ (T_n F_n q)_x = |V_n(t)| - |V_n(0)|. \end{cases} \quad (5)$$

Перемещения всех конечных элементов модели после этого можно определить по формуле (1), а силы и моменты, возникающие в результате колебаний в точке закрепления упругого тела – по формулам (6), в которых  $h$  – интервал измерений

$$\begin{aligned} Force(t-h) &= H \cdot B \cdot \frac{q(t) + q(t-2h) - 2q(t-h)}{h^2}, \\ Torque(t-h) &= (H \cdot A + \rho \times H \cdot B) \times \\ &\times \frac{q(t) + q(t-2h) - 2q(t-h)}{h^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

В качестве прототипа принят интерферометрический метод измерения больших длин, основанный на применении схемы Майкельсона [6; 7]. Оптическая схема прибора приведена на рисунке. Для обеспечения синхронности измерений всех точек используется зеркальная пирамида 4. Центрирование изображения отражателя 11 производится приводом зеркала 10. Настройка эталонной длины производится линиями задержки 13, 14.

Предварительный анализ источников погрешностей показал возможность достижения точности прямых измерений ~20 мкм на расстояниях порядка 5–10 м при современном уровне развития техники. При этом мощность суммарная мощность системы будет составлять около 300 Вт, с учетом приводов.

#### Библиографические ссылки

1. Исследование динамической и энергетической совместимости системы позиционирования и управления угловым движением космической солнечной энергостанции. / Ю. С. Мануйлов, С. В. Зиновьев, Ю. В. Прищепа и др. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 11.
2. Горелов Ю. Н. Концепция локально автономного управления упругими космическими аппаратами // XII всероссийское совещание по проблемам управления / Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. 2014.

3. Roy R., Craig Jr., Mervyn C. C. Bampton Coupling of Substructures for Dynamic Analysis. AIAA Journal, Vol. 6, No. 7, July 1968.

4. Программный комплекс моделирования стабилизированного движения космического аппарата с трансформируемыми упругими элементами конструкции. / М. Г. Игнатьев, В. М. Копылов, А. Ю. Кулаков, М. В. Сотников. // Вестник СибГАУ. 2013. № 3.

5. Бранец В. Н., Шмыглевский И. П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. М.: Наука, 1973. 320 с.

6. Glantschnig F. Digitale Langenmessgerate hoher Auflosing. Brown Boveri Mitteilungen. 1967. 54, No. 4. P. 172–179.

7. Коломийцов Ю. В. Интерферометры. Основы инженерной теории. Применение. Л.: Машиностроение, 1976. 295 с.

### References

1. [Study of dynamic and energy compatibility of positioning and angular motion control system of space solar power station]. / Ju. S. Manujlov, S. V. Zinovjev, Ju. V. Prishepa et al. // Izvstiya vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie. 2014. № 11, Vol. 57 (In Russ.)

2. Gorelov Ju. N. [The concept of locally Autonomous control of elastic spacecraft], [XII all-Russian meeting on problems of controlling], Institut problem upravlenia im. V. A. Trapeznikova RAN. 2014 (In Russ.)

3. Roy R. Craig Jr., Mervyn C. C. Bampton Coupling of Substructures for Dynamic Analysis. AIAA Journal, Vol. 6, No. 7, July 1968.

4. [A software package for modeling the stable motion of a spacecraft with transformable elastic structural elements]. / M. G. Ignatyev, V. M. Kopylov, A. Ju. Kulakov, M. V. Sotnikov. // Vestnik SibSAU № 3/2013 (In Russ.)

5. Branets V. N., Shmyglevskiy I. P. [Using quaternions in problems of rigid body orientation]. Moscow: Nauka, 1973. 320 p. (In Russ.)

6. Glantschnig F. Digitale Langenmessgerate hoher Auflosing. Brown Boveri Mitteilungen, 1967, 54, No. 4, P. 172–179.

7. Ju.V. Kolomijtsov. Interferometry. Osnovy inzhenernoj teorii. Primenenie. [Interferometers. Engineering basics. Application.] Leningrad: Mashinostroenie, 1976. 295 p. (In Russ.)

© Копылов В. М., 2018

УДК 621.396.67

## СИЛОВАЯ РАМА КАК ЭЛЕМЕНТ КОНСТРУКЦИИ КРУПНОГАБАРИТНОГО РЕФЛЕКТОРА

С. С. Кочеткова\*, В. Е. Чичурин, В. В. Лайзан, В. В. Болгов, В. Б. Тайгин

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 52

\*E-mail: cot.0312@mail.ru

*Для современных космических аппаратов необходимы антенны с высокой прецизионной точностью отражающей поверхности, для выполнения поставленных задач приходится искать новые конструкторско-технологические решения. Раскрыта технология изготовления силовой рамы, входящей в состав рефлектора.*

*Ключевые слова: рефлектор, вытравляемая оснастка, препрег, силовая рама, углепластик.*

## LOAD FRAME AS THE STRUCTURE MEMBER OF THE LARGE-SIZED REFLECTOR

S. S. Kochetkova\*, V. E. Chichurin, V. V. Laizan, V. V. Bolgov, V. B. Taygin

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

\*E-mail: cot.0312@mail.ru

*Antennas with a high precision accuracy of the reflecting surface for modern space craft are needed and new design and engineering solutions must be sought for implementation of the tasks. The manufacturing technology of the load frame which is a part of the reflector is disclosed in this article.*

*Keywords: reflector, etched facility, prepreg, load frame, carbon fibre reinforced plastic.*

К современным системам спутниковой связи предъявляются высокие требования к радиотехническим характеристикам антенн и составляющим их рефлекторам, которые используются в составе космического аппарата (КА) [1].

К антеннам космических аппаратов предъявляются высокие требования: жесткие ограничения по массе, жесткие требования к точности и размеростабильности.

На данный момент в конструкциях и технологиях изготовления рефлекторов нашли широкое применение сэндвич конструкции, состоящие из двух тонкостенных обшивок, соединенных между собой при помощи клеевого слоя через сотовый наполнитель [2]. При эксплуатации рефлектора возникает тепловое напряжение, которое появляется вследствие поглощения части энергии, что в свою очередь вызывает неравномерный нагрев и искажение рабочей поверхности (тепловые деформации).

Для устранения влияния внешних факторов необходимо минимизировать применение разнородных материалов в конструкциях и технологиях изготовления рефлектора, поэтому применена тонкая трехслойная сотовая конструкции отражающей поверхности и жесткая силовой рамы.

Конструкция прецизионного крупногабаритного рефлектора должна иметь:

- высокую точность отражающей поверхности;
- высокую стабильность геометрических размеров при работе в условиях космического пространства;
- минимальную поверхностную массу.

Задачей настоящей работы является изготовление рефлектора с силовой рамой, обеспечивающей высокую жесткость конструкции.

Существующие конструкции сотовых рефлекторов можно условно разделить на две группы [3–5]:

– с тонкой сэндвич конструкцией рефлектора, к которому с тыльной стороны приклеены силовые ребра (рис. 1).

– с тонкой сэндвич конструкцией рефлектора, к которому с тыльной стороны приклеена силовая рама при помощи пластин и уголков (рис. 2).

Отражатель рефлектор конструктивно выполнен в виде трехслойной сотовой конструкции. Высокие удельные жесткости оболочек обеспечиваются применяемым препрегом из равнопрочной ткани на основе высокомодульного волокна в качестве наполнителя используется алюминиевый сотовый наполнитель с минимальной высотой сводящий к минимуму влияние применения различных материалов при эксплуатации.

Силовая рама, поддерживающая рефлектор представляет собой трубу прямоугольного сечения в зависимости от требуемых задач по креплению к КА и рефлектору ее конфигурация может сильно видоизменяться. Внешний вид рамы с рефлектором представлен на рис. 3.

Силовая рама изготавливается с применением препрега из равнопрочной ткани на основе высокомодульного угольного волокна, по вакуумно – автоклавной технологии с использованием вытравляемой оснастки.

Процесс изготовления начинается с подготовки формирующей оснастки, которая определенным образом зачищается, обезжиривается и сушится. Эти операции направлены для обеспечения максимальной адгезии препрега и приспособления.

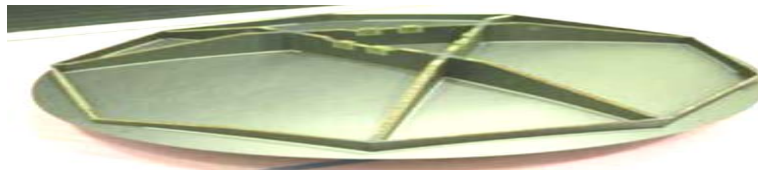


Рис. 1. Рефлекторы с реберным подкреплением компании MDA



Рис. 2. Рефлектор компании Astrium Space Transportation с рамой



Рис. 3. Внешний вид рефлектора с силовой рамой (АО «ИСС»)

Следующий этап – подготовленный препрег раскраивают на заготовки требуемой конфигурации. Методом ручной выкладки производится послойная выкладка нарезанных заготовок на приспособление по заданным углам ориентации, строго определенным образом чередуя заданное количество слоев.

Приспособление с уложенным препрегом помещается в вакуумный мешок и вакуумируется и проводится предварительная полимеризация в автоклаве с избыточным давлением и с температурой ниже температуры стеклования.

Следующим шагом происходит удаление алюминиевой оправки. После удаления приспособления производится окончательная полимеризация рамы, при этом температура поднимается выше точки стеклования.

В результате получаем силовую раму для поддержания рефлектора. Также данная конструкция имеет температурную и механическую развязку высокоточного отражателя и рамы и обладает улучшенными массовыми характеристиками при высокой жесткости и прочности конструкции.

#### Библиографические ссылки

1. Бахрах Л. Д., Галимов Г. К. Зеркальные сканирующие антенны. Теория и методы расчета. М. : Наука, 1981. С. 15–30.
2. Пат. 2070355 Российская Федерация, МПК7 H01Q15/16. Рефлектор антенны / Лепикаш Е. Р., Обухова Н. С., Зисман А. С. № 9300271 ; заявл. 15.01.1993 ; опубл. 10.12.1996. 7 с.: ил.
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 «ИСС» им. акад. М. Ф. Решетне-

ва». № 2013155354 заявл. 12.12.2013; опубл. 20.09.2015, Бюл. № 36. 5 с.: ил.

4. Nicolas Elie, Alain Lacombe, Stephan Baril. Ultra-light reflectors: a high-performance and industrial concept for commercial telecom antennas. Paris, EADS 28<sup>th</sup> ESA Workshop. P. 3–6.

5. Пат. 2655473 Российской Федерации, МПК H01Q15/16, H01Q1/12. Рефлектор / Белов О. А., Бердникова Н. А., Иванов А. В., Чичурин В. Е.; заявитель и патентообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос». № 2017120285 ; заявл. 08.06.2017; опубл. 28.05.2018, Бюл. № 16. 8 с.: ил

#### References

1. Bakhrakh L. D., Galimov G. K. Zerkal'nyye skaniruyushchie anteny. Teoriya i metody rascheta. [Mirror scanning antennas. Theory and methods of calculation]. Moscow, Nauka Publ., 1981. P. 15–30.
2. Lepikash E. R., Obukhova N. S., Zisman A. S. *Reflektor anteny* [Antenna reflector]. Patent RF, No. 2070355, 1993.
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. Nicolas Elie, Alain Lacombe, Stephan Baril. Ultra-light reflectors: a high-performance and industrial concept for commercial telecom antennas. Paris, EADS 28<sup>th</sup> ESA Workshop. P. 3–6.
5. Belov O. A., Berdnikova N. A., Ivanov A. V., Chichurin V. E. *Reflektor* [Reflektor]. Patent RF, 2017. No. 2655473.

© Кочеткова С. С., Чичурин В. Е., Лайзан В. В., Болгов В. В., Тайгин В. Б., 2018

УДК 629.78.023.222

## СПОСОБ СОЕДИНЕНИЯ ПОЛИИМИДНЫХ ПЛЕНОК ДЛЯ ЭКРАННО-ВАКУУМНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

С. Д. Крючек

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

*Представлен способ изготовления элементов системы тепловых экранов космической обсерватории «Миллиметрон» путем соединения металлизированных полиимидных пленок с помощью точечной сварки через пленочный полиимид ПИ-ПК-200.*

*Ключевые слова: тепловые экраны, полиимидные пленки, точечная сварка, «Миллиметрон».*

## METHOD OF COMPOUND POLYIMIDE FILMS FOR THERMAL BLANKET OF SPACECRAFT

S. D. Kryuchek

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: ksd@iss-reshetnev.ru

*The paper presents a method for manufacturing elements of the thermal screen system of the cosmic observatory "Millimetron" by combining metallized polyimide films by spot welding through polyimide film PI-PK-200.*

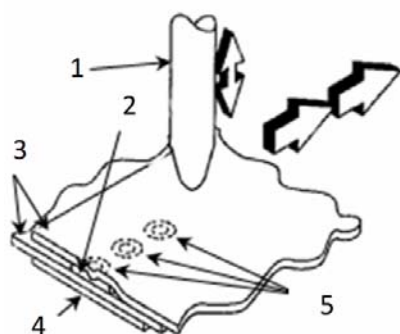
*Keywords: heat shields, polyimide film, spot welding, "Millimetron".*

В конструкции космической обсерватории «миллиметрон» для обеспечения криогенных температур ~4 К планируется применение беспрецедентно крупногабаритной экранно-вакуумной теплоизоляции (эвти). Экраны предполагается изготавливать из металлизированных полиимидных пленок марок ПМ-1ЭУ-ДА толщиной 20 мкм, выпускаемых в рулонах шириной 600 мм. Размеры отдельных элементов экрана составляют 10 метров в длину и 6 метров в ширину. Ранее отработанные способы соединения пленок в экраны имеют ряд недостатков для применения при криогенных температурах [1; 2].

В лабораторных условиях АО «ИСС» разработан альтернативный способ соединения полиимидных пленок (далее сварка) представляющий собой процесс, при котором пленки соединяются с образованием адгезионных связей между клеевой прослойкой и

соединяемыми пленками. В качестве клеевой прослойки используется полиимид пленочный клеевой марки ПИ-ПК-200, способный переходить в жидкую форму (расплав) при нагревании, и застывать при охлаждении [3]. Последовательный ряд из одной или нескольких точек образует шов. Сваривание пленок осуществляется путем сдавливания в вертикальном направлении пакета пленок одним или одновременно несколькими нагретыми наконечниками. Схематичное изображение процесса сварки представлено на рисунке [4; 5].

При сваривании пленок данным требуется точный контроль усилия сдавливания и температуры наконечника во избежание прожигания пленок. Преимуществом такого соединения при криотемпературах является сохранение эластичности по сравнению с клеевыми соединениями.



- 1 – нагретый наконечник;
- 2 – полиимидная клеевая (ПИ-ПК-200);
- 3 – свариваемые пленки (ПМ-1ЭУ-ДА);
- 4 – эластичная теплоизоляционная пластина;
- 5 – точки сварки

Схематичное изображение процесса сварки

Разработанное в лаборатории АО «ИСС» приспособление позволяет сваривать пленки длиной до 60 мм только в ручном режиме, и воспроизводимость режима от точки сварки к точке полностью зависит от действий оператора. Это в значительной степени влияет на прочность сварного соединения и составляет от 30 до 100 % от прочности исходной пленки.

Для применения данного способа в промышленных масштабах необходимо изготовление автоматизированной установки, позволяющей проводить сварку пленок по воспроизводимым режимам для получения требуемой прочности соединения.

#### Библиографические ссылки

1. Акишин А. И. Космическое материаловедение. Методическое и учебное пособие. М. : МГУ, 2007. 209 с.
2. Михайлов М. М. Радиационное и космическое материаловедение. Томск : Изд-во Томск. ун-та, 2008. 440 с.
3. Кацнельсон М. Ю., Балаев Г. А. Пластичные массы: Свойства и применение : справ. Л. : Химия, 1978. 384 с.
4. Waldie D. D., Gilman L. N. Technology Development for Large Deployable Sunshield to Achieve Cryogenic Environment // AIAA. 2004. P. 5987.

5. Patent No: US 7,641,758 B2. G03G 15/01. Method for thermal seaming of polyimides/ Gregory Laue; Prior Publication Data: Oct. 30, 2008. Date of Petent: Jan. 5, 2010.

#### References

1. Akishin A. I. Kosmicheskoe materialovedenie [Space Materials Science]. Moskow, SINP MSU, 2007. 209 p.
2. Mikhaylov M. M. Radiatsionnoye i kosmicheskoye materialovedeniye [Radiation and space materials science]. Tomsk : Tomsk University Press, 2007. 440 p.
3. Kacnel'son M. Ju., Balaev G. A. Plastichnye massy: Svoystva i primeneniye: Spravochnik. L. : Himija, 1978. 384 p.
4. Waldie D. D., Gilman L. N. Technology Development for Large Deployable Sunshield to Achieve Cryogenic Environment // AIAA, 2004. P. 5987.
5. Patent No: US 7,641,758 B2. G03G 15/01. Method for thermal seaming of polyimides/ Gregory Laue; Prior Publication Data: Oct. 30, 2008. Date of Petent: Jan. 5, 2010.

© Крючек С. Д., 2018

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛЕНТОЧНОГО ШТЫРЯ В ТРАНСПОРТИРОВОЧНОМ ПОЛОЖЕНИИ

И. В. Кудрявцев<sup>1\*</sup>, О. Б. Гоцелюк<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет

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

<sup>2</sup>АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

\*E-mail: OrIGott@yandex.ru

*Предлагается методика оценки напряжённо-деформированного состояния ленточного штыря с учетом его конструктивных особенностей и внешних воздействий в транспортном положении в составе космического аппарата.*

*Ключевые слова: космический аппарат, ленточный штырь, математическая модель, метод расчета, напряжения, деформации, кривизна, аппроксимация.*

## THE STRESS-DEFORMED STATE OF THE TAPE SPRING IN OVER-THE-ROAD POSITION

I. V. Kudryavtsev<sup>1\*</sup>, O. B. Gotselyuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

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

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

*The technique of the analysis of the stress and deformed state of the tape spring taking into account its design features and external influences in transport position in structure of the spacecraft is offered.*

*Keywords: spacecraft, tape spring, mathematical model, method of calculation, stress, deformation, curvature, approximation.*

**Введение.** С целью минимизации массогабаритных показателей крупногабаритных узлов космических аппаратов (КА) их проектируют как трансформируемые конструкции, которые способны из компактного транспортировочного положения при запуске КА развертываться в рабочее состояние за счет зацепок, шарниров, сил упругости пружин и др. [1]. Одним из таких трансформируемых узлов является протяженный ленточный штырь в виде стержня с упруго-деформируемым сечением (см. рисунок, *а*). В сложенном положении сечение ленточного штыря принимает вид полосы (см. рисунок, *б*), которую наматывают на барабан цилиндрической формы (см. рисунок, *в*). На требуемой орбите ленточный штырь разворачивается и за счет сил упругости вновь принимает вид стержня с рабочей формой сечения.

Трансформации ленточного штыря в транспортировочное положение и обратно в рабочее состояние возможно только при работе материала в упругой области деформирования без появления опасных напряжений, для этого необходимо разработать соответствующие методы расчета его напряженно-деформированного состояния (НДС).

**Математическая модель.** Анализ геометрии ленточного штыря показывает, что для него выполняется

как условие тонкостенности из теории оболочек [2; 3], так и условие протяженности для стержневой конструкции

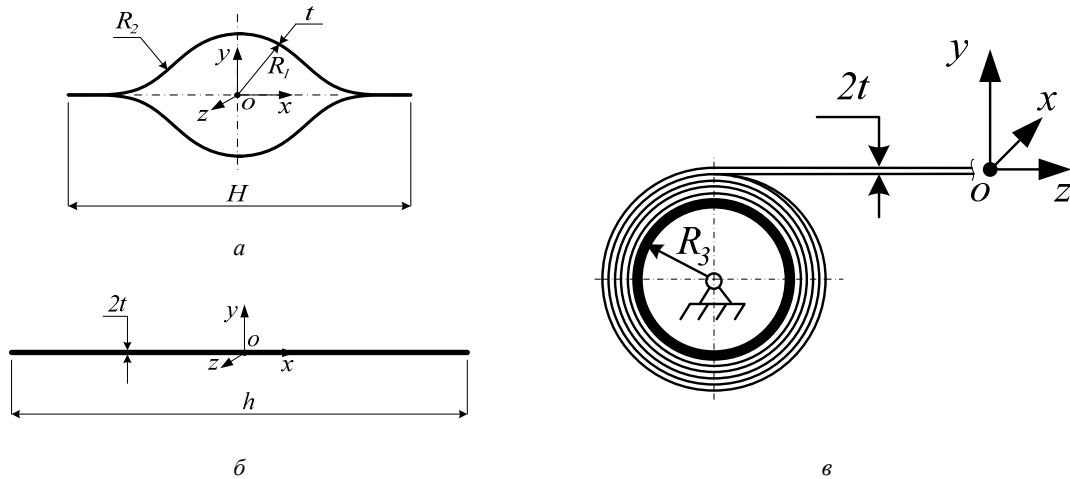
$$t/R_1 < 0.1, 2R_1, H, h \leq L,$$

где  $L$  – длина ленточного штыря, м.

С учетом особенностей локального деформирования ленточного штыря в транспортировочное положение необходимо использовать теорию оболочек и рассматривать его материал как линейный идеально-упругий, работающий в пределах упругой области. Рассмотрим НДС ленточного штыря на каждом из видов трансформации.

При трансформации поперечного сечения стержня из исходного рабочего (см. рисунок, *а*) в сложенное (см. рисунок, *б*) положение возникают большие перемещения в плоскости  $xu$ , что требует использования нелинейной теории оболочек и затрудняет аналитический расчет. Однако в нашем случае задача будет обратной: определить напряжения по известным деформациям, которыми являются перемещения стенок поперечного сечения штыря из исходной формы в сложенное состояние. Согласно теореме Бетти [4] получим, что НДС при складывании поперечного сечения идентично НДС при его восстановлении в исходную форму, отличаясь знаком.





Форма поперечного сечения ленточного штыря:  
 а – рабочее положение; б – сложенное положение; в – транспортировочное положение

Поскольку деформирование поперечного сечения происходит по всей длине ленточного штыря, то в материале будет возникать только напряжения от цилиндрического изгиба:

$$\sigma_x = \pm \frac{E \cdot y}{1 - \mu^2} \rho_x = \pm \frac{E \cdot y}{1 - \mu^2} \cdot \frac{w''_{xx}}{\left(\sqrt{1 + (w'_x)^2}\right)^3}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль Юнга материала ленточного штыря, Па;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $\rho_x = \rho(x, y)$  – кривизна исходной формы поперечного сечения штыря по оси  $x$ ;  $y$  – расстояние от нейтральной поверхности штыря до поверхности,  $t/2 \geq y \geq -t/2$ , м;  $w = w(x, y)$  – функция, описывающая геометрию поперечного сечения штыря.

Функцию формы сечения  $w$  определим путем аппроксимации рабочей формы поперечного сечения ленточного штыря некоторой аналитической функцией, используя, например, метод наименьших квадратов [5]. С учетом свойств симметричности формы поперечного сечения достаточно подобрать функцию  $w$  только для его четверти (см. рисунок, а). Наибольший интерес обычно представляют области функции  $w$  с максимальными значениями кривизны, в которых будут возникать опасные напряжения изгиба.

При трансформации ленточного штыря в транспортировочное положение также будет происходить его цилиндрический изгиб, но уже в плоскости  $yz$  (см. рисунок, в), приводя к появлению нормальных напряжений в направлении оси  $z$ :

$$\sigma_z = \pm \frac{E \cdot y}{1 - \mu^2} \rho_z = \pm \frac{E \cdot y}{1 - \mu^2} \cdot \frac{w''_{zz}}{\left(\sqrt{1 + (w'_z)^2}\right)^3}, \quad (2)$$

где  $\rho_z = \rho(z, y)$  – кривизна ленточного штыря по оси  $z$ , определяется радиусом барабана  $R_3$ , м, и номером наматываемого на него слоя штыря (см. рисунок, в).

После трансформации ленточного штыря в транспортировочное положение произойдет наложение напряжений (1) и (2) по принципу суперпозиции, образуя плоское напряженное состояние. Напряжения

(1) и (2) для любого выделенного элемента ленточного штыря будут являться главными и в общем случае не будут равны друг другу, что приводит к появлению касательных напряжений:

$$\tau = \frac{1}{2} |\sigma_x - \sigma_z|. \quad (3)$$

Общее распределение всех напряжений (1–3) по конструкции ленточного штыря удобнее оценивать с помощью эквивалентных напряжений, например по 3-й теории прочности:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{III}} = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau^2}.$$

Разработанная математическая модель и аналитические зависимости позволяют выполнять оценку НДС ленточного штыря в транспортировочном положении и обосновывать рациональные параметры его конструкции.

### Библиографические ссылки

1. Straubel M. Evaluation of deployable space mast concept. DLR, NASA Release 9.28.11. 54 p.
2. Новожилов В. В. Теория тонких оболочек. СПб. : Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2010. 380 с.
3. Пикунь В. В. Механика оболочек. Владивосток : Дальнаука, 2009. 536 с.
4. Тимошенко С. П. Теория упругости. М., 1979. 560 с.
5. Гайдышев И. Анализ и обработка данных. СПб. : Питер, 2001. 750 с.

### References

1. Straubel M. Evaluation of deployable space mast concept. DLR, NASA Release 9.28.11. 54 p.
2. Novozhilov V. V. Teoriya tonkih obolochek. SPb. : Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2010. 380 p. (In Russ.).
3. Pikun' V. V. Mekhanika obolochek. Vladivostok : Dal'nauka, 2009. 536 p. (In Russ.).
4. Timoshenko S. P. Teoriya uprugosti. M., 1979. 560 p. (In Russ.).
5. Gajdyshv I. Analiz i obrabotka dannyh. SPb. : Pi-ter, 2001. 750 p. (In Russ.).

УДК 669.713.7

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОАКТИВНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ЗАДАЧИ РЕКОНФИГУРАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

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 использование конструкций на основе полимерных композиционных материалов с изменяющимся фазовым состоянием, выполняющих роль актуаторов и фиксаторов изделия.*

*Ключевые слова: реконфигурируемые конструкции, управление жесткостью и формой, полимерный композиционный материал с памятью формы.*

## THE USE OF THERMOSETTING POLYMER COMPOSITES FOR THE REALIZATION OF THE OBJECTIVES OF RECONFIGURATION DESIGNS AVIATION AND SPACE EQUIPMENT

A. N. Likhachev

Baltic State Technical University "Voenmeh" named after D. F. Ustinov  
1, 1st Krasnoarmeyskaya Str., 190005, Saint Petersburg, Russian Federation  
E-mail: alikhachev@yandex.ru

*The results of studies related to the creation of controlled structures of aerospace technology allows to change the shape of the surface, with the use of structures based on polymer composite materials with a changing phase state, acting as actuators and fixators of the product.*

*Keywords: Reconfigurable designs, stiffness and shape control, polymer composite material with shape memory*

Проблема создания конструкций с изменяемой формой и размерами, адаптирующейся к меняющиеся внешние условиям в процессе эксплуатации изделия, является актуальной для многих задач авиационно-космической техники, таких как задачи создания крупногабаритных космических конструкций, точной настройки и коррекции оптических систем аппаратов ДЗЗ, управление формой несущих поверхностей самолетов и роторов вертолетов и т. п. [1–2].

Для таких задач реализация требуемой формы изделия, изменяющейся во времени и в пространстве, создание необходимого усилия, обеспечивающего реализацию необходимой геометрии конструктивного элемента и фиксации этой формы с требуемой точностью на определенном отрезке времени, является ключевой проблемой.

В данной работе рассматриваются некоторые результаты исследований, направленных на создание принципа управления формой конструкции с помощью термоактивных полимерных композиционных материалов, обеспечивающих необходимую деформацию поверхности конструкции в произвольных зонах и её последующую фиксацию для получения требуемой конфигурации изделия. Целью работы является в создании структуры, которая может менять свою форму, а затем фиксировать его в виде жесткой конфигурации.

Рассмотрен механизм актуации, возникающий при температурном воздействии на структуру композици-

онного материала представляющую собой слоистую конструкцию, состоящую как минимум из набора двух слоёв термоактивных полимеров, имеющих различные физико-механические и геометрические характеристики, в которых создаются внутренние напряжения за счёт определённым образом реализованного технологического процесса. В работе рассматривается задача фиксации деформированного элемента конструкции в определённом произвольном положении в различные моменты времени. Решение этой задачи получено путём использования в конструкции реконфигурируемого элемента полимерных материалов, изменяющих своё фазовое состояние.

В работе рассмотрен механизм деформации такой структуры с использованием допущения, о применении классической линейной модели, что позволяет записать уравнение для энергии деформации конструкции в виде:

$$U_1 = \frac{1}{2}(k_1 + k_2)\Delta x^2, \quad (1)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  жесткости соответствующих слоёв композиционной структуры, а  $\Delta x^2$  удлинение рассматриваемой структуры в процессе предварительного технологического нагружения. После ряда преобразований, в предположении о отсутствии потерь энергии при деформации изделия, получено выражение для угла прогиба такой структуры:

$$\theta = \sqrt{\frac{12(E_1^H + E_2^H)\eta}{h_1^2(E_1^C + E_2^C)\eta}} \varepsilon L, \quad (2)$$

где  $\eta = \frac{h_2}{h_1}$  – соотношение толщин слоёв композиционной структуры,  $E_1^H$  и  $E_2^H$ ,  $E_1^C$  и  $E_2^C$  – модули упругости первого и второго слоя полимера, при различных температурах, а  $\varepsilon$  и  $L$  являются величинами относительной деформации слоёв и длиной слоистой структуры.

Для оценки влияния изменения жесткостных свойств исследуемой структуры и их воздействия на механизм фиксации формы изделия была разработана аналитическая модель изменения жесткостных характеристик конструкции при изменении фазового состояния отдельных компонент структуры. Модель позволяет оценить эффективный модуль упругости конструкции  $E_{ef}$  в зависимости от характерных параметров структуры:

$$E_{ef} = E_m + \frac{12}{bh^3} \sum_1^{n_f} \frac{\pi}{4} E_f \left\{ \left( \frac{d_f}{2} \right)^4 \left[ 1 - \frac{E_m}{E_f} \left( \frac{d_h}{d_f} \right)^4 \right] + 4 \left( \frac{d_f}{2} \right)^2 y_f^2 \left[ 1 - \frac{E_m}{E_f} \left( \frac{d_h}{d_f} \right)^2 \right] \right\} \quad (3)$$

В этом выражении  $E_m$ ,  $E_f$  – модули упругости матрицы и армирующего волокна,  $d_f$  и  $d_h$  –

диаметры армирующего волокна и наружный диаметр зоны матрицы с фазовым переходом,  $b$  и  $h$  – ширина и толщина элемента структуры с изменяемой жесткостью, а  $y_f$  – расстояние от срединной поверхности композита до центра армирующего волокна. Зная величину прогиба структуры можно связать её с величиной силы  $F$ , реализуемой при деформации такой структуры в соответствии с выражением (3):

$$F = \frac{2E_{ef}I\theta}{L^2}. \quad (4)$$

Используя полученную аналитическую модель, было исследовано влияние предварительной деформации слоёв  $\varepsilon$  и их относительной толщины  $\eta$  на угол прогиба  $\theta$  и максимальное значение восстанавливающей силы  $F$ . Показано, что с увеличением предварительной технологической деформации происходит увеличение величины угла прогиба, значения восстанавливающей силы и величины, накопленной энергии деформации структуры. Предварительные расчёты с использованием вышеизложенной модели показали возможность изменения эффективного модуля упругости до 20 раз, в зависимости от структурных и вязкоупругих свойств компонент конструкции. Проведённые экспериментальные исследования с различными структурными конфигурациями композиционных образцов показали существенное изменение их жесткостных свойств (эффективный модуль упругости уменьшался с 93 ГПа до 4 ГПа) в процессе изменения фазового состояния термоактивного полимера, что позволило реализовать большие деформации образца при относительно низких энергетических затратах с последующей фиксацией его формы.

Экспериментально показано, что после охлаждения образца до комнатной температуры, величина  $E_{ef}$  возвращается к исходному значению. Проведение циклических испытаний – 40 циклов изменения температуры от комнатной (22 °С) до максимальной (110 °С) показали незначительное изменение модуля упругости при возврате как комнатной, так и к максимальной температуре нагрева при циклическом нагреве и охлаждении. Были рассмотрены различные варианты армирования композиционной структуры, показана существенно более высокая податливость конструкций на основе однонаправленных материалов по сравнению с ткаными структурами. Выявлен эффект снижения уровня катастрофического разрушения конструкции при воздействии сжимающих напряжений при изменении фазового состояния термоактивного материала, что позволяет использовать такой подход для компенсации ударных воздействий на конструкцию в процессе её эксплуатации.

Разработанный подход, позволяет изменять форму конструкции с использованием композиционных структур на основе термоактивных полимеров. Использование композиционных конструкций на основе полимерных материалов, меняющих свою жесткость при изменении их фазового состояния, существенно уменьшает требования к энергетическим характеристикам актуаторов. Использование принципа накопления предварительной деформации в термоактивных материалах позволяет реализовать эффект «памяти формы» и обеспечить реверсивное воздействие на элементы конструкции с целью реконфигурации изделия. Продемонстрирована, в том числе и экспериментально, возможность изменения формы, при создании постоянного усилия нагружения и управляемого изменения эффективного модуля упругости структуры за счёт использования термоактивных полимерных материалов с изменяемым фазовым состоянием. Показано, что подход, позволяющий реализовать управление формой композиционной структуры, с последующей её фиксацией, может быть перспективен при создании трансформируемых и формоизменяющихся конструкций авиационно-космической техники.

#### Библиографические ссылки

1. Vasista, S., Tong, L., Wong, K. Realization of morphing wings: A multidisciplinary challenge // Journal of Aircraft. 2012. № 49 (1). P. 11–28.
2. Weisshaar T. A. Morphing aircraft systems: Historical perspectives and future challenges // Journal of Aircraft. 2013. № 50 (2). P. 1–17.

#### References

1. Vasista, S., Tong, L., Wong, K. Realization of morphing wings: A multidisciplinary challenge. Journal of Aircraft. 2012. № 49 (1). P. 11–28.
2. Weisshaar T. A. Morphing aircraft systems: Historical perspectives and future challenges. Journal of Aircraft. 2013. № 50 (2). P. 1–17.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ЗАРЯДА

Е. Ю. Мартынова, А. Б. Пестов

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: E.lena-Mart@yandex.ru

*Рассматривается энергоэффективность системы электропитания космического аппарата за счет использования энергии электростатического заряда поверхности КА с целью повышения надежности и, как следствие, увеличения сроков активного существования.*

*Ключевые слова: энергоэффективность, солнечная батарея, система электропитания.*

## INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF A SPACECRAFT POWER SUPPLY SYSTEM USING THE ELECTROSTATIC ENERGY

E. Yu. Martynova, A. B. Pestov

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: E.lena-Mart@yandex.ru

*The energy efficiency of the power supply system of the spacecraft is discussed, using the energy of the electrostatic energy of the surface of the spacecraft in order to increase reliability and, as a consequence, to increase the duration of active existence.*

*Keywords: energy efficiency, solar battery, power supply system.*

На космический аппарат (КА) за время вывода на орбиту и эксплуатации воздействует в различной мере множество факторов окружающего пространства. Одним из них является электризация – взаимодействие КА с окружающей магнитосферной плазмой и приобретение его конструкцией некоторого электрического заряда, обусловленного поступлением на поверхность КА потоков заряженных частиц, а также потоков, отраженных от его поверхностей [1].

В результате длительного воздействия зарядов на КА наблюдается большое количество отклонений в работе бортовой аппаратуры и оборудования. Наиболее интенсивному воздействию факторов электризации подвергается одна из основных жизнеобеспечивающих систем КА – система энергопитания, а точнее ее основной узел – солнечные батареи (БС). Многослойная конструкция БС, состоящая из слоев диэлектриков, проводников и полупроводников, а также их большая площадь (до 60 м<sup>2</sup>) и практически абсолютная незащищенность от воздействия потоков заряженных частиц магнитосферной плазмы, обеспечивают «идеальные» условия для накопления на их поверхности и объеме электрического заряда, и как следствие этого – развитие электростатических разрядов [1–2].

В целом, вредное влияние электризации ухудшает надежность его бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА), СБ и снижает гарантийный ресурс КА, что обуславливает необходимость принятия мер [3].

В связи с этим возникает технически обоснованное предложение, связанное с возможностью накопления энергии статического электричества и ее использования для дополнительной подзарядки батарей КА, что позволит повысить их ресурс и энергоэффективность системы питания, а также снизить вредное влияние электризации.

Предлагается создать электрофизическую модель (рис. 1). Куда вносятся тип, свойства конструктивных материалов КА, материалы покрытий и геофизические условия. На основе данной модели определяются места расположения, на поверхности КА, устройств переноса электростатических зарядов [4–5].

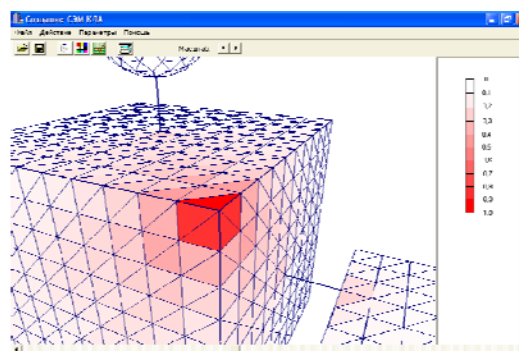


Рис. 1. Пример визуализации структурной электрофизической модели КА с аномальными местами возникновения ЭСР

Среда вокруг играет роль электростатического генератора, осаждая на поверхности космического аппарата заряженные частицы. Устройством переноса заряда на аккумуляторные батареи (АКБ) космического аппарата могут служить специальные зарядные системы, состоящие из расположенных по поверхности заряжающих электродов (рис. 2). Зарядный электрод минимальных размеров представляет собой универсальное устройство для подачи напряжения питания до сотен кВ, допускающий большое напряжение. Потенциал с поверхности КА переносится посредством кабельной сети на АКБ.

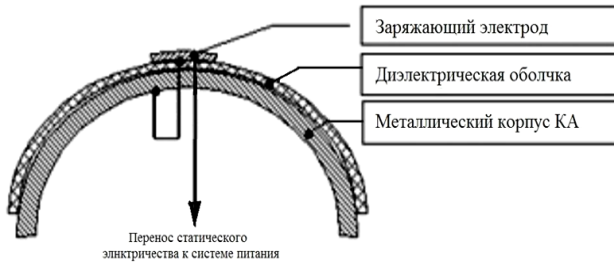


Рис. 2. Заряжающий электрод на поверхности КА

В большинстве КА система электропитания устроена одинаково, где солнечные панели преобразуют солнечную энергию в электрическую. Электрическая энергия преобразуется, накапливается, стабилизируется и распределяется по электронным нагрузкам, которые представлены, главным образом, аналоговыми и цифровыми приборами, широкополосными радиоэлектронными схемами. Далее энергию получают преобразователи от шины питания КА, которая для большинства схем хорошо стабилизирована [5]. В привычную для нас схему электроснабжения предлагается внедрить аппаратуру накопления заряда. Внедрение зарядной системы не внесет существенных коррективов в схему питания КА, так как электростатический потенциал точно так же, как энергия, полученная от СБ, будет задействовать штатные блоки стабилизации напряжения и АКБ.

Подводя итоги, можно сделать вывод, что за счет внедрения аппаратуры накопления заряда позволяет улучшить энергоэффективность системы питания КА, также позволяет снизить вредное влияние электризации и продлить срок службы КА.

## Библиографические ссылки

1. Космическая электроэнергетика сегодня и завтра / А. С. Коротеев, Е. М. Кошеляев, А. И. Решмин // Известия РАН. Энергетика. 2001. № 5. С. 3–16.
2. Летин В. А. Проблемы электризации солнечных батарей космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2008. № 1 (30). С. 43–50.
3. Новикова Л. С. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов: Модель космоса. 8-е изд. Т. 2. М. : КДУ, 2007. 1143 с.
4. Дорوفеев Р. Ю. Алгоритм для моделирования электризации КА в орбитальных условиях эксплуатации // Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий : сб. тез. IV Всерос. науч.-техн. конф. (15–17 июня 2011 г.). М. : Радиотехника, 2011. С. 562–567.
5. Комягин С. И., Соколов А. Б. Математическая модель электромагнитной стойкости. Электромагнитная совместимость и проектирование электронных средств : сб. научных трудов. М. : МИЭМ. 2008. С. 19–21.

## References

1. Space Electric Power Industry Today and Tomorrow / Koroteev AS, Koshelyaev EM, Reshmin AI // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering. 2001. № 5. P. 3–16.
2. Letin V. A. Problems of electrification of solar batteries of space vehicles. Astronautics and rocket science. 2008. No. 1 (30). P. 43–50.
3. Novikova. L. S. The impact of the space environment on the materials and equipment of space vehicles: the Space Model. 8 th ed. T. 2; under the editorship. M. : KDU. 2007. 1143 p.
4. Dorofeev R. Yu. Algorithm for simulation of spacecraft electrification in orbital operating conditions. Proceedings of the IV All-Russian scientific and technical conference “Actual problems of rocket and space instrument making and information technologies”. June 15–17, 2011 M. : Radio engineering, 2011. P. 562–567.
5. Komyagin S. I., Sokolov A. B. Mathematical model of electromagnetic stability. Electromagnetic compatibility and design of electronic facilities. Collection of scientific papers. Moscow, MIEM. 2008. P. 19–21.

© Мартынова Е. Ю., Пестов А. Б., 2018

УДК 678; 677.4; 532.64

## ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПКМ С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ МАТРИЦЕЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ РЕФЛЕКТОРОВ\*

Р. Ф. Масалимов

Ресурсный центр коллективного пользования «Космические аппараты и системы»  
Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: truemongol@gmail.com

*Трансформируемая оболочка позволяет уменьшить габариты при транспортировке и разместить рефлектор под обтекателем ракетносителя. Конструкциям из ПКМ легко придать необходимую форму в то время, как получение тонкой оболочки двойной кривизны из металла является дорогостоящей и трудоемкой технологической задачей.*

*Ключевые слова: интеллектуальный материал, полимерная оболочка, крупногабаритный трансформируемый рефлектор.*

## ADVANTAGES OF USING PCM WITH INTELLIGENT MATRIX WHEN MANUFACTURING REFLECTORS

R. F. Masalimov

Resource Center of the Collective Use "Spacecraft and Systems"  
of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: truemongol@gmail.com

*The transformable shell allows to reduce the dimensions during transportation and place the reflector under the fairing of the launch vehicle. Constructions from PCM can be easily shaped. For example, obtaining a thin shell of double curvature from metal is an expensive and time-consuming technological task.*

*Keywords: intellectual material, polymeric shell, large-size transformable reflector.*

В реализованных конструкциях крупногабаритных трансформируемых рефлекторов отражающая поверхность изготовлена из металлизированного сетчатого полотна.

Главным недостатком такого решения является требование натяжения для обеспечения необходимой точности [1].

Корпорация Nagris в настоящее время разрабатывает платформу следующего поколения с большим деапоном радиочастотного отражения, называемую гибкий прецизионный рефлектор (Flexible Precision Reflector (FPR)). FPR значительно продвинет системы спутниковой связи, предоставив антенны с очень большой апертурой, которые будут уложены в существующие кожухи ракеты-носителя по относительно низкой цене и количеству деталей. Кроме того, заменяя традиционные сетчатые поверхности на готовый композитный материал, антенна FPR будет работать на радиочастотах выше 40 ГГц [2].

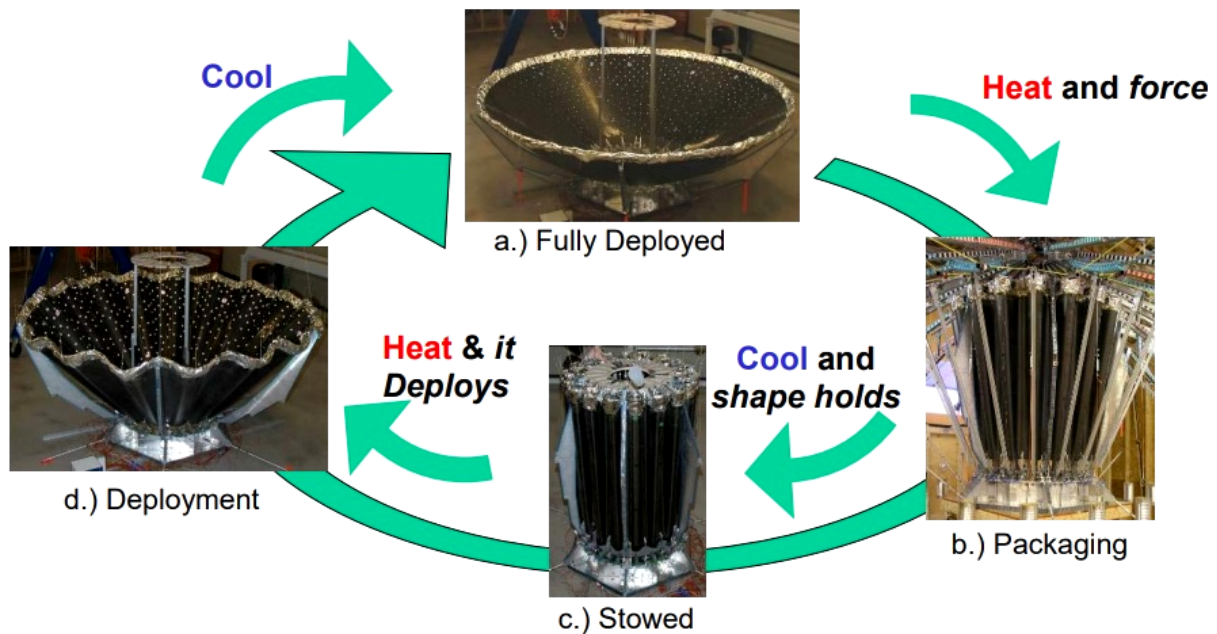
Для повышения точности, увеличения жесткости, уменьшения массы рефлектора необходимо использовать в качестве отражающей поверхности оболочку

из полимерной матрицы армированной углеволокном [3].

Трансформация оболочки обеспечивает матрица из интеллектуальных полимерных композиционных материалов с применением материалов с памятью формы (интеллектуальных ПКМ) [4]. Такими материалами являются полиуретан (DiAPLEX, SMP Technologies Inc.), SMP на основе полистирола (Veriflex®, Verilyte™, Veritex™, Cornerstone Research Group, Inc.), алифатический полиуретан (Tecoflex®, Lubrizol Advanced Materials), эпоксидный SMP (TEMBO®, Composite Technology Development, Inc.).

Данные материалы обладают способностью контролируемым образом реагировать на изменяющиеся внешние воздействия, изменяя свои функциональные свойства, формы и прочие характеристики. Изделия из таких материалов способны самостоятельно приобретать нужную форму из компактной транспортно-бельной формы [5]. На рисунке представлен трансформируемый рефлектор с оболочкой из композита с памятью формы [6].

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Министерства образования и науки Российской Федерации) по договору 02.G25.31.0147.



Макет трансформируемого рефлектора с полимерной оболочкой

## Библиографические ссылки

1. Понамарев С. В. Трансформируемые рефлекторы антенн космических аппаратов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2011. № 4 (12). С. 110–119.
2. Keller P. N., Lake M. S., Codell D. Development of Elastic Memory Composite Stiffeners for a Flexible Precision Reflector, *Composites in manufacturing* Second quarter. 2007. Vol. 23, No. 2. P. 4–5.
3. Ning Zheng, Guangqiang Fang, Zhengli Cao, High strain epoxy shape memory polymer. *Polymer Chemistry*, Mar 2015. P. 3046–3053.
4. Shape memory polymer network with thermally distinct elasticity and plasticity. *Science Advances*. 2016. Vol 2, No. 101 January.
5. Tibert G. A. Deployable Tensegrity structures for space Applications: PhD thesis. Stockholm, 2002.
6. Robert M Taylor, Ph. D. Composite Technology Development NASA Program Manager: Eduardo Torres-Martinez, *Earth Science Technology Forum* June 21, 2011 Pasadena, CA.

## References

1. Keller P. N., Lake M. S., Codell D. Development of Elastic Memory Composite Stiffeners for a Flexible Precision Reflector, *Composites in manufacturing*, 2007. Vol. 23, No. 2. P. 4–5.
2. Ponomarev S. V. [Transformable aerial reflectors of space vehicles], *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*. 2011. № 4 (12). P. 110–119. (In Russ).
3. Ning Zheng, Guangqiang Fang, Zhengli Cao, High strain epoxy shape memory polymer. *Polymer Chemistry*, Mar 2015. P. 3046–3053.
4. Shape memory polymer network with thermally distinct elasticity and plasticity. *Science Advances*. 2016. Vol 2, No. 101. January
5. Tibert G.A. Deployable Tensegrity structures for space Applications: PhD thesis. Stockholm, 2002.
6. Robert M Taylor, Ph.D. Composite Technology Development NASA Program Manager: Eduardo Torres-Martinez, *Earth Science Technology Forum* June 21, 2011 Pasadena, CA.

© Масалимов Р. Ф., 2018

УДК 621.914:629.76/78.023

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ПОЗВОЛЯЮЩИЕ ПОВЫСИТЬ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ СОТОВЫХ ПАНЕЛЕЙ

А. М. Мельник\*, В. В. Двирный

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
\*E-mail: melnikam@iss-reshetnev.ru

*Описаны основные трудности обработки резанием композиционных материалов (КМ), анализ современных технологий, преимущества и необходимость в дальнейших разработках в области проектирования и изготовления твердосплавных монокристаллических концевых фрез для механической обработки на современном высокопроизводительном оборудовании с числовым программным управлением (ЧПУ) сотовых панелей, используемых в конструкции многофункциональных космических аппаратов (КА).*

*Ключевые слова: режущий инструмент (РИ), твердосплавные монокристаллические концевые фрезы, сотовые панели с применением углепластиковых обшивок, роутер, эффективность.*

## MODERN TECHNOLOGIES THAT INCREASE THE EFFICIENCY OF MILLING OF HONEYCOMB PANELS

A. M. Melnik\*, V. V. Dvirniy

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
\*E-mail: melnikam@iss-reshetnev.ru

*This article describes main difficulties of cutting processing of composite materials (CM), analysis of modern technologies, advantages and necessity for further development in the field of design and manufacture of carbide monolithic end mills for machining using of honeycomb panels with carbon-fiber plates used in the multifunction spacecrafts (SC) design in conjunction with modern high-performance computer numerically controlled (CNC) equipment.*

*Keywords: machining tool (MT), carbide monolithic end mills, honeycomb panels with carbon-fiber plates, router, efficiency.*

В технологии изготовления современных приборов полезной нагрузки используют конструкции на основе трехслойных композиционных сотовых конструкций. Они представляют собой отдельные функционально законченные блоки, имеющие незначительную массу, что позволяет распределить общую массу, а не концентрировать ее на небольшой монтажной плоскости конструкции. Данная конструкция повышает устойчивость КА к факторам космического пространства. После полимеризации сотовых панелей выполняется их механическая обработка: обработка по контуру, выполнение вырезов, сверление отверстий под закладные элементы и пр. Качество поверхности изделий, используемых в ракетно-космической технике, играет важную роль в обеспечении высоких эксплуатационных показателей, надежности и продолжительности жизненного цикла изделия [1].

Существуют исследования, описывающие неэффективность применения традиционных методов в области обработки резанием КМ. Данные материалы стоит отнести к труднообрабатываемым. При обработке резанием КМ необходимо учитывать следующие их особенности: ярко выраженная анизотропия свойств; сложность получения высокого качества

поверхностного слоя; высокая твердость углеродных волокон; низкая теплопроводность; абразивное воздействие углеродных волокон на РИ; высокие упругие свойства; особые требования техники безопасности ввиду выделения мельчайших частиц материала при резании. Данные свойства углепластиковых обшивок приводят к преждевременному затуплению и снижению стойкости РИ. Одновременно с этим, при обработке изношенным РИ происходит расслоение обрабатываемого материала, разломачивание перерезанных волокон, что приводит к ухудшению качества поверхностного слоя [2].

Основным способом обработки КМ является лезвийная механическая обработка. К инструменту для обработки изделий из сотовых конструкций предъявляются высокие требования. Учитывая сложную конструкцию фрез, разогретые смолы в зоне резания губительно сказываются, как на стойкости инструмента, так и на качестве обрабатываемой поверхности. Увеличение температур в зоне резания приводит к подгоранию материала и нарушению его свойств. В то же время, низкие скорости резания приводят к деформации детали и смещению контура среза. Поэтому для этих работ используются высокопроизводительные станки с ЧПУ.



В данном случае возникает потребность в технологической оснастке и инструменте. Чтобы максимально сохранить сплошность, избежать дефектов материала и снизить деструкцию полимерного связующего необходимо применение РИ со специальной геометрией. На данном этапе в АО «ИСС» опробована обработка отверстий и вырезов методом винтовой интерполяции в сотовых панелях с углепластиковыми обшивками при помощи фрез с разнонаправленными режущими кромками.

Данные фрезы (роутеры) (см. рисунок) изготавливаются из твердосплавной монолитной шлифованной заготовки на 5-координатных заточных станках с ЧПУ. Подобные станки располагают в специальных помещениях с поддержанием требуемых параметров микроклимата для обеспечения постоянной точности шлифования и оптимальной производительности. Функции адаптивного прецизионного шлифования позволяют создавать геометрию зубьев роутера в виде высокопроизводительных разнонаправленных режущих кромок (пирамидок). Кроме традиционных методов контроля фрез, параметры подобного инструмента проверяют при помощи контактно-измерительного щупа, измерительной видеосистемы с увеличением и контрольно-измерительных машин [3].



Фреза-роутер

Роутеры, изготовленные в АО «ИСС», показали положительные результаты при обработке отверстий в трехслойных сотовых панелях с углепластиковыми обшивками. Качество поверхностного слоя отверстий, обработанных роутером собственного изготовления, было сопоставимо качеству обработанных отверстий аналогичным инструментом иностранных фирм. На качество обработанного поверхностного слоя и стойкость фрез влияет также наличие на РИ износостойкого покрытия. Что повышает эффективность использования инструмента за счет интенсификации режимов резания [4].

Альтернативными вариантами изготовления сквозных вырезов в обшивках и ребрах по производительности являются гидроабразивная и лазерная резка, для которых не требуется твердосплавный РИ. Как правило из-за габаритов изделий гидроабразивная резка не всегда подходит. Однако в данном случае не происходит скалывание и вырыв армирующего волокна, как при лезвийной обработке. Процесс выделения токсичных веществ и пыли также отсутствует. Температура в зоне резания при гидроабразивной резке низкая, что способствует отсутствию оплавлений. При гидроабразивной резке необходимо применение водоотталкивающих присадок, присутствует опасность насыщения композита водой.

Резка на лазерных установках обладает теми же преимуществами отсутствия лезвийной обработки, высокой скоростью, а также позволяет обрабатывать детали с малой жесткостью. Однако, в процессе резания происходит оплавление связующего и выделение токсичных веществ. Лазерная резка также имеет ограничения по форме и габаритам изделий [5].

Выводы:

1. Представленные методы обработки позволяют решить задачу повышения эффективности при обработке сотовых конструкций за счет применения новых конструкций РИ, определения оптимальных режимов резания, исследования термодинамических процессов, что влечет за собой повышение качества и производительности труда и снижение себестоимости.

2. Основным способом для получения вырезов и отверстий в трехслойных сотовых панелях остается лезвийная механическая обработка.

3. Изготовление твердосплавных монолитных концевых фрез в условиях подготовки производства ОА «ИСС» соответствует высокому технологическому уровню современных машиностроительных производств.

#### Библиографические ссылки

1. Халиманович В. И., Синьковский Ф. К., Ишенина Н. Н. Сотовые конструкции для космических аппаратов связи и навигации: опыт проектирования и изготовления // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники : сб. материалов III Междунар. науч.-практ. конф. (27–29 мая 2009, г. Днепропетровск) / Укр. НИИ технологии машиностроения. Днепропетровск, 2009. С. 161–171.
2. Буланов И. М., Воробей В. В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов : учебник для вузов. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. 516 с.
3. Мельник А. М., Кочеткова С. С. Инновации в области изготовления режущего инструмента для фрезерной обработки сотовых панелей // 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. Решетнёва. Красноярск, 2017. С. 636–638.
4. Гордовенко М. А., Михнёв М. М. Исследование повышения стойкости монолитных твердосплавных концевых фрез производства АО «ИСС» с износостойким покрытием // 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. Решетнёва. Красноярск, 2017. С. 485–487.
5. Мешкас А. Е., Макаров В. Ф., Ширинкин В. В. Технологии, позволяющие повысить эффективность обработки композиционных материалов методом фрезерования // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 8. Ч. 2. С. 291–299.

### References

1. Khalimanovich V. I. et al. [Communication and navigation satellite honeycomb panels. Experience in desing and manufacturing]. *Effektivnost sotovykh konstruksii v izdeliyakh aviatsionno-kosmicheskoi tekhniki* [Efficiency of aircraft/spacecraft honeycomb structures]. 3rd international workshop package, Dnepropetrovsk, May, 27–29, 2009. Ukr. NII tekhnologii mashinostroeniya. Dnepropetrovsk, 2009. P. 161–171.
2. Bulanov I. M., Vorobej V. V. *Tehnologija raketnyh i ajerokosmicheskikh konstruksij iz kompozicionnyh materialov* [Technology of rocket and aerospace designs from composite materials] : Ucheb. dlja vuzov. M. : Izd-vo MGTU im. N. Je. Baumana, 1998. 516 p.
3. Melnik A. M., Kochetkova S. S. [Innovations in the field of manufacture of a machining tool for milling of honeycomb panels]. *Materialy XXI Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXI Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2017. P. 636–638 (In Russ.)
4. Gordovenko M. A., Mihnev M. M. [Research of increasing tool life of the solid carbide end mills with wear-resistance coating manufactured by JSC «ISS»]. *Materialy XXI Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXI Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2017. P. 485–487 (In Russ.)
5. Meshkas A. E., Makarov V. F., Shirinkin V. V. *Tehnologii pozvolyayushchie povysit ehffektivnost obrabotki kompozicionnyh materialov metodom frezerovaniya* [Technology improves the processing of composite materials by milling]. *Izvestiya TulGU. Tehnicheskie nauki*. 2016. Vyp. 8. Ch. 2. P. 291–299.

© Мельник А. М., Двирный В. В., 2018

## ПРОБЛЕМЫ И ИХ РЕШЕНИЯ ПРИ ФОРМОВАНИИ СТРИНГЕРОВ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

О. А. Минаев

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

*Рассмотрена проблема изготовления стержневых изделий силового назначения, выполненных из композиционного материала, проанализированы технологии производства композитных труб, прутков, стержневых изделий сложного профиля. На основе этого предложена технология производства стрингеров из ПКМ сложной конфигурации ограниченного размера и веса применимо к ракетно-космической отрасли.*

*Ключевые слова: стрингер, композиционный материал, намотка труб, формовка, пултрузия.*

## PROBLEMS AND THEIR DECISIONS WHEN OBTAINING STRINGERS OF COMPLEX CONFIGURATION

O. A. Minaev

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

*In this paper, we consider the problem of manufacturing of power-driven core products made of composite material, the technologies for the production of composite pipes, rods, and rod products of a complex profile are analyzed. On the basis of this, a technology was proposed for the production of stringers from PCM of a complex configuration of limited size and weight applicable to the rocket and space industry.*

*Keywords: stringer, composite material, pipe winding, molding, pultrusion.*

Комплекс свойств полимерных композиционных материалов (ПКМ) определяется свойствами компонентов (матрица, наполнитель), их микро- и макро-структурой, границей раздела фаз, реакцией этих структур на внешние воздействия. ПКМ – гетерофазные материалы, в которых непрерывная матрица, взаимодействующая с наполнителем, воспринимает внешние нагрузки и перераспределяет их на наполнитель. Композиционные материалы с непрерывными волокнами имеют высокую прочность при ориентации волокон в направлении действующей силы, но резко выраженную анизотропию всех механических свойств. Использование современных композиционных материалов позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики изделий, снизить вес конструкций, в ряде случаев упростить технологический процесс получения изделий. Особенно актуально это по отношению к элементам конструкций авиационной, ракетной, транспортной техники, судостроения, энергетики в последнее время строительства и станкостроения. Значительную часть этих изделий составляют стержневые конструкции различных профилей поперечного сечения, используемых в качестве силовых или подкрепляющих элементов конструкций – тяг, лонжеронов, стрингеров, окантовки, каркасов, ферменных конструкций, балок, рам, валов и т. д. Однако, при производстве стержневых изделий

силового назначения узким местом, сдерживающим разработку поточных методов их изготовления, является процесс формообразования изделия заданного профиля и конструкции материала, обеспечивающих их эффективную работу при эксплуатации. Одним из путей решения данного вопроса является использование метода пултрузионного формования как одного из перспективных методов изготовления стержневых изделий [1].

При намотке стеклопластиковых труб, конструирование изделий из ПКМ с оптимальными расположениями армирующего наполнителя является важным элементом технического использования таких материалов. Меняя расположение волокон, схему армирования, можно менять физикомеханические свойства композита. ПКМ различаются также по структуре армирования каркасов. В зависимости от схемы армирования волокнистые КМ подразделяют на: однонаправленные (анизотропные) – имеют различия в свойствах в продольном и трансверсальном (поперечном) направлениях, ортотропные – угол армирования 90° и с планируемой анизотропией свойств. Зная реальные нагрузки, можно уложить наполнитель так, чтобы обеспечить необходимый уровень свойств [2].

Мы рассмотрим процесс получения стрингеров композитной панели концентраторной солнечной батареи космического назначения [3]. В данном случае

не одна из рассмотренных технологий не позволяет получить изделия удовлетворяющих характеристики допусков размеров и веса, вследствие этого обратимся к методу формования пуансон-матрица. На изготовленных опытных образцах проанализируем достоинства и недостатки этого метода получения стрингеров сложной конфигурации.

#### Библиографические ссылки

1. Макухин А. Г., Сыровой Г. В., Ратушняк А. Ю. Пултрузия, как технологический процесс изготовления изделий из композиционных материалов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2016. С. 99–106.
2. Влияние схемы намотки на формирование механических свойств изделий из композитов в продольном и поперечном направлении / Н. Н. Ходакова, А. Н. Блазнов, В. В. Самойленко // Южно-Сибирский вестник. 2016.
3. Исследование напряженного состояния локальных зон усиления композитной панели концентраторной солнечной батареи космического назначения, 2015 [Электронный ресурс]. URL: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe? C21COM](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe? C21COM)

=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE\_FILE\_DOWNLOAD=1&Image\_file\_name=PDF/Pptvk\_2015\_2\_3.pdf (дата обращения: 24.09.2018).

#### References

1. Makukhin A. G., Syrova G. V., Ratushnyak A. Yu. Pultrusion, as a technological process of manufacturing products from composite materials. Journal: Advanced Technologies and Systems Engineering, 2016. P. 99–106 (In Russ.).
2. The influence of the winding scheme on the formation of the mechanical properties of products from composites in the longitudinal and transverse direction / N. N. Hodakova, A. N. Blaznov, V. V. Samoilenko // South-Siberian Gazette, 2016 (In Russ.).
3. Investigation of the stress state of local amplification zones of the composite panel of a concentrator solar battery for space purposes, 2015. URL: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe? C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/Pptvk\\_2015\\_2\\_3.pdf](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe? C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Pptvk_2015_2_3.pdf) (accessed: 24.09.2018). (In Russ)

© Минаев О. А., 2018

УДК 629.78:681.2

## СИСТЕМА УПРАВЛЯЕМОГО ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО РАЗВЕРТЫВАНИЯ ПАНЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

П. П. Моисеев, А. И. Викторов

ООО «Научно-производственное предприятие «Астрон Электроника»  
Российская Федерация, 302019, г. Орел, ул. Веселая, 2  
E-mail: astronel-moiseev.pp@yandex.ru

*Рассмотрено раскрытие панелей солнечной батареи космического аппарата. Предложена система управляемого последовательного разворачивания панелей солнечной батареи. Показан состав системы и описаны ее преимущества.*

*Ключевые слова: управляемый спусковой регулятор, солнечная батарея, управляемое последовательное разворачивание, датчик углового положения, датчик конечного положения, преобразователь Холла.*

## SYSTEM OF MANAGED SEQUENTIAL DEPLOYMENT OF SUNNY BATTERY PANELS

P. P. Moiseev, A. I. Victorov

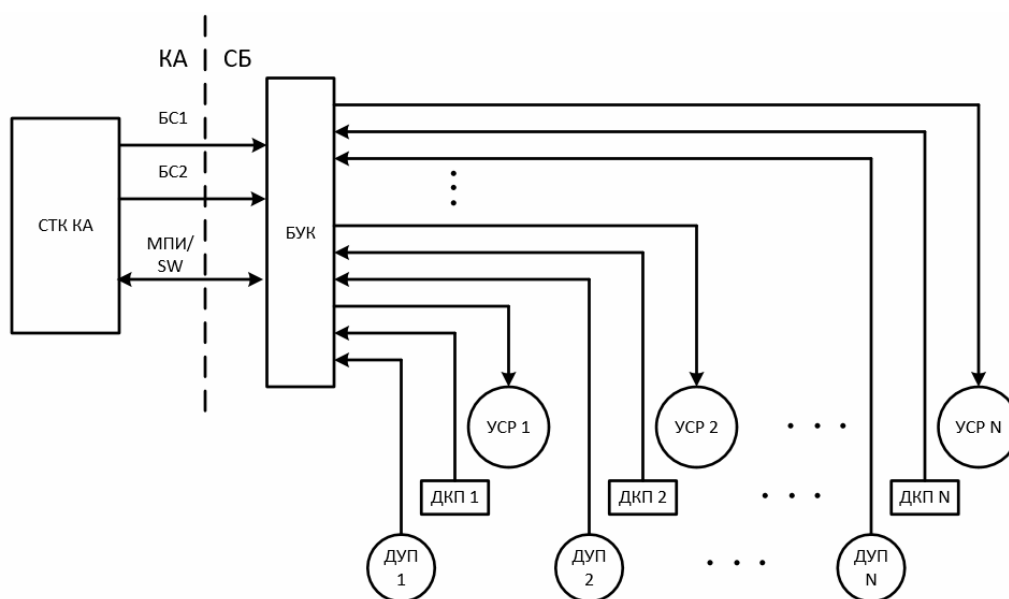
Scientific-production enterprise «Astron Electronics» Ltd  
2, Veselaya Str., Orel, 302019, Russian Federation  
E-mail: astronel-moiseev.pp@yandex.ru

*The disclosure of solar cell panels of a spacecraft is considered. A system of controlled sequential deployment of solar panel panels is proposed. The composition of the system is shown and its advantages are described.*

*Keywords: controlled trigger, solar battery, controlled sequential deployment, angular position sensor, end position sensor, Hall transducer.*

Последовательное разворачивание панелей солнечной батареи (СБ) космического аппарата (КА) из транспортного положения в рабочее положение в настоящее время производится с использованием электромеханических приводов раскрытия [1] с применением систем тросовой синхронизации и элементов задержки [2], что является трудоемкой и сложной за-

дачей. Для упрощения процесса синхронизации и последовательности разворачивания СБ предлагается система управляемого последовательного разворачивания с применением электромеханических управляемых спусковых регуляторов (УСР). На рисунке показана структурная схема системы управляемого последовательного разворачивания СБ.



Структурная схема системы управляемого последовательного разворачивания СБ

УСР встраиваются в шарнирные узлы раскрытия панелей СБ и обеспечивают управляемую фиксацию узлов раскрытия перед срабатыванием устройства расчеховки, последовательный управляемый старт, необходимую скорость развертывания, управляемый останов и последующее продолжение раскрытия. УСР состоит из планетарного редуктора и двух спусковых устройств с электромагнитными катушками. Управление раскрытием производится за счет подачи последовательности напряжений на электромагнитные катушки, частота которых определяет скорость раскрытия [3].

Для определения текущего угла поворота шарнирного узла раскрытия и его установку в заданное конечное положение применяются датчики углового положения (ДУП) и датчики конечного положения (ДКП) на преобразователях Холла [4; 5].

В систему управляемого последовательного развертывания СБ входит электронный блок управления и контроля (БУК), который устанавливается на кронштейне СБ и обеспечивает управление УСР и контроль параметров с ДУП и ДКП. БУК получает от системы телеметрического контроля (СТК) КА основное и резервное напряжения бортового питания и по магистральному последовательному интерфейсу ГОСТ Р 52070–2003 (МПИ) или SpaceWire (SW) получает управляющие команды от СТК КА и передает обратно телеметрическую информацию о состоянии датчиков.

#### Библиографические ссылки

1. Пат. 2472284 Российская Федерация, МПК H02P8/20 (2006.01), Электромеханический привод раскрытия / Порпылев В. Г., Черепанов Д. А., Леканов А. В., Халиманович В. И. 2011119197/11: заявл. 12.05.2011 ; опубл. 10.01.2013, Бюл. №1.
2. Крылов А. В., Чурилин С. А. Моделирование раскрытия солнечных батарей различных конфигураций // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. № 1. С. 106–112.
3. Моисеев П. П., Викторов А. И. Управляемый спусковой механизм для раскрытия конструкций космического аппарата // Решетневские чтения: материалы XX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнёва, (09–12 ноября 2016, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. Ч.1. С. 141–142.
4. Миниатюрные датчики микроперемещения, углового положения и силы на эффекте Холла / П. П. Моисеев, В. Б. Алымов, И. И. Нечушкин и др. // Решетневские чтения : материалы XIX Междунар.

научн.-практ. конф., посвящ. 55-летию Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнёва (10–14 нояб. 2015, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2015. Ч. 1. С. 289–290.

5. Моисеев П. П., Нечушкин И. И. Датчики контроля положений элементов трансформируемых конструкций космических аппаратов // Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. научн.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнёва, (08–11 нояб. 2017, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; СибГУ им. М. Ф. Решетнёва. Красноярск, 2017. Ч. 1. С. 151–152.

#### References

1. Pat. 2472284 Russian Federation, IPC H02P8/20 (2006.01), an Electromechanical actuator disclosure / Bobylev V. G., Cherepanov D. A., Leonov A. V., Khalimanovich V. I. 2011119197/11: Appl. 12.05.2011; publ. 10.01.2013, bull. No. 1.
2. Krylov A. V., Churilin S. A. Modeling of disclosure solar panels of different configurations // Vestnik MGTU im. N. Uh. Bauman. Ser. "Engineering". 2011. No. 1. P. 106–112
3. Moiseev P. P., Viktorov A. I. Controlled trigger mechanism for the disclosure of spacecraft structures // Reshetnev readings : materials of XX International. scientific-practical. conf., dedicated. memory of the general designer of rocket-space systems Academician M. F. Reshetnev, (November 9–12, 2016, Krasnoyarsk): at 2 pm / under total. Ed. Yu. Yu. Loginova; Sib. state. aerospace. un-t. Krasnoyarsk, 2016. Part 1. P. 141–142.
4. Miniature sensors of micromovement, angular position and force on the Hall effect / P. P. Moiseev, V. B. Alymov, I. I. Nechushkin et al. // Reshetnev Readings: Materials of the 19th International Conference. scientific-practical. conf., dedicated. 55 anniversary of Sib. state. aerospace. University of them. acad. M. F. Reshetneva (10–14 November 2015, Krasnoyarsk): 2 hours / under the total. Ed. Yu. Yu. Loginova; Sib. state. aerospace. un-t. Krasnoyarsk, 2015. Part 1. P. 289–290.
5. Sensors for the control of the positions of the elements of the transformed structures of space vehicles / PP Moiseev, II Nechushkin // Reshetnev Readings: Materials of XXI International. scientific-practical. conf., dedicated. memory of the general designer of rocket-space systems Academician M. F. Reshetnev, (08–11 November 2017, Krasnoyarsk) : at 2 h. / under the total. Ed. Yu. Yu. Loginova ; SibSU them. M. F. Reshetnev. Krasnoyarsk, 2017. Part 1. P. 151–152.

© Моисеев П. П., Викторов А. И., 2018

УДК 629.78.064.56

## РАЗРАБОТКА ГИБКИХ ВОЛНОВОДНЫХ СЕКЦИЙ ДЛЯ АНТЕННЫХ СИСТЕМ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СВЯЗИ

И. С. Морозков<sup>1</sup>, М. А. Трофимова<sup>1,2\*</sup>, С. А. Уханёв<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
<sup>2</sup>Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова  
Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1  
\*E-mail: marisha.trofy999888@mail.ru

*Рассмотрены основные проблемы создания гибких волноводных секций различных конфигураций для применения их при изготовлении антенных систем космических аппаратов*

*Ключевые слова: волновод, гибкая секция, волноводный тракт, антенная система.*

## DEVELOPMENT OF FLEXIBLE WAVEGUIDE SECTIONS FOR THE SUBMILLIMETER RANGE OF SPACECRAFTS OF COMMUNICATIONS

I. S. Morozkov<sup>1</sup>, M. A. Trofimova<sup>1,2\*</sup>, S. A. Ukhanyov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
<sup>2</sup>Baltic State Technical University "VOENMEKH" them. D. F. Ustinov  
1, 1st Krasnoarmeyskaya Str., St. Petersburg, 190005, Russian Federation  
\*E-mail: marisha.trofy999888@mail.ru

*The main problems of creating the flexible waveguide sections of various configurations for their application in the manufacture of spacecraft antenna systems*

*Keywords: waveguide, flexible section, waveguide channel, antenna system*

**Введение.** Волноводные тракты предназначены для передачи энергии в СВЧ антенных систем космического аппарата. В радиосистеме тракт занимает место между антенной и радиопередающим и радиоприемными устройствами. Он передает электромагнитную энергию, обеспечивает соответствующий режим входных цепей приемника, выполняет предварительную частотную фильтрацию сигналов, может содержать устройства изменения положения луча антенны в пространстве и устройства контроля работы радиосистемы [1].

В связи с увеличением потока обрабатываемой информации, более остро становится необходимость работы облучающих систем антенн в субмиллиметровом диапазоне, что требует высокой точности изготовления элементов данных систем.

Волновод, как изделие, состоит из алюминиевой, бронзовой или медной трубки, размеры и форма внутреннего сечения которой зависят от диапазона частот, и фланцев.

**Анализ.** В сводной таблице приведены результаты анализа зарубежных разработок именно для гибких волноводов. В табл. 1 приведены их характеристики.

Многие элементы, входящие в состав космического аппарата, изготавливают из углепластика, а СВЧ тракты из алюминия, бронзы и меди. Коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР),

к примеру, алюминия почти в 5 раз превышает КЛТР того же углепластика, что говорит о том, что даже при изменении температур в таком узком диапазоне как, например,  $\pm 50$  °С приводит к разности линейных размеров тракта и элементов из углепластика в соотношении 0,001/1 м.

Применение гибких волноводов в замыкающих трактах антенных систем необходимо для компенсации температурных деформаций, возникающих при нахождении космического аппарата на орбите, а также для компенсации монтажных неточностей, возникающих из-за суммируемых технологических отклонений.

Для работы в субмиллиметровом диапазоне частот на базе АО «ИСС» им. академика М. Ф. Решетнева проводится ряд исследовательских работ. Создана программа по отработке технологии изготовления антенных систем субмиллиметрового диапазона для космических аппаратов, в которую, в том числе, входят работы по разработке, изготовлению и испытанию гибких волноводов.

При изготовлении гибких волноводов возникает ряд сложностей, связанных с их конфигурацией:

- малые размеры сечений гибких секций (2,54×1,27; 5,69×2,84; 8,64×4,32 мм);
- жесткие допуски на изготовление достигают  $\pm 0,05$  мм.

Таблица 1

Характеристики гибких секций зарубежного производства

Параметр	Производитель			
	COBHAM	Flexiguide	Cernex; Microtech; Space machining & Engineering	Flann microwave
WR22 (5,69×2,84)	Бесшовный гибкий волновод			КВП-кабель-КВП
Коэффициент стоячей волны (КСВН), отн. ед. не более/ длина волновода, мм	1,3/300 1,4/460	1,22/300 1,35/600	1,1/610	1,4
Вносимые потери, дБ/м	1,65	2,5	0,16	3,5
WR19 (4,78×2,39)	Бесшовный гибкий волновод			КВП-кабель-КВП
КСВН, отн. ед. не более/ длина волновода, мм	–	нет данных	1,1/610	1,4
Вносимые потери, дБ/м	–	нет данных	0,26	6,5
WR15 (3,76×1,88)	Бесшовный гибкий волновод			КВП-кабель-КВП
КСВН, отн. ед. не более/ длина волновода, мм	–	нет данных	1,1/610	1,5
Вносимые потери, дБ/м	–	нет данных	0,36	12,5

Таблица 2

Одновременные статические деформации от номинального положения

Виды деформации	Пределы одновременных статических деформаций	
Растяжение/сжатие	1±0,1 (мм)	1±0,1 (мм)
Изгиб в плоскости E	2°±15'	–
Изгиб в плоскости H	–	0,5°±15'

Технические требования, предъявляемые к гибким волноводным секциям:

- 1) коэффициент стоячей волны не более 1,3;
- 2) потери не более 1,65 дБ/м;
- 3) давление 10<sup>-5</sup> мм рт. ст.;
- 4) температурный диапазон ±160 °С;
- 5) срок активного существования не менее 15 лет.

Гибкие секции, проходят проверку радиотехнических характеристик (РТХ) на соответствие техническому заданию. Измерения РТХ секции проходят также при испытаниях на одновременные статические деформации. При данном испытании на волновод воздействуют деформации на растяжение/сжатие и изгиб в каждой из плоскостей (E и H) и производится измерение РТХ в каждом положении. В табл. 2 сведены требования к одновременным статическим деформациям.

По результатам проделанных работ, которые, в том числе, относятся к государственной программе импортозамещения, на базе АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» получены положительные результаты, что указывает на правильность принятых конструктивных решений.

Библиографические ссылки

1. Смирнов В. В., Смолин В. П. Устройства СВЧ и антенны : учеб. пособие / БГТУ «Военмех». СПб., 2012.
2. Фролов О. П. Антенны и фидерные тракты для радиорелейных линий связи. М. : Радио и связь, 2001.
3. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ : учебник для радиотехнич. спец. вузов. М. : Высш. шк., 1988. 432 с.
4. Антенно-фидерные устройства : учебник / Г. Н. Кочержевский. 3-е изд., доп. и перераб. М. : Радио и связь.

References

1. Smirnov V. V., Smolin V. P. Ustroystva SVCH i anteny : ucheb. posobiye / BGTU "Voyenmekh". SPb., 2012.
2. Frolov O. P. Antenny i fidernyye trakty dlya radioreleynykh liniy svyazi. M. : Radio i svyaz', 2001.
3. Sazonov D. M. Antenny i ustroystva SVCH : uchebnik dlya radiotekhnich. spets. vuzov. M. : Vyssh. shk., 1988. 432 s.
4. Antenno-fidernyye ustroystva : uchebnik / G. N. Kocherzhevskiy. 3-e izd., dop. i pererab. M. : Radio i svyaz',

© Морозков И. С., Трофимова М. А.,  
Уханёв С. А., 2018



УДК 629.7.022

## МНОГОРАЗОВАЯ РАКЕТА-НОСИТЕЛЬ «ГРАВИКОН» ГРУЗОПОДЪЕМНОСТЬЮ ОТ 4 ДО 25 ТОНН

А. В. Овчар

ООО «ДиКонт»

Российская Федерация, 196655, Колпино, г. Санкт-Петербург, ул. Культуры, 14

E-mail: info@dikont.ru

*Обсуждается многоразовая ракета-носитель на основе неактивного двигателя Emdrive, бортового источника энергии на основе топливных элементов мощностью 100 кВт.*

*Ключевые слова: многоразовая ракета-носитель, Emdrive.*

## REUSABLE LAUNCH VEHICLES “GRAVICON” LIFTING CAPACITY FROM 4 TO 25 TONS

A. V. Ovchar

LLC “DiKont”

14, Kultura Str., Kolpino, Saint Petersburg, 196655, Russian Federation

E-mail: info@dikont.ru

*The article discusses a reusable spacecraft based on a non-reactive Emdrive engine, an onboard power supply based on fuel cells with a power of 100 kW*

*Keywords: reusable launch vehicles, Emdrive.*

В период с 2010 по 2018 г, автор Emdrive, Роджер Шойер (Roger John Shawyer) последовательно демонстрирует концепты летательных аппаратов с двигателем Emdrive, на основе применения сверхпроводящих (СП) СВЧ резонаторов. С заявлением тяги двигателей 1540 Н/кВт [1], 3900 Н/кВт [2]. Несмотря на то, что научная общественность с недоверием воспринимает идеи Р. Шойера, имеющихся сведений достаточно для анализа и расчетов. В статье примерно моделируется ракета-носитель, с учетом информации, собранной из открытых источников.

Моделирование. Исходные данные – удельная тяга двигателя Emdrive 1500 Н/кВт, мощность топливных элементов (ТЭ) 100 кВт, время полета 1,13 час, ускорение 0,4 g, мощность генератора СВЧ 75 кВт, высота орбиты 250 км. Главная идея расчета состоит в оптимистической калькуляции максимальной тяги носителя как мощность СВЧ 75 кВт \* удельную тягу 1500 Н/кВт = 112,5 кН. Если принять, что носитель движется с ускорением 0,4 g, то теоретическая грузоподъемность составит  $112,5 \text{ кН} / ((1 + 0,4) \cdot 9,82) = 8183 \text{ кг}$ .

Анализ показал, что максимальная масса-нетто носителя не превышает 4000 кг. Полезная нагрузка составит  $8183 - 3808 = 4375 \text{ кг}$ . Носитель взлетной массой 8 тонн выводит на орбиту 250 км полезный груз весом порядка 4 тонны и возвращается обратно.

Использование 3G Emdrive с удельной тягой 3900 Н/кВт, возможно, повысит тягу до 292,5 кН и обеспечит вывод полезного груза массой до 16 тонн (табл. 1).

Компоновка узлов носителя выполнена по консервативной схеме, общий вид приведен на рис. 1.

Блок из 7 носителей, массой-нетто 29 тонн выведет полезную нагрузку до 27 тонн на орбиту 250 км. Общий вид приведен на рис. 2, технические характеристики в табл. 2.

Топливные элементы. С учетом данных обзора [3], как прототип, выбран ТЭ Honda Clarity [4], мощностью до 130 кВт, удельной мощностью 2 кВт/кг, размерами порядка  $700 \times 350 \times 350 \text{ мм}$ , массой 50 кг. По нашей оценке КПД Honda Clarity не превышает 57 %, для выработки 100кВт\*час, требуется примерный расход LH2 = 6 кг, LOX = 48 кг

Двигатели. Блок из 8-ми Emdrive собран в отдельный отсек,  $D = 1500 \text{ мм}$ ,  $H = 400 \text{ мм}$ , СП резонаторы изготовлены из ВТСП керамики YBCO с охлаждением LH2, размеры отдельного двигателя кратны длине СВЧ волны в диапазоне 20 – 10 см, Каждый двигатель подключен к отдельному генератору СВЧ мощностью 10 кВт через отдельный волновод.

Генерация СВЧ. Блок из 8-ми магнетронов ( $8 * 10 \text{ кВт}$ ), отсек  $D = 1500 \text{ мм}$ ,  $H = 400 \text{ мм}$ . Возможно применение генерации СВЧ за счет плазменной неустойчивости в холодной плазме низкого давления, как обсуждается в [5] (мощный, холодный, миниатюрный).

Радиатор охлаждения. В системе два источника тепла – ТЭ (80 °C) и блок генерации СВЧ с тепловыделением на уровне 25 кВт\*час. Примерно выбран радиатор на основе излучения черного тела при температуре 1000 К диаметр 1500 мм.

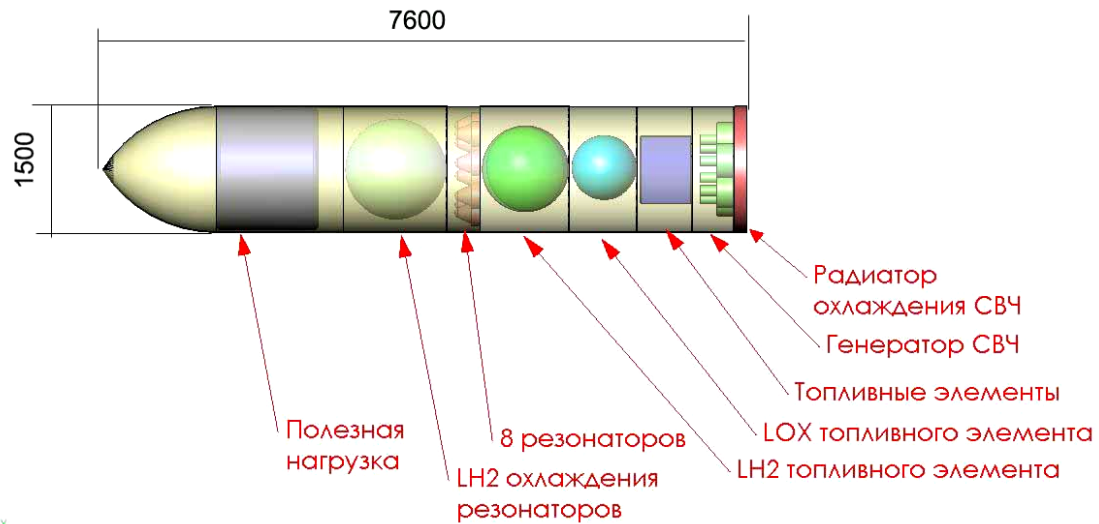


Рис. 1. Принципиальная схема носителя «Гравикон»

Таблица 1

Технические характеристики носителя «Гравикон»

Параметры носителя Гравикон			Основные ТТХ		
Высота орбиты	км	250	Наименование	Ø(мм)	Масса(кг)
Ускорение	м/с <sup>2</sup>	3.93	Бак LH2 охлаждения	1410	573
Время полета	час	1.13	Бак LH2 питания ТЭ	710	57
Мощность ТЭ	кВт	100	Бак LOX питания ТЭ	570	29
Мощность СВЧ	кВт	75	Блок ТЭ	1400	300
Тяга 1 резонатора	Н/кВт	1500	Блок резонаторов	1400	300
Полная тяга	кН	112.5	Блок генерации СВЧ	1400	525
Грузоподъемность	кг	8183	Радиатор	1400	70
Масса ТЭ	кг	200	Корпус	кг	1000
Расход LH2	кг	8.15	Электроника	кг	400
Расход LOX	кг	64.72	Прочее	кг	200
Расход LH2 охлаждения	кг	81.89	Итого полезная нагрузка, кг		4375

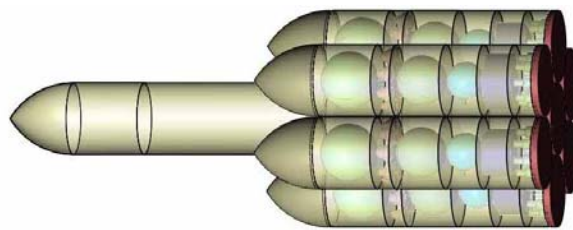


Рис. 2. Компоновка блока из 7 носителей

Таблица 2

Технические характеристики блока из 7 носителей

Наименование	Резонатор 1500 кН/кВт	Резонатор 3900 кН/кВт
Мощность ТЭ	$7 \times 100 \text{ кВт} = 700 \text{ кВт}$	$7 \times 100 \text{ кВт} = 700 \text{ кВт}$
Тяга суммарная	$7 \times 115,5 \text{ кН} = 787,5 \text{ кН}$	$7 \times 292,5 \text{ кН} = 2047,5 \text{ кН}$
Грузоподъемность	$7 \times 8000 \text{ кг} = 56000 \text{ кг}$	$2047,5 / ((1+4) 9,82) = 149000 \text{ кг}$
Масса носителя (нетто)	$7 \times 4000 \text{ кг} + 1000 \text{ кг} = 29000 \text{ кг}$	$7 \times 5000 + 1000 = 36000 \text{ кг}$
Полезная нагрузка = = Грузоподъемность – Масса	$56 - 29 = 27 \text{ тонн}$	$149 - 36 = 113 \text{ тонн}$

Произведена примерная оценка ТТХ возможного многооразового носителя для вывода на низкие орбиты полезных грузов на основе двигателя Emdrive. Полученный результат отличается новизной, представлен новый класс космических аппаратов, автор обращается к научной общественности для более внимательного изучения заявленных возможностей.

#### Библиографические ссылки

1. Shawyer R. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.emdrive.com/3GEmDrive.pdf> (дата обращения: 06.09.2018).
2. Shawyer R. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.emdrive.com/dresden2018.pdf> (дата обращения: 06.09.2018).
3. Space Shuttle. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/shuttle/main/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/shuttle/main/index.html) (дата обращения: 06.09.2018).
4. Honda Clarity Fuel Cell [Электронный ресурс]. URL: <https://world.honda.com/automobile-technology/engineer-talk/CLARITY/> (дата обращения: 06.09.2018).

5. Мощный сверхминиатюрный беспучковый генератор в газоразрядной СВЧ-электронике / В. Д. Се-  
лемир, А. Е. Дубинов, В. С. Жданов и др. // Доклады  
АН. М., 2012. Т. 442, № 4. С. 465–467.

#### References

1. Shawyer R. Available at: <http://www.emdrive.com/3GEmDrive.pdf> (accessed: 06.09.2018).
2. Shawyer R. Available at: <http://www.emdrive.com/dresden2018.pdf> (accessed: 06.09.2018).
3. Space Shuttle. Available at: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/shuttle/main/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/shuttle/main/index.html) (accessed: 06.09.2018).
4. Honda Clarity Fuel Cell. Available at: <https://world.honda.com/automobile-technology/engineer-talk/CLARITY/> (accessed: 06.09.2018).
5. Selemir V. D., Dubinov A. E., Zhdanov V. S., Sadovoi S. A., L'vov I. L., Vyalykh D. V. [Intense super miniature beamless generators in gas discharge microwave electronics]. Doklady AN, Moscow, 2012, tom 442, № 4, P. 465–467 (in Russ).

© Овчар А. В., 2018

УДК 629.7

## ПРОРЫВНОЕ ДВИЖЕНИЕ БЕЗ ПРОПЕЛЛЕНТА

А. В. Овчар

ООО «ДиКонт»

Российская Федерация, 196655, Колпино, г. Санкт-Петербург, ул. Культуры, 14

E-mail: info@dikont.ru

*Обсуждаются перспективные технические идеи построения двигателей для движения в космическом пространстве без пропеллента.*

*Ключевые слова: движение без пропеллента, генератор гравитационных волн, гравитационный двигатель.*

## BREAKTHROUGH PROPULSION WITHOUT PROPELLANT

A. V. Ovchar

LLC "DiKont"

14, Kultura Str., Kolpino, Saint Petersburg, 196655, Russian Federation

E-mail: info@dikont.ru

*The paper discusses the promising technical ideas for building engines for a propellantless propulsion in the space.*

*Keywords: propellantless propulsion, generator of gravitational waves, gravitational engine.*

Считается, что пропеллентное движение является лучшим вариантом для межзвездного путешествия. Изучив большой объем различных идей и гипотез, опубликованных в [1–6] и др., мы обращаем внимание для обсуждения и проверки несколько различных физических принципов, и предлагаем оригинальный концепт гравитационного двигателя.

В работах [1–3] обсуждается возможность создания движения без выброса пропеллента за счет прямого взаимодействия с физическим вакуумом – за счет эффекта Казимира [1], излучения волн Унро [2] и (косвенно) за счет эффекта Маха/Вудворда [3]. В работе [4] обсуждается лабораторная генерация гравитационных волн (ГВ) высокой частоты. Мы обсуждаем новый, оригинальный подход к генерации ГВ и предлагаем концепт гравитационного двигателя, что возможно еще не был описан в литературе. Как известно, мощность  $P_g$  излучения гравитационных волн, например, вращающейся гантели определяется формулой [5]

$$P_g = \frac{32G\omega^6 m^2 r^4}{5c^5},$$

где  $G$  – гравитационная постоянная;  $c$  – скорость света,  $m$  – масса гантели;  $r$  – радиус;  $\omega$  – угловая частота вращения.

Для  $m = 1$  кг,  $r = 1$  м,  $\omega = 1$  об/с, мощность  $P_g$  порядка  $10^{-52}$  Вт.

Но для, например,  $m = 1$  грамм,  $r = 10$  м,  $\omega = 100$  ГГц получается  $P_g$  порядка 1760 ГВт. Если бы вся эта мощность ГВ излучалась бы в узкий телесный угол, тягу гравитационного двигателя можно бы оценить как  $T = P_g / c = 1,76 \cdot 10^{12} / 3 \cdot 10^8 = 5860$  Н – как верхняя оценка. При этом амплитуда колебаний ГВ на уровне  $10^{-20}$ , что уже доступно лабораторным измерениям.

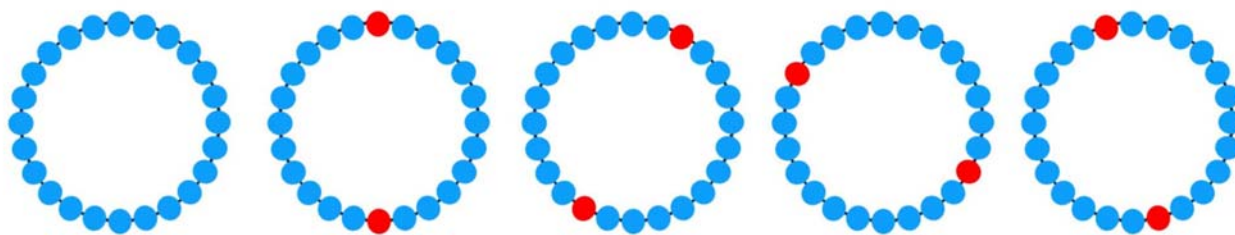
Мы предлагаем идею генерации ГВ за счет эмульсии вращения малой массы, когда масса движется по кругу, но самого вращения (твёрдого тела) при этом нет.

Пример такого движения – перемещение зеркал в стопе без физического их движения – отмечается в [1]. В работе [5] так же можно видеть описание похожих идей движения (фазовых скоростей).

Представим себе диск, диаметром 1–10 метров, на поверхности которого установлены блоки конденсаторов. Так же имеется источник DC и быстродействующие коммуникаторы. Будем по очереди заряжать/разряжать конденсаторы от источника DC, «по кругу», так что бы создать пример вращения. Масса заряженного конденсатора отличается от массы незаряженного на величину дельта-массы  $\Delta m$ . Принципиальная схема показана на рисунке.

Ожидается создания вращения дельта-массы в эквиваленте  $m = 1$  грамм,  $r = 10$  м,  $\omega = 10^9$ – $10^{11}$  об/с с излучением ГВ мощностью до 1760 ГВт, с амплитудой до  $10^{-20}$ .

В работах [6–7] измерялось колебание массы конденсаторов малой емкости на уровне сантиграмм. Что отмечено в [8] как флуктуации энергии-массы. При этом в [8] отмечено, что эффект изменения массы, возможен только при наличии демпферов. Наше предложение с вращением дельта-массы происходит собственно из результатов экспериментов [6–7]. Мы предлагаем, используя быстрые коммуникации, создавать на поверхности диска очень быстрые (от  $10^9$  с<sup>-1</sup>) вращение флуктуаций энергии-массы. Что по нашему мнению, (что, требует более строгого изучения), позволит создавать излучатели гравитационных волн большей мощности.



Вращение дельта-массы на диске (заряженный конденсатор – красный цвет)

Развитие этой идеи, используя более сложные коммутации, позволит создать (на примере диска см. на рисунке) ассиметричные движения флуктуаций энергии, комбинируя вращение и радиальное движение в плоскости диска, максимально приближенно к колебаниям метрики (сжатия/растягивания) пространства при распространении гравитационных волн. Для этого надо заполнить поверхность диска (радиуса 10м) большим кол-вом конденсаторов, и организовать их коммуникацию к ДС под управлением ПК. Это, в том числе, возможно, позволит фокусировать излучения ГВ в заданный телесный угол, и создавать уже не нулевую тягу гравитационного двигателя.

В самом общем случае мы должны говорить о монтаже специальных устройств (назовем их флуктуаторами), где протекают гибко управляемые флуктуации энергии-массы, с использованием различных физических явлений (индукция, магнетизм, любые другие виды энергии) [9]. При этом мы готовы обсуждать термин «флуктуация» максимально широко.

Например, с замечанием, что термин дельта-масса – это может быть недостаточно для описания уже конечного результата – излучения ГВ в результате контролируемого управления состояниями флуктуаторов.

Хороший пример – циклон в атмосфере планеты. Это тоже флуктуация энергии-массы, и множество циклонов в атмосфере – может излучать ГВ. Но при калькуляции мощности этого ГВ излучения, возможно следует учитывать внутренние, атмосферные процессы в циклоне, в том числе, например, распределение плотности атмосферного электричества в пределах циклона (флуктуатора по нашей аналогии). Или давления, температуры, химический состав. Также обращаем внимание, что предложенный принцип, возможно, позволит создавать колебания метрики пространства с произвольно заданными характеристиками, что может привести к самым неожиданным результатам (например, к излучению импульса без использования электромагнитных или гравитационных волн).

В работе проведен анализ теоретических подходов к созданию прорывного движения без выброса пропеллента, предложен новый способ построения генераторов гравитационных волн и гравитационного двигателя для движения в космическом пространстве.

#### Библиографические ссылки

1. David Dr., Hyland C. An Epitaxial Device for Dynamic Interaction with the Vacuum State // *The 2017 Advanced Propulsion Workshop* [Электронный ресурс].

URL: [http://ssi.org/wp-content/uploads/2018/01/ssiapw2017\\_01\\_hyland.pdf](http://ssi.org/wp-content/uploads/2018/01/ssiapw2017_01_hyland.pdf) (дата обращения: 06.09.2018).

2. Taylor T. S. Propulsive forces using high-Q asymmetric high energy laser resonators [Электронный ресурс]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/323278529\\_Propulsive\\_forces\\_using\\_high-Q\\_asymmetric\\_high\\_energy\\_laser\\_resonators](https://www.researchgate.net/publication/323278529_Propulsive_forces_using_high-Q_asymmetric_high_energy_laser_resonators) (дата обращения: 06.09.2018).

3. Montillet J. P. Explaining the EM Drive with the Electromag, and Gravitational Coupling Theory» // *The 2017 Advanced Propulsion Works, SSI*. [Электронный ресурс]. URL: [http://ssi.org/wp-content/uploads/2018/02/ssiapw2017\\_06\\_montillet.pdf](http://ssi.org/wp-content/uploads/2018/02/ssiapw2017_06_montillet.pdf) (дата обращения: 06.09.2018).

4. Kolosnitsyn N. I., Rudenko V. N. Gravitational Hertz experiment with electromagnetic radiation in a strong magnetic field. *Phys. Scr.* 90 (2015) Doi: 10.1088/0031-8949/90/7/074059.

5. Weimberg S. *Gravitation and cosmology: Principles and applications of the general theory of relativity*, John Wiley and Sons. New York, 1972.

6. J. F. Woodward. A new experimental approach to Mach's principle and relativistic gravitation. *Found Phys Lett* (1990) 3: 497. Doi: 10.1007/BF00665932.

7. Tajmar M. Experimental Study of the Machian Mass Fluctuation Effect Using a  $\mu\text{N}$  Thrust Balance // *Proceedings of the Space Technology and Applications International Forum (STAIF-2006)*, AIP Conference Proceedings 813, Issue 1, American Institute of Physics, New York, 2006. P. 1313–1320.

8. José Rodal. Propellantless space propulsion from a gravitational effect sourced by energy fluctuations // *2017 Advanced Propulsion Workshop*, Space Studies Institute. [Электронный ресурс]. URL: [http://ssi.org/wp-content/uploads/2018/02/ssiapw2017\\_07\\_rodal.pdf](http://ssi.org/wp-content/uploads/2018/02/ssiapw2017_07_rodal.pdf) (дата обращения: 06.09.2018).

9. Tajmar M. Revolutionary Propulsion Research at TU Dresden // *Proceedings of the Estes Park Advanced Propulsion Workshop* / H. Fearn and L. L. Williams, eds. ; Mojave, CA: Space Studies Institute Press, 2017. P. 67–82.

#### References

1. David Dr., Hyland C. An Epitaxial Device for Dynamic Interaction with the Vacuum State // *The 2017 Advanced Propulsion Workshop*. Available at: [http://ssi.org/wp-content/uploads/2018/01/ssiapw2017\\_01\\_hyland.pdf](http://ssi.org/wp-content/uploads/2018/01/ssiapw2017_01_hyland.pdf) (accessed: 06.09.2018).

2. Taylor T. S. Propulsive forces using high-Q asymmetric high energy laser resonators. Available at:

[https://www.researchgate.net/publication/323278529\\_Propulsive\\_forces\\_using\\_high-Q\\_asymmetric\\_high\\_energy\\_laser\\_resonators](https://www.researchgate.net/publication/323278529_Propulsive_forces_using_high-Q_asymmetric_high_energy_laser_resonators) (accessed: 06.09.2018).

3. Montillet J. P. Explaining the EM Drive with the Electromag, and Gravitational Coupling Theory» *The 2017 Advanced Propulsion Workshop* Available at: [http://ssi.org/wp-content/uploads/2018/02/ssiapw2017\\_06\\_montillet.pdf](http://ssi.org/wp-content/uploads/2018/02/ssiapw2017_06_montillet.pdf) (accessed: 06.09.2018).

4. Kolosnitsyn N. I., Rudenko V. N. Gravitational Hertz experiment with electromagnetic radiation in a strong magnetic field. *Phys. Scr.* 90. 2015. Doi: 10.1088/0031-8949/90/7/074059.

5. Weimberg S. *Gravitation and cosmology: Principles and applications of the general theory of relativity*, John Wiley and Sons, New York, 1972.

6. Woodward J. F. A new experimental approach to Mach's principle and relativistic gravitation. *Found Phys Lett.* 1990. 3: 497. Doi: 10.1007/BF00665932.

7. Tajmar M. Experimental Study of the Machian Mass Fluctuation Effect Using a  $\mu\text{N}$  Thrust Balance. *Proceedings of the Space Technology and Applications International Forum (STAIF-2006)*, AIP Conference Proceedings 813, Issue 1, American Institute of Physics, New York, 2006. P. 1313–1320.

8. José Rodal. Propellantless space propulsion from a gravitational effect sourced by energy fluctuations *2017 Advanced Propulsion Workshop*, Space Studies Institute. Available at: [http://ssi.org/wp-content/uploads/2018/02/ssiapw2017\\_07\\_rodal.pdf](http://ssi.org/wp-content/uploads/2018/02/ssiapw2017_07_rodal.pdf) (accessed: 06.09.2018).

9. Tajmar M. Revolutionary Propulsion Research at TU Dresden // *Proceedings of the Estes Park Advanced Propulsion Workshop* / H. Fearn and L. L. Williams, eds. ; Mojave, CA: Space Studies Institute Press, 2017. P. 67–82.

© Овчар А. В., 2018

УДК 678.073

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛИЭФИРКЕТОНА В КАЧЕСТВЕ ПОЛИЭФИРНОЙ СМОЛЫ ДЛЯ ПРОПИТКИ СТЕКЛОВОЛОКНА

О. В. Окшина

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail: 020381@mail.ru

*Представлены перспективы применения полиэфиркетонов в качестве связующего для пропитки стекловолокна.*

*Ключевые слова: полимерное связующее, полиэфиркетон.*

## PROSPECTS FOR THE USE OF POLYETHERKETONE AS POLYESTER RESIN TO IMPREGNATE THE FIBERGLASS

O. V. Okshina

JSC „Krasnoyarsk Machine Building Plant“  
29, Krasnoyarsky Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russia Federation  
E-mail: 020381@mail.ru

*The paper presents the prospects of using polyetherketones as a binder for glass fiber impregnation.*

*Keywords: polymer binder, polyesterketone.*

Многообразие композиционных материалов определяется тем, что они представляют собой сложные гетерофазные системы, особенностью которых является возможность широкого регулирования деформационно-прочностных характеристик, определяемое подбором компонентов композита [1].

Перспективным направлением создания композиционных материалов различного назначения является использование ароматических полиэфиркетонов (ПЭК), которые являются полукристаллическими полимерами и имеют уникальный эксплуатационный комплекс свойств, такие как стойкость к химическим, атмосферным, температурным и механическим воздействиям; низкий уровень гидроскопичности; стойкость к воздействию влаги, ультрафиолетовому излучению, электрическим разрядам [2].

Эксплуатационные характеристики полиэфиркетонов и материалов на их основе определяются химическим составом связующего. В состав полимера входят карбонильные группы (как кетоны) и фениленовые кольца связаны между собой атомами кислорода (как простые эфиры) [3]. Изменение соотношения кето- и простых эфирных в ПЭК позволяет целенаправленно изменять их технологические и эксплуатационные свойства на их основе. Путем ведения в основную цепь или привитием в боковую различных атомов или групп можно существенно улучшать определенные свойства полиэфиркетонов и материалов на их основе [2].

Для получения полиэфирной смолы [4] с дальнейшим использованием в качестве связующего с определенной вязкостью для полной пропитки стеклово-

локна, необходимым условием является растворимость полиэфиркетона в органических растворителях. При введении в макроцепь ПЭК кардовых циклических звеньев значительно улучшает растворимость ПЭК в органических растворителях [2; 5].

При всех положительных свойствах полиэфиркетона, имеются недостатки: высокая стоимость и сложность переработки, необходимы высокие температуры, например, полиэфирэфиркетоны перерабатываются при температуре +335 °С [3].

### Библиографические ссылки

1. Дефекты слоистых материалов / В. В. Яценко, О. М. Касперович, П. С. Епишко и др. // Труды БГТУ. Серия : Химия, технология органических веществ и биотехнология. 2015. № 4. С. 130–133.
2. Ароматические полиэфиркетоны и полиэфирэфиркетоны как перспективные термостойкие конструкционные материалы / А. М. Хараев, Р. Ч. Бажева, Ф. К. Казанчева и др. // Новые полимерные композиционные материалы : материалы 2 Всерос. научно-практич. конф. Нальчик, 2005. С. 68–72.
3. Саламов А. Х., Микитаев А. К., Беев А. А. Полиэфиркетоны: свойства и применение // Современные тенденции развития науки и технологий. 2015. № 8-3. С. 21–25.
4. Бессонов И. В., Коницына М. Н. Новые препреги на основе ненасыщенных полиэфирных смол, модифицированных полисилоксановыми олигомерами // Пластические массы. 2015. № 3-4. С. 38–43.

5. Синтез и свойства ароматических полиэфиров с кардовыми фрагментами / К. Т. Шахмузорова, Ж. И. Курданова, А. А. Жанситов и др. // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2017. № 6. С. 28–39.

#### References

1. Defekty sloistyx materialov [Defects in laminates] / V. V. Yacenko, O. M. Kasperovich, P. S. Epishko et al. // Trudy BGTU. Seriya : Khimiya, texnologiya organicheskix veshhestv i biotexnologiya. 2015. № 4. P. 130–133 (In Russ.)

2. Aromatichekije poliefirketony i poliefirfirketony kak perspektivnye termostojkie konstrukcionny'e materialy [Aromatic polyether ketones and polyether ketones as promising heat-resistant structural materials] / A. M. Xaraev, R. Ch. Bazheva, F. K. Kazancheva i dr. // Mater. 2 Vseros. nauchno-praktich. konf. "Novye polimernye kompozicionnye materialy", Nalchik, 2005. P. 68–72 (In Russ.)

3. Salamov A. X., Mikitaev A. K., Beev A. A. Poliefirketony : svojtva i primenenie [Polyester ketones: properties and applications] // Sovremennye tendencii razvitiya nauki i texnologij. 2015. № 8-3. P. 21–25 (In Russ.)

4. Bessonov I. V., Konicyna M. N. Novye prepregi na osnove nenasyshhennyx poliefirnyx smol, modifitsirovannyx polisiloksanovymi oligomerami [New prepregs based on unsaturated polyester resins modified with polysiloxane oligomers] // Plasticheskie massy. 2015. № 3-4. P. 38–43 (In Russ.)

5. Sintez i svojtva aromatichekix poliefirov s kardovy`mi fragmentami [Synthesis and properties of aromatic polyesters with carded fragments] / K. T. Shaxmuzorova, Zh. I. Kurdanova, A. A. Zhansitov i dr. // Izvestiya vysshix uchebnyx zavedenij. Seriya: Khimiya i ximicheskaya texnologiya. 2017. № 6. P. 28–39 (In Russ.)

© Окшина О. В., 2018



УДК 629.78

## НОВАЯ КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ

Ю. П. Похабов

ОАО «НПОПМ – Малое конструкторское бюро»  
Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 55а  
E-mail: pokhabov\_yury@mail.ru

*Предлагается новая комплексная методика анализа и оценки надёжности в свете задач, стоящих перед ракетно-космической отраслью в области качества, надёжности и безопасности.*

*Ключевые слова: надёжность, конструкторско-технологический анализ надёжности, индивидуальная надёжность, космические аппараты.*

## NEW INTEGRATED METHOD OF ANALYSIS AND ASSESSMENT OF RELIABILITY

Yu. P. Pokhabov

JSC “NPO PM Small Design Bureau”  
55a, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: pokhabov\_yury@mail.ru

*A new complex method of analysis and reliability assessment in the light of the challenges facing the rocket and space industry in the field of quality, reliability and safety is proposed.*

*Keywords: reliability, design and technology reliability analysis, individual reliability, spacecrafts.*

Длительное время надёжность развивалась как прикладная математическая дисциплина, оторванная от решения реальных задач по созданию уникальных высоконадёжных изделий. Современные методы классической теории надёжности практически бесполезны для: 1) обеспечения надёжности одноразовых высокоответственных изделий единичного изготовления, 2) предупреждения ранних отказов, 3) получения исчерпывающей информации при принятии и обосновании конструкторских и технологических решений, 4) исключения человеческого фактора при производстве и эксплуатации изделий и т. д.

Создание и интегрирование двух методик, разработанных в последние годы, – конструкторско-технологического анализа надёжности (КТАН) [1–3] и оценки индивидуальной конструкционной надёжности [4] предоставляет возможность выявлять и предотвращать отказы уникальных высоконадёжных изделий на ранних стадиях производства, а также производить комплексную оценку надёжности с учётом индивидуальных особенностей как самих изделий, так и условий их производства.

КТАН разработан для анализа и оценки надёжности высокоответственных механических устройств раскрытия КА: антенн, панелей солнечных батарей, штанг приборов и пр. Методика анализа основана на представлении о том, что все отказы происходят из-за ошибок при принятии конструкторских, технологических и производственных решений, включая ошибки при оценке условий нагружения и воздействий при эксплуатации. В соответствии с таким представлением отказы не могут произойти, если все решения обоснованы, необходимые и достаточные требования в конструкторской документации установлены, вы-

полнены при изготовлении и эксплуатации, а их выполнение подтверждено средствами технического контроля.

Методика КТАН является универсальной как с позиций использования различных подходов к оценке надёжности (детерминированных или стохастических), так и для обеспечения любых заданных значений безотказности (вплоть до единицы).

Алгоритм проведения анализа предусматривает двухуровневую оценку надёжности [3]:

1) производят обоснование значений критичных параметров изделия, обеспечивающих выполнение заданных функций при эксплуатации, на основании чего осуществляют оценку теоретического уровня надёжности, которая может несколько отличаться от действительного (окончательного) значения надёжности (если в конструкторской и/или технологической документации будут отсутствовать какие-либо требования к изготовлению, они будут заданы некорректно для однозначного выполнения условий работоспособности или не выполнены при изготовлении);

2) для изделий с заданной безотказностью на уровне  $P > 0,999$  осуществляют анализ конструкторской и технологической документации на соответствие полноты параметров, описывающих выполнение заданных функций, и требований, установленных для их реализации, на основании чего производят окончательную оценку надёжности.

Обоснование значений критичных параметров изделий в заданном допуске может осуществляться в детерминированной или стохастической постановке. В детерминированной постановке обоснование значений параметров работоспособности критичных элементов производят за счёт обеспечения конструктив-

ных запасов (резервирования, выбора нормированных коэффициентов безопасности, запасов прочности и движущих моментов, параметрической избыточности, силовых и температурных развязок, процедур получения гарантированных результатов, например, с применением минимаксных критериев или с использованием факторов инженерной психологии). Суть детерминированного подхода заключается в принятии необходимых конструкторских решений для исключения отказов. Реализация методики КТАН в детерминированной постановке самодостаточна для решения задач надёжности функционирования одно-разовых систем (без существенной наработки до отказа), если не требуется производить оценку частоты отказов. Методика КТАН в детерминированной постановке опробована при решении задач надёжности раскрывающихся конструкций КА [3].

В стохастической постановке обоснование выбора значений параметров работоспособности критичных элементов производят методами индивидуальной конструкционной надёжности. Суть стохастического подхода – получение частотной оценки возможных отказов, что необходимо при длительной наработке до отказа, например, для обеспечения надёжности бортовых систем КА длительного функционирования на конец срока службы. Идея методики индивидуальной конструкционной надёжности основана на том, что при создании надёжных изделий изменчивость свойств материалов и критичных элементов конструкций должна быть минимальной. Причём такая изменчивость никак не связана с возможными разбросами реального или виртуального множества однотипных изделий вообще (как это принято в классической теории надёжности), а определяется индивидуальными особенностями конкретного производства – точностью измерений свойств и параметров в процессе создания данного уникального образца изделия. Методика индивидуальной конструкционной надёжности была разработана и опробована для проектирования стальных и железобетонных многопролётных и многоэтажных рам на сочетания случайных нагрузок марковского типа, а также применялась для оценки надёжности магистральных трубопроводов различного назначения, которые пребывают в одном предельном состоянии – по прочности [4]. Применение методики индивидуальной конструкционной надёжности к изделиям космической техники (способных находиться одновременно в нескольких предельных состояниях) становится возможным благодаря КТАН, который позволяет осуществлять полную параметризацию свойств конструкций в зависимости от заданной функциональности и наихудших сочетаний внешних условий и режимов эксплуатации [5]. Для каждого предельного состояния параметров производят сбор статистических данных, характеризующих данное конкретное производство, которые определяют фактическое состояние изделия в результате изготовления, строят допустимые области в пространстве нагрузок и воздействий, находят вероятности пребывания вектора нагрузок, воздействий и функциональных параметров изделия в допустимой области по всем элементам, системы в целом и всем возможным видам

её отказа, делают заключение о выполнении требований надёжности.

Применение комплексной методики анализа и оценки надёжности (в совокупности КТАН и индивидуальной конструкционной надёжности) даёт возможность поднять на новый уровень технологию проектирования, конструирования, изготовления и отладки уникальных изделий ракетно-космической техники, используя в параллель конструкторско-технологические приёмы обеспечения безотказности (применение принципов и правил рационального проектирования, методик конструкторско-технологического анализа и обеспечения надёжности и т. п.) и методику высокоточного расчёта индивидуальной надёжности (на основе статистики, собранной в определённых технологических условиях). Это позволяет производить разработку изделий и оценку их надёжности на едином исходном материале – конструкторско-технологических решениях, неразрывно связанных с возможностями конкретного производства.

### Библиографические ссылки

1. Похабов Ю. П., Ушаков И. А. О безаварийности функционирования уникальных высокоответственных систем // Методы менеджмента качества. 2014. № 11. С. 50–56.
2. Pokhabov Yu. P. About the philosophical aspect of reliability exemplified by unique mission-critical systems // Dependability. 2015. № 3. P. 22–27.
3. Похабов Ю. П. Теория и практика обеспечения надёжности механических устройств одноразового срабатывания. Красноярск, 2018. 340 с.
4. Тимашев С. А. Инфраструктуры. Т. 1: Надёжность и долговечность. Екатеринбург, 2016. 530 с.
5. Тимашев С. А., Похабов Ю. П. Проблемы комплексного анализа и оценки индивидуальной конструкционной надёжности космических аппаратов (на примере поворотных конструкций). Екатеринбург, 2018. 38 с.

### References

1. Pokhabov Yu. P., Ushakov I.A. [About reliability of unique mission-critical system]. *Methody menedzhmenta kachestva*. 2014. No. 11. P. 50–56 (In Russ.).
2. Pokhabov Yu. P. About the philosophical aspect of reliability exemplified by unique mission-critical systems. *Dependability*. 2015. No. 3. P. 22–27.
3. Pokhabov Yu. P. *Teoriya i praktika obespecheniya nadezhnosti mekhanicheskikh ustroystv odnorazovogo sra-batyvaniya* [Theory and practice of ensuring the reliability of mechanical devices of one-time operation]. Krasnoyarsk, 2018. 340 p.
4. Timashev S. A. *Infrastruktury. T. 1: Nadezhnost i dolgovechnost* [Infrastructure. Vol. 1: Reliability and durability]. Yekaterinburg, 2016. 530 p.
5. Timashev S. A., Pokhabov Yu.P. *Problemy kompleksnogo analiza i otsenki individualnoy nadezhnosti kosmicheskikh apparatov (na primere povorotnykh konstruktсий)* [Integrated Analysis and Assessment Problems of Individual Structural Reliability of Spacecraft (Case of Deployable Structures)]. Yekaterinburg, 2018. 38 p.

УДК 678.074

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭТИЛЕН-ПРОПИЛЕНОВЫХ КАУЧУКОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ УФ-СТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

А. С. Пушница\*, В. Д. Ворончихин

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

\*E-mail: apushnitsa@inbox.ru

*Представлены преимущества этилен-пропиленовых каучуков при создании УФ-стойких покрытий относительно ненасыщенных эластомеров.*

*Ключевые слова: этилен-пропиленовые каучуки, УФ-стойкие покрытия.*

## PERSPECTIVE APPLICATIONS ETHYLENE-PROPYLENE RUBBERS TO GENERATE UV-RESISTANT COATINGS

A. S. Pushnitsa\*, V. D. Voronchikhin

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

\*E-mail: apushnitsa@inbox.ru

*The paper presents the advantages of ethylene-propylene rubbers in the creation of UV-resistant coatings with respect to unsaturated elastomers.*

*Keywords: ethylene-propylene rubbers, UV-resistant coatings.*

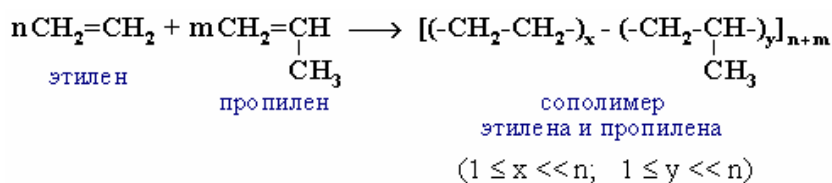
Полимерные покрытия в реальных условиях эксплуатации подвергаются различным воздействиям агрессивных сред, среди которых особое место занимает воздействие УФ-излучения. Основным видимым эффектом от воздействия УФ-излучения на полимерные материалы проявляется в деградации поверхности и утрата эксплуатационных характеристик, что особенно актуально при эксплуатации в космическом пространстве [1].

Излучение Солнца, достигающее верхних слоев атмосферы Земли, имеет непрерывный энергетический спектр в диапазоне длин волн от 0,7 и до, примерно, 3000 нм. При прохождении через атмосферу часть длинноволнового излучения поглощается парами воды и диоксидом углерода. Только коротковолновая часть инфракрасного излучения достигает поверхности Земли. Коротковолновое УФ-излучение с длиной волны ниже 175 нм поглощается кислородом в атмосферных слоях на высоте свыше 100 км над поверхностью. Излучение с длиной волны от 175 до 290 нм поглощается озоновым слоем стратосферы, который начинается на высоте примерно 15 км над уровнем моря для средних широт и имеет максималь-

ную плотность на высотах от 25 до 30 км. Именно оставшаяся УФ-часть солнечного света, т. е. излучение с длиной волны от 290 до 400 нм, вызывает деструкцию пластмасс при воздействии атмосферных факторов [2].

В значительной степени повысить изделиям эксплуатационный ресурс возможно за счет применения в качестве матрицы этилен-пропиленовых каучуков различной структуры. Отсутствие или незначительное содержание двойных связей в главной цепи обеспечивает озоностойкость, стойкость к окислению и теплоустойчивость эластомерных композиций на его основе; углеводородная природа этого каучука обеспечивает стойкость к действию полярных сред (воды, гликолей и др.), низкую температуру хрупкости и высокое электросопротивление [3; 4].

Этилен-пропиленовые каучуки представляют собой сополимеры этилена с пропиленом или терполимеры этих двух мономеров с несопряженным диеном. Основные цепи сополимера и терполимера не содержат двойных связей, что и обуславливает их повышенную стойкость к различным видам старения, в том числе УФ-излучению [5].



Общая схема строения этилен-пропиленового каучука

Базовым способом повышения стойкости покрытий на основе этилен-пропиленовых каучуков к УФ-излучению является введение в их массу противостабилизаторов, предотвращающих фотостарение. В качестве фотостабилизаторов применяют производные о-гидроксифенола, бензотриазола, триацетонамина [2]. В некоторых случаях фотостабилизация может осуществляться за счет фотохимической реакции в полимерной матрице. Так, например, эфиры салициловой или бензойной кислоты, введенные в полимер, под действием света превращаются в гидроксифенилкетоны. Преимущество триацетонамина (нитроксильного радикала) состоит в том, что он вступает с активными радикалами в реакцию присоединения, а фенолы и амины – в реакцию замещения приводящую к образованию гидропероксида – потенциального источника радикалов. В реакции присоединения гидропероксид не образуется. В условиях фотоокисления нитроксильные радикалы также обрывают цепь по реакции с алкильными радикалами. В то же время электронно-возбужденные нитроксильные радикалы способны инициировать окисление полимеров. При фотоокислении полимеров нитроксильные радикалы могут гасить возбужденные состояния и поглощать энергию светового излучения.

Также для повышения УФ-стойкости покрытий на основе этилен-пропиленовых каучуков является применение УФ-абсорберов (УФ-фильтров) органического типа (производные оксифенолов, оксифенолтриазолов, сложных эфиров бензойной, тарталевокси, салициловой кислот с резорцином и другими фенолами) [2; 6; 7] и неорганического характера (дисперсных металлических и керамических частиц, углеродных частиц, нанотрубок и волокон) [8; 9].

#### Библиографические ссылки

1. Старцев О. В., Никишин Е. Ф. Старение полимерных композитных материалов в условиях открытого космоса // Механика композитных материалов. 1993. № 4. С. 457–467.
2. Смирнова А. И., Жук Н. А. Функциональные материалы в производстве пластмасс: Стабилизаторы. СПб. : СПбГУПТД, 2016. 48 с.
3. Этилен-пропиленовые каучуки для резинотехнических изделий / Е. И. Щербина, Р. М. Долинская, Т. Д. Свидерская и др. // Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 4. Химия и технология органических веществ. 2009. Т. 1. № 4. С. 150–152.
4. Генкина Ю. М. Этилен-пропиленовые 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.
6. Bertin D., M. Leblanc, S. R. A. Marque, D. Siri. Polypropylene degradation: Theoretical and experimental investigations // Polymer Degradation and Stability. 2010. Vol. 95, iss. 5. P. 782–791.
7. Kaczmarek H., Oldak D., Malanowski P., Chaberska H. Effect of short wavelength UV-irradiation on age-

ing of polypropylene / cellulose compositions // Polymer Degradation and Stability. 2005. Vol. 88, iss. 2. P. 189–198.

8. Guadagno L., Naddeo C., Raimondo M., Gorrasi G., Vittoria V. Effect of carbon nanotubes on the photooxidative durability of syndiotactic polypropylene // Polymer Degradation and Stability. 2010. Vol. 95, iss. 9. P. 1614–1626.

9. Horrocks A. R., Mwila J., Mirafteb M., Liu M., Chohan S. S. The influence of carbon black on properties of orientated polypropylene 2 Thermal and photodegradation // Polymer Degradation and Stability. 1999. Vol. 65, iss. 1. P. 25–36.

#### References

1. Starcev O. V., Nikishin E. F. Starenie polimernyh kompozitnyh materialov v usloviyah otkrytogo kosmosa [Aging of polymer composite materials in open space] // Mekhanika kompozitnyh materialov. 1993. № 4. P. 457–467.
2. Smirnova A. I., Zhuk N. A. Funktsional'nye materialy v proizvodstve plastmass: Stabilizatory [Functional materials in the production of plastics: Stabilizers]. SPb. : SPbGUPTD, 2016. 48 p. (In Russ.)
3. Etilen-propilenovye kauchuki dlya rezinotekhnicheskikh izdelij [Ethylene-propylene rubbers for rubber products] / E. I. Shcherbina, R. M. Dolinskaya, T. D. Sviderskaya i dr. // Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya 4. Himiya i tekhnologiya organicheskikh veshchestv. 2009. Vol. 1, № 4. P. 150–152 (In Russ.)
4. Genkina Yu. M. Etilen-propilenovye kauchuki Keltan – novye tekhnologii, otvchayushchie sovremennym trebovaniyam [Ethylene-propylene rubbers Keltan-new technologies that meet modern requirements] // Kauchuk i rezina. 2010. № 2. P. 8–11 (In Russ.)
5. Dogadkin B. A., Doncov A. A., Shershnev V. A. Himiya elastomerov [Chemistry of elastomers]. M. : Himiya, 1981. 376 p.
6. Bertin D., M. Leblanc, S. R. A. Marque, D. Siri. Polypropylene degradation: Theoretical and experimental investigations // Polymer Degradation and Stability. 2010. Vol. 95, iss. 5. P. 782–791.
7. Kaczmarek H., Oldak D., Malanowski P., Chaberska H. Effect of short wavelength UV-irradiation on ageing of polypropylene / cellulose compositions // Polymer Degradation and Stability. 2005. Vol. 88, iss. 2. P. 189–198.
8. Guadagno L., Naddeo C., Raimondo M., Gorrasi G., Vittoria V. Effect of carbon nanotubes on the photooxidative durability of syndiotactic polypropylene // Polymer Degradation and Stability. 2010. Vol. 95, iss. 9. P. 1614–1626.
9. Horrocks A. R., Mwila J., Mirafteb M., Liu M., Chohan S. S. The influence of carbon black on properties of orientated polypropylene 2 Thermal and photodegradation // Polymer Degradation and Stability. 1999. Vol. 65, iss. 1. P. 25–36.

**ПРОБЛЕМЫ ФОРМОСТАБИЛЬНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ АНТЕНН\***

И. П. Рожков

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

*Рассмотрены различные аспекты при проектировании и изготовлении космических формостабильных антенн. В частности, описано отклонение рабочей поверхности от заданной теоретической, а также учёт схемы армирования и коэффициента линейного термического расширения.*

*Ключевые слова: трансформируемая антенна, формостабильность, схема армирования, коэффициент линейного термического расширения, композиционный материал, температурные деформации*

**PROBLEMS FORM-STABLE OF SPACE TRANSFORMABLE ANTENNAS**

I. P. Rozhkov

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

*Various aspects are considered in the design and manufacture of space, form-stable antennas. In particular, the deviation of the working surface from the specified theoretical, as well as the consideration of reinforcement schemes and the coefficient of linear thermal expansion.*

*Keywords: transformable antenna, form-stable, the scheme of reinforcement, the coefficient of linear thermal expansion, composite material, thermal deformations*

К космическим трансформируемым антеннам предъявляются требования к транспортабельности, простоте сборки и разборки, жесткости конструкции в рабочем положении, минимальному объему и массе, сохранению изначальной геометрии, низкой себестоимости и простоте изготовления.

Для всех типов трансформируемых антенн существует проблема в получении и сохранение теоретической поверхности рефлектора с заданной высокой степенью точности. Любые случайные и периодические ошибки в изготовлении профиля в совокупности приведут к уменьшению коэффициента усиления антенны [1].

Наибольший вклад в отклонение рабочей поверхности от теоретического профиля вносят термоупругие деформации, обусловленные влиянием температурного перепада, коэффициентов линейного термического расширения, выбором схем армирования, материалов сотового заполнителя, и полимерных композиционных материалов [2].

Важным при проектировании несущих конструкций космических трансформируемых антенн является выбор материала. В последние годы широко изучаются возможности композиционных материалов (КМ). Перспективными при этом представляются материалы на основе эпоксидных смол, армированными углеродными волокнами (углепластики).

Вследствие анизотропных свойств углеродных волокон коэффициент линейного термического расширения (КЛТР) слоистого КМ может быть близкой к нулю в широком диапазоне температур. Это принципиально важно для крупногабаритных космических конструкций в связи с их постоянно меняющимся и неравномерным солнечным нагревом.

Высокая удельная прочность углеродных волокон позволяет создать на их основе при помощи прогрессивных технологических методов формообразования достаточно жесткие конструктивные элементы. Однако из-за анизотропии физико-механических свойств появляются дополнительные сложности при проектировании, как самого материала, так и конструкции. В то же время благодаря анизотропии возможна оптимизация космических антенн по массовым, жесткостным и геометрическим параметрам. Изменяя тип волокна, матрице, их соотношение и схемы армирования, используя другие технологические возможности, можно создавать формостабильные конструктивные элементы космических трансформируемых антенн с заданными параметрами [3].

Особую важность имеет сдвиговая прочность, поскольку именно малая прочность при сдвиге между слоями является одним из основных недостатков армированных КМ. Предполагается, что адгезионная стойкость превосходит стойкость полимера, т. е. разрушение по границе раздела не происходит.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Министерства образования и науки Российской Федерации) по договору 02.G25.31.0147.

Так как без приложения нагрузки полимерная матрица должна выдерживать значительные механические деформации без разрушения адгезии на границе с углеродным волокном, эпоксидные смолы значительно лучше других выдерживают подобные условия. Микротрещины образуются только после термостарения, в то время как КМ на основе других связующих растрескиваются уже после изготовления [4].

Прямое копирование технологических приемов, применяемых для изготовления силовых конструкций, не в полной мере отвечает требованиям, предъявляемым к изготовлению высокоточных изделий. Основной причиной является недостаточно контролируемые параметры технологического процесса – режимы формования и термообработки при отверждении, равномерность температурного и силовых полей, температурные, усадочные и остаточные напряжения и деформации, углы разориентации при выкладке препрега [5]. Такая сильно выраженная зависимость свойств КМ от технологических параметров вызовет необходимость, во-первых, точность определения границы для допустимых отклонений технологических параметров каждой операции процесса изготовления и сужать их и, во-вторых, разрабатывать дополнительные технологические способы, оборудование и оснастку, позволяющую регулировать отрицательно действующие факторы с целью обеспечения заданных параметров изделия.

Технологические отклонения разориентации углов армирования и отклонение от квазиизотропной структуры армирования обшивок из КМ приводит к существенным температурным деформациям.

При проектировании космических трансформируемых антенн и отработке технологии изготовления следует учитывать направление углов армирования и количество слоев обшивок из КМ не только с учетом жесткости, но и с учетом температурных деформаций.

### Библиографические ссылки

1. Молодцов Г. А., Биткин В. Е. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композитных материалов. М. : Машиностроение, 2000.
2. Тестоедов Н. А., Двирный Г. В., Пермяков М. Ю. Определение величины температурной деформации размеростабильных рефлекторов // Сибирский журнал науки и технологий. 2011. № 2 (35).
3. Mao H., Shipsha A., Tibert G. Design and analysis of laminates for self-deployment of viscoelastic bistable tape springs after long-term stowage Journal of applied mechanics-*transactions of the ASME* V. 84 T. 7, 2017.
4. Гряник М. В., Ломан В. И. Развертываемые антенны зонтичного типа. М. : Радио и связь, 1987.
5. Engineering mechanics of composite materials / M. D. Isaac, I. Ori. Edition. 2 nd ed. New York : Oxford University Press, 2006.

### References

1. Molodtsov G. A., Bitkin V. E. Formostabil'nye i intellektual'nye konstruksii iz kompozitnykh materialov. [Dimensionally stable and smart design of composite materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000. (In Russ.)
2. Testoedov N. A., Dvimiy G. V., Permyakov M. Yu. [Temperature deformation value definition of size stable reflectors] *Sibirskij zhurnal nauki i tekhnologij*. 2011. № 2 (35). (In Russ.)
3. Mao H., Shipsha A., Tibert G. Design and analysis of laminates for self-deployment of viscoelastic bistable tape springs after long-term stowage *Journal of applied mechanics-*transactions of the ASME** V. 84 T. 7. 2017.
4. Gryanik M. V., Loman, V. I. Unfurlable reflective antennas of umbrella type. Moscow, Radio I svyaz. 1987. 72 p. (In Russ.)
5. Engineering mechanics of composite materials /. Isaac M. Daniel, Ori Ishai. Publisher New York : Oxford University Press, 2006. Edition. 2nd ed. LOCATION.

© Рожков И. П., 2018

УДК 681.3:536.24.08

## РЕЗОНАНСНОЕ ВИБРАЦИОННОЕ ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ КОРОТКИХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ ПРИ БОЛЬШИХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗКАХ

А. В. Серяков, А. В. Конькин, А. П. Алексеев

ООО «РУДЕТРАНССЕРВИС»

Российская Федерация, 173021, Великий Новгород, ул. Нехинская, 55

E-mail: seryakovav@yandex.ru

*Представлены результаты исследований повышения коэффициента теплопередачи коротких тепловых труб (ТТ) при больших тепловых нагрузках и воздействии внешних вибраций, и предназначенных для охлаждения теплонапряженных конструкций космических аппаратов.*

*Ключевые слова: резонансное вибрационное повышение коэффициента теплопередачи, сопло Лавалья, пульсации в паровом канале ТТ.*

## RESONANT VIBRATION INCREASE OF THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF SHORT LOW-TEMPERATURE HEAT PIPES AT HIGH HEAT LOADS

A. V. Seryakov, A. V. Konkin, A. P. Alekseev

LLC "RUDETRANSSERVICE"

55, Nekhinskaya Str., Veliky Novgorod, 173021, Russian Federation

E-mail: seryakovav@yandex.ru

*The results of increasing studies of the heat transfer coefficient of short heat pipes (HP's) at high thermal loads and the impact of external vibrations designed to cool the heat-stressed structures of spacecraft are presented.*

*Keywords: resonant vibration increase the heat transfer coefficient, the Laval nozzle, the pulsations in the HP's vapour channel.*

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. В коротких линейных ТТ с капиллярно-пористой вставкой увеличение коэффициента теплопередачи осуществляют с помощью придания паровому каналу формы сопла, близкого к соплу Лавалья и вытянутого вдоль всей длины ТТ, причем капиллярно-пористая вставка обеспечивает гидравлическую доставку рабочей жидкости в капиллярно-пористый испаритель [1-3].

Для повышения эффективности и увеличения коэффициента теплопередачи при больших тепловых нагрузках применяют дополнительное внешнее продольное вибрационное воздействие на корпус ТТ. При высоких тепловых нагрузках в капиллярно-пористом испарителе ТТ начинается процесс кипения и образуется большое количество пара, распространение которого по паровому каналу становится пульсирующим, образовавшийся ступок пара над испарителем повы-

шает давление до величины  $P^*$ , при которой температура испарителя  $T_{ev}$  оказывается меньше температуры кипения рабочей жидкости при этом давлении  $T_B(P^*)$ ,  $T_{ev} < T_B(P^*)$ , или температуры насыщения рабочей жидкости. Паровой ступок распространяется по паровому каналу в охлаждаемую часть ТТ и конденсируется, давление при этом снижается, и после прихода волны сниженного давления в испаритель кипение в нем возобновляется и начинается следующий цикл пульсаций. Частота пульсаций в канале в зависимости от тепловой нагрузки изменяется в диапазоне 400–500 Hz [3–5].

При внешнем воздействии продольных вибраций на корпус ТТ с частотой, близкой к частоте начавшихся внутренних пульсаций, коэффициент теплопередачи возрастает. Энергия, передаваемая кипящей рабочей жидкости в испарителе преобразуется в энергию движущейся сжимаемой паровой фазы и вызывает эффект принудительного расширения и тем самым интенсификацию процесса кипения и парообразования в сеточном капиллярно-пористом испарителе с инжекторными каналами. Для исследования эффекта резонансного вибрационного повышения коэффициента теплопередачи были изготовлены короткие ТТ с выполненным в виде сопла, близкого к соплу Лавалья паровым каналом, изображенные на рис. 1.

Были проведены измерения коэффициента теплопередачи ТТ при внешнем вибрационном воздействии.

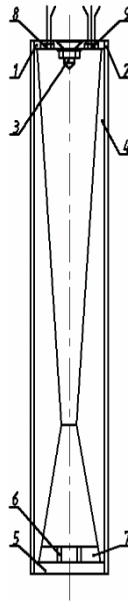


Рис. 1. Схема ТТ:

1 – верхняя крышка; 2 – цилиндрический корпус ТТ; 3 – конический турбулизатор; 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  $T_B = 308,65 \text{ K}$  ( $35,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ), критические параметры  $T_C = 466,55 \text{ K}$  ( $193,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ),  $P_C = 3,61 \text{ МПа}$ .

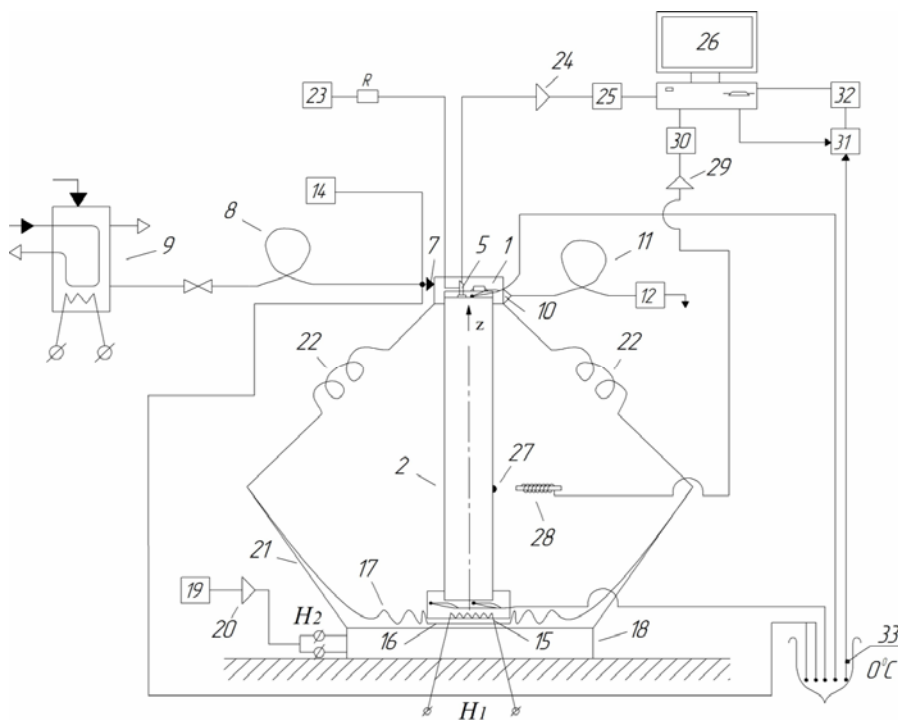


Рис. 2. Схема вибрационных измерений коэффициента теплопередачи коротких ТТ: 1 – микрокалориметр; 2 – ТТ; 3 – фланец; 4 – генератор; 5 – емкостный датчик; 6 – каналы для проводов; 7 – входной штуцер; 8 – напорный шланг; 9 – сосуд постоянного напора; 10 – выходной штуцер; 11 – сливной шланг; 12 – расходомер; 13 – крышка; 14 – генератор пузырьков; 15 – нагреватель; 16 – опорный диск; 17 – диффузор; 18 – звуковой динамик; 19 – генератор; 20 – усилитель; 21 – диффузордержатель; 22 – пружины; 23 – генератор; 24 – усилитель; 25 – осциллограф; 26 – компьютер; 27 – постоянный магнит; 28 – измерительная катушка; 29 – устройство контроля вибраций; 30 – частотомер; 31 – коммутатор; 32 – вольтметр; 33 – сосуд Дьюара



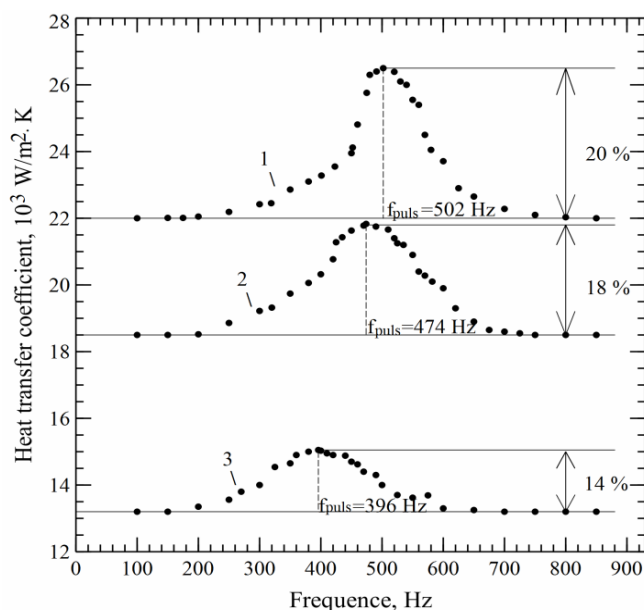


Рис. 3. При внешнем вибрационном воздействии с частотой, равной частоте пульсаций  $f_{\text{puls}}$ , коэффициент теплопередачи ТТ с паровым каналом в виде сопла Лавалья увеличивается на величину до 20 % при максимальном перегреве испарителя  $\delta T = T_{\text{ev}} - T_{\text{B}} = 20$  К. Резонансное повышение коэффициента теплопередачи обусловлено интенсификацией процесса кипения в испарителе при внешнем продольном вибрационном воздействии на корпус ТТ

Электродинамический вибрационный калориметрический стенд на основе мощного звукового динамика 100 ГДН – 3–8, рабочий диапазон частот которого лежит в пределах 31,5 Гц – 1000 Hz, и вихревого проточного микрокалориметра-насадки с проточной водой и резистивного нагревателя, показан на рис. 2. Погрешность измерения тепловой мощности ТТ с помощью микрокалориметра не превышает 2 %.

Результаты измерений представлены на рис. 3.

#### Библиографические ссылки

1. Серяков А. В. Исследование характеристик коротких низкотемпературных тепловых труб с паровым каналом в виде сопла // ПМТФ. 2016. Т. 57, № 1. С. 1–15.
2. Seryakov A. V. The Application of Capacitance Transducer for Measuring Local Thickness of Condensate Film in Low-Temperature Range Heat Pipes // International Journal on Heat and Mass Transfer Theory and Application. 2016. Vol. 4, № 1. P. 1–13.
3. Seryakov A. V. The study of condensation processes in the low-temperature short heat pipes with a nozzle-shaped vapour channel // Engineering. 2017. Vol. 9. P. 190–240.
4. Saffman P. G. The lift on a small sphere in a slow shear flow // Journal of Fluid Mechanics. 1965. Vol. 22. P. 385–400.

5. Saffman P. G. Corrigendum to the « The lift on a small sphere in a slow shear flow» // Journal of Fluid Mechanics. 1968. Vol. 31. P. 624.

#### References

1. Seryakov A. V. Study of the characteristics of short low-temperature heat pipe with the vapour channel in the form of a nozzle// Journal of Applied Mechanics and Technical Physics 2016. Vol. 57, No. 1. P. 1–15.
2. Seryakov A. V. The Application of Capacitance Transducer for Measuring Local Thickness of Condensate Film in Low-Temperature Range Heat Pipes // International Journal on Heat and Mass Transfer Theory and Application 2016. Vol. 4, № 1. P. 1–13.
3. Seryakov A. V. The study of condensation processes in the low-temperature short heat pipes with a nozzle-shaped vapour channel //Engineering 2017. Vol. 9. P. 190–240.
4. Saffman P. G. The lift on a small sphere in a slow shear flow // Journal of Fluid Mechanics. 1965. Vol. 22. P. 385–400.
5. Saffman P. G. Corrigendum to the « The lift on a small sphere in a slow shear flow» // Journal of Fluid Mechanics. 1968. Vol. 31. P. 624.

© Серяков А. В., Конькин А. В.,  
Алексеев А. П., 2018

УДК 681.3:536.24.08

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕОБРАЗОВАНИЯ В ПАРОВОМ КАНАЛЕ  
КОРОТКИХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ  
ПРИ БОЛЬШИХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗКАХ**

А. В. Сeryakov

ООО «РУДЕТРАНССЕРВИС»

Российская Федерация, 173021, Великий Новгород, ул. Нехинская, 55

E-mail: seryakovav@yandex.ru

*Представлены результаты исследований процессов вихреобразования в паровом канале коротких низкотемпературных тепловых труб (ТТ), предназначенных для охлаждения теплонапряженных конструкций космических аппаратов и спутников.*

*Ключевые слова: вихреобразование, направление вращения, численное моделирование, сопло Лаваля.*

**THE STUDY OF THE VORTEX FORMATION IN THE VAPOUR CHANNEL  
OF SHORT LOW TEMPERATURE HEAT PIPES AT HIGH HEAT LOADS**

A. V. Seryakov

LLC "RUDETRANSSERVICE"

55, Nekhinskaya Str., Veliky Novgorod, 173021, Russian Federation

E-mail: seryakovav@yandex.ru

*The results of studies of vortex formation processes in the vapour channel of short low-temperature heat pipes (HP's) designed for cooling heat-stressed structures of spacecraft and satellites are presented.*

*Keywords: the vortex formation, the rotation direction, numerical simulation, Laval nozzle.*

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. В коротких линейных ТТ с капиллярно-пористой вставкой увеличение коэффициента теплопередачи осуществляют с помощью придания паровому каналу формы сопла, близкого к соплу Лаваля и вытянутого вдоль всей длины ТТ. Капиллярно-пористая вставка, формирующая паровой канал обеспечивает гидравлическую доставку рабочей жидкости, в качестве которой применен диэтиловый эфир  $C_4H_{10}O$  в капиллярно-пористый испаритель ТТ [1–3]. Интенсивное развитие и применение подобных коротких низкотемпературных ТТ с профилированным паровым каналом и повышенными значениями коэффициента теплопередачи ставит задачи детального изучения процессов внутреннего течения и конденсации в паровом канале.

Текущая паровая среда влажного пара при конденсации является нелинейным объектом, течение которого сопровождается внутренними процессами межфазного теплообмена и диссипации энергии [1]. Восстановление статического давления в ТТ вблизи поверхности конденсации связано с торможением потока и возникновением сильного вихреобразования.

Для экспериментального и расчетного исследования этих процессов и измерения толщины образующейся пленки конденсата были изготовлены ТТ из нержавеющей стали, с плоским капиллярно-пористым испарителем, с паровым каналом, выполненным в виде сопла Лаваля и окруженного слоем капиллярно-пористой вставки вдоль всей длины ТТ [3–5], изображение которых приведено в следующем докладе.

Для компьютерного исследования вихреобразования было проведено конечно-элементное моделирование течений влажного пара вблизи поверхности конденсации с помощью программы CFD design10.0 Fluent 6.3.26 в двухмерной постановке. Решались уравнения Навье–Стокса с измеренными граничными условиями температуры испарителя  $T_{ev}$  и поверхности конденсации  $T_{cond}$ . При построении расчетной модели использовано 450000 конечных элементов, с увеличенной плотностью вблизи поверхности конденсации. На рис. 1, 2 приведены результаты расчетов вихревого потока в верхней охлаждаемой части ТТ.

Экспериментально полученные результаты измерений толщины пленки конденсата диэтилового эфира в зависимости от тепловой мощности ТТ (перегрева испарителя относительно температуры кипения диэтилового эфира), представленные на рис. 3, показывают близкое к логарифмическому уменьшение толщины пленки при увеличении тепловой мощности. Столь резкая зависимость толщины пленки от тепло-

вой мощности косвенно подтверждает смену направления тороидального вращения парового вихря в ТТ. Большие значения толщины пленки (и большое тепловое сопротивление ТТ) при малых нагрузках и рез-

кое спадание толщины пленки (и существенно уменьшенное тепловое сопротивление ТТ) при увеличении нагрузки могут быть связаны со сменой направления тороидального вращения парового вихря.

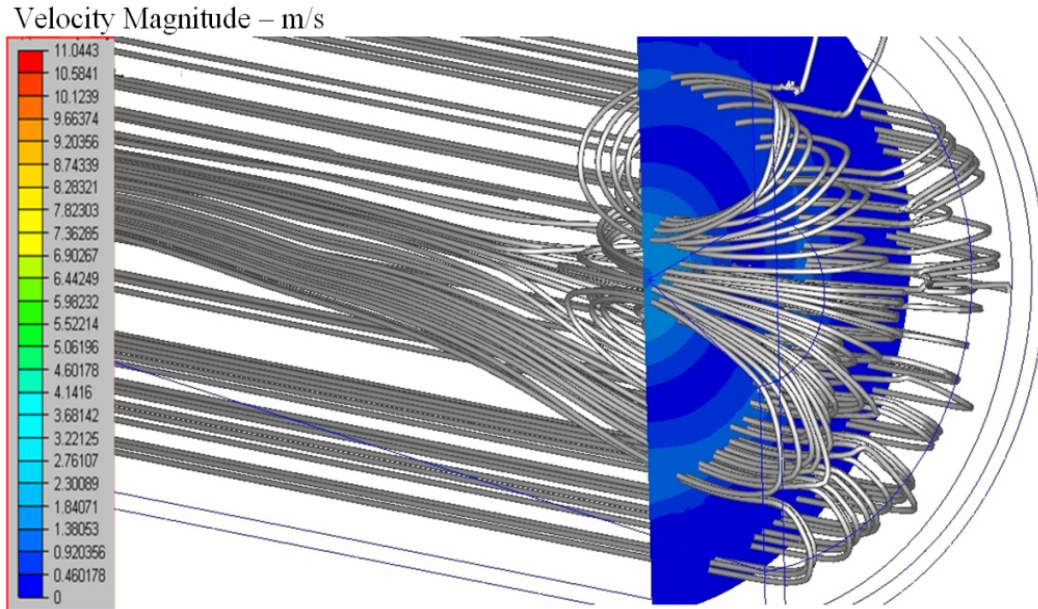


Рис. 1. Возникновение тороидального парового вихревого кольца вблизи поверхности конденсации в выполненном в виде сопла Лавала паровом канале ТТ при слабой тепловой нагрузке. Движущиеся паровые струи за счет эффекта Коанда прилипают к стенкам канала и закрутка парового вихря происходит от периферии к продольной оси. Толщина пленки конденсата под вихревым кольцом увеличивается и ее течение затормаживается

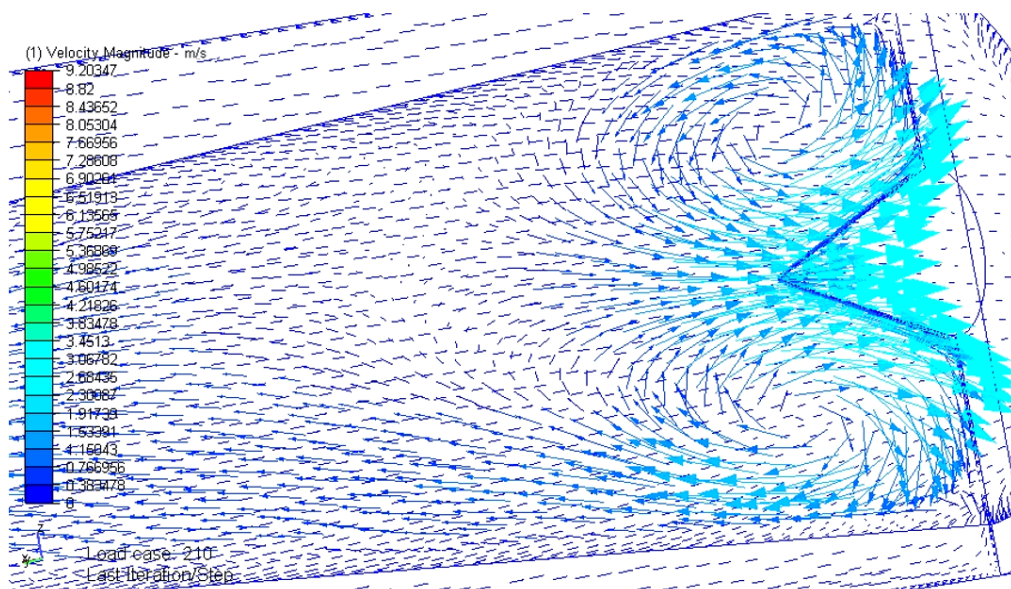


Рис. 2. Возникновение вихревого кольца вблизи поверхности конденсации в выполненном в виде сопла Лавала паровом канале ТТ при большой тепловой нагрузке. Закрутка парового вихря происходит от центральной оси к периферии парового канала. Толщина пленки конденсата под вихревым кольцом уменьшается, пленку «сдувает» с поверхности

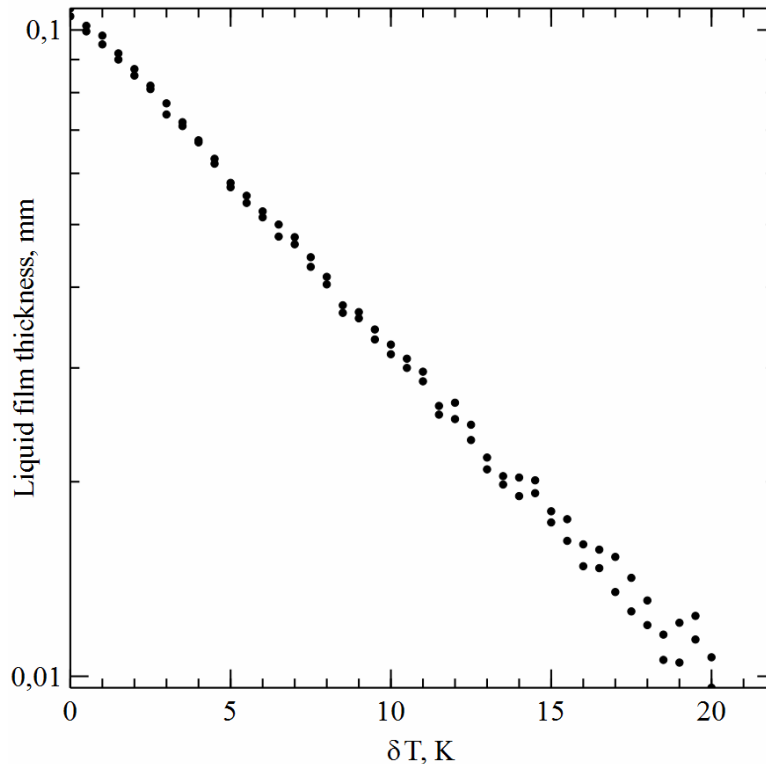


Рис. 3. Толщина пленки диэтилового эфира на поверхности конденсации внутри ТТ в зависимости от перегрева испарителя относительно температуры кипения диэтилового эфира  $\delta T = T - T_B$ . При малом значении перегрева (малой тепловой мощности) толщина пленки большая, при увеличении перегрева толщина резко уменьшается, что косвенно подтверждает изменение направления вращения тороидального парового вихря

#### Библиографические ссылки

1. Seryakov A. V. Velocity measurements in the vapour channel of low temperature range heat pipes // International Journal of Engineering Research & Technology. 2013. Vol. 2, № 8. P. 1595–1603.
2. Seryakov A.V., Konkin A.V., Belousov V.K. The intensification of heat-transfer characteristic of heat pipes.// Proceedings of the VIII Minsk International Seminar of Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources. Minsk, Belarus, 12–15 September 2011. Vol. 2. P. 59–65.
3. Seryakov A. V., Konkin A. V., Belousov V. K. Application of jet vapour nozzle in heat pipes of medium temperature range // Vestnik SibSAU 2012. Issue. 1(41), P. 142–147.
4. Seryakov A. V. Pulsation flow in the vapour channel of short low temperature range heat pipes // International Journal on Heat and Mass Transfer. Theory and Application, 2014. Vol. 2, № 2. P. 40–49.
5. Варгафтик Н. В. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М. : Физматлит, 1963. 708 с.

#### References

1. Seryakov A. V. Velocity measurements in the vapour channel of low temperature range heat pipes// International Journal of Engineering Research & Technology, 2013. Vol. 2, № 8. P. 1595–1603.
2. Seryakov A. V., Konkin A. V., Belousov V. K.. The intensification of heat-transfer characteristic of heat pipes.//Proceedings of the VIII Minsk International Seminar of Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources. Minsk, Belarus, 12–15 September 2011. Vol. 2. P. 59–65.
3. Seryakov A. V., Konkin A. V., Belousov V. K.. Application of jet vapour nozzle in heat pipes of medium temperature range // Vestnik SibSAU, 2012. Issue. 1(41). P. 142–147.
4. Seryakov A. V. Pulsation flow in the vapour channel of short low temperature range heat pipes // International Journal on Heat and Mass Transfer. Theory and Application, 2014. Vol. 2, № 2. P. 40–49.
5. Vargaftic N. B. Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam gasov i zhidkostey. M. : Fizmatlit, 1963. 708 p.

© Сержаков А. В., 2018

УДК 629.78.067

## ЗАЩИТА ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ УСТРОЙСТВ ОТ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ

Е. А. Старостин, М. С. Московских, В. В. Двирный, А. П. Лебедев \*

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

\*E-mail: st.evgen@yandex.ru

*Рассмотрен уникальный способ изоляции изделий электронной техники, с применением поли-пара-ксилиленового покрытия (ППКП).*

*Ключевые слова: срок активного существования (САС), повышенные эксплуатационные характеристики, воздействия агрессивной среды, поли-пара-ксилилен (ППКП).*

## HIGH-TECHNOLOGY DEVICES PROTECTION FROM EXTREME EXTERNAL IMPACT

E. A. Starostin, M. S. Moskovskih, V. V. Dvirniy, A. P. Lebedev \*

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

\*E-mail: st.evgen@yandex.ru

*A unique isolating method of electronic products using a poly-para-xylylene coating is considered.*

*Keywords: active life time, enhanced performance characteristics, exposure of an aggressive environment, poly-para-xylylene.*

В настоящее время на первый план выходят потребности страны в высокотехнологичной и энерговооруженной продукции отечественного космического машиностроения имеющие улучшенные функционально-эксплуатационные характеристики и увеличенный срок активного существования (САС) более 15 лет, способные обеспечить импортнезависимость и решение широкого спектра задач в научной, экономической и оборонной сферах. Вследствие этого ставится задача развития современной техники, изделий, обладающих повышенными эксплуатационными характеристиками в условиях сложного высокотемпературного нагружения, воздействия агрессивной среды, износа, и позволяющих достичь высоких энергетических характеристик [1].

Одним из важных факторов, влияющих на выполнения выше изложенные требования, является защита электрорадиоизделий (ЭРИ) от повышенной влажности воздуха, конденсации влаги. Для выполнения данных требований на нашем предприятии применяют технологию покрытия поли-пара-ксилиленом (ППКП) [2].

Наибольшее применение технология получила в электронике и электротехнике, и, прежде всего, изделиях радиоэлектронной аппаратуры и является уникальным способом обеспечения надежности электронных устройств различного назначения в жестких условиях эксплуатации.

Электронный модуль с точки зрения покрытия является сложнопрофильным изделием, состоящим из многослойного диэлектрического основания с металлическими проводниками, узкими отверстиями и элементами электронной техники, изготовленными из

различных материалов (металлы, керамика, стекло, пластмассы и т. д.). Для защиты электронных устройств традиционно использовались лаки на основе эпоксидных, уретановых, силиконовых связующих [3]. Однако в связи с появлением высокоинтегрированной элементной базы, увеличение насыщенности радиоэлементами, в том числе бескорпусными, применение безвыводных пассивных и активных компонентов, новых миниатюрных мощных интегральных схем (ИС) с большим количеством выводов, монтируемых на печатные платы с шагом меньше 0,625 мм, использование миниатюрных многоконтактных соединений а также новых требований по экологии и безопасности процессов применение лаков в этих устройствах резко ограничилось, вплоть до полного отказа. На смену лаковым покрытиям пришли полимерные покрытия.

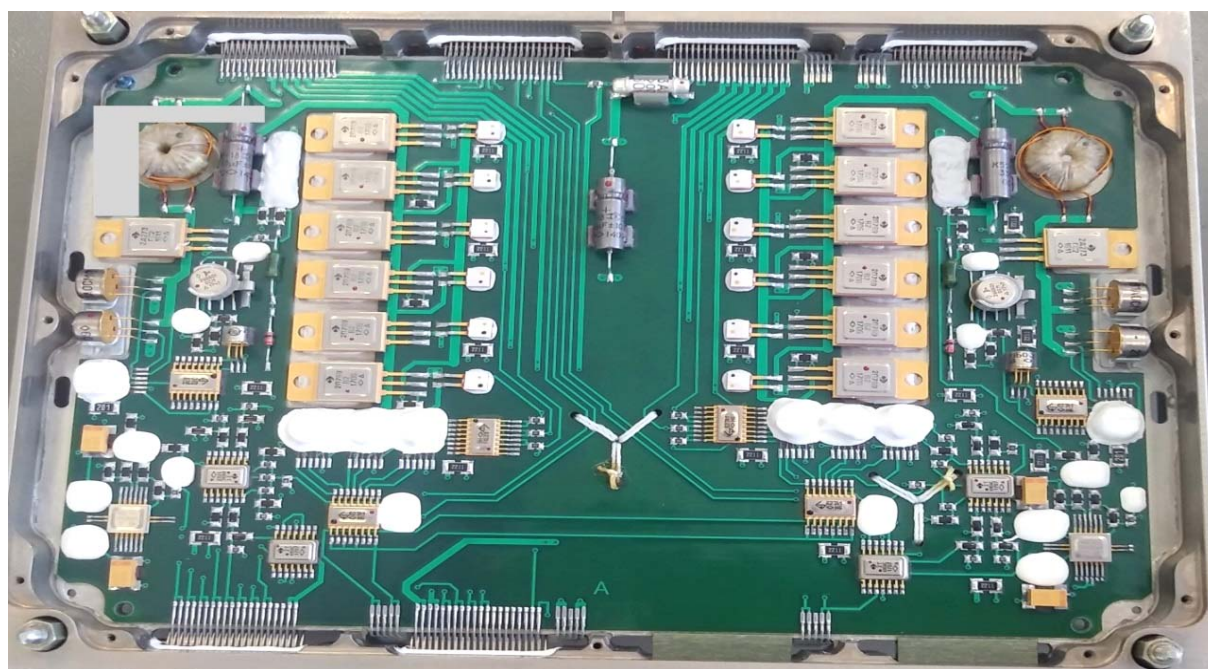
Основные из покрытий и их сравнительные характеристики приведены в таблице.

В отличие от лаковых покрытий, когда для обеспечения требуемых защитных свойств покрытия осуществляются методом многократного нанесения материала толщиной 50–80 мкм, при использовании ППКП эквивалентное по защитным свойствам покрытие толщиной 10–15 мкм наносится за одну операцию [4]. Полученное покрытие при нанесении ППКП представлено на рисунке.

Важной особенностью ППКП является отсутствие внутренних напряжений, так как осаждение происходит из газовой фазы (минуя жидкую) при нормальной или пониженной (до 0 °С) температуре и для формирования покрытия не требуется температурного отверждения.

Основные из покрытия и их сравнительные характеристики

Полимер	Модуль упругости	Устойчивость к растворителям	Адгезия	Ремонто-пригодность	Максимальная температура плавления, °С
Полиакрилат	Высокий	Отличная	Хорошая	Легкая	125
Эпоксидная смола	Высокий	Отличная	Хорошая	Трудная	150
Полиуретан	Высокий	Хорошая	Хорошая	Трудная	125
Силикон	Низкий	Средняя	Хорошая	Легкая	175
Поли-пара-ксилилен	Высокий	Отличная	Хорошая	Трудная	150



Полученное покрытие при нанесении ППКП

Высокая равномерность покрытия по толщине, в том числе на острых кромках и в узких (<1 мкм) зазорах, делает его незаменимым для сложнопрофильных поверхностей. Защитное ППКП обеспечивает надежное функционирование таких изделий в условиях воздействия повышенной влажности, смены температур в широком диапазоне (от  $-80$  до  $100$  °С), биологических, химических и других факторов [5].

Среди разнообразных методов получения полимерных покрытий особое место занимает метод вакуумного осаждения из газовой фазы, позволяющий получать тонкие покрытия на изделиях из любых материалов разных конфигураций. Для реализации процесса получения поли-*n*-ксилилена в виде покрытий или пленок требуются вакуумные установки, состоящие из трех основных узлов: зоны сублимации порошкообразного ди-*n*-ксилилена, зоны пиролиза паров ди-*n*-ксилилена с образованием реакционного мономера *n*-ксилилена при температуре  $650$ – $680$  °С и зоны осаждения, в которой происходит адсорбция паров *n*-ксилилена с последующей полимеризацией и кристаллизацией полимера при температуре ниже  $30$  °С. Необходимое условие такого процесса – вакуум в системе  $1$ – $10$  Па. При использовании других за-

мещенных ди-*n*-ксилиленов изменяется температура адсорбции мономера, например, для дихлор-ди-*n*-ксилилена она составляет  $70$  °С и ниже. Для получения полимерного покрытия высокого качества (с минимальным содержанием примесей и высокой степенью кристалличности) необходимо строгое соблюдение технологических параметров процесса, при этом большое значение имеет система управления параметрами процесса и частота применяемого димера. Для контроля качества применяемого димера на нашем предприятии используется инфракрасный Фурье-спектрометр nikolat is 10, сопоставляющий получаемый спектр порошка (димера) с эталонным (чистым).

Электрические свойства поли-*n*-ксилилена. Поли-*n*-ксилилен характеризуется высоким объемным электрическим сопротивлением, высокой электрической прочностью, низким значением диэлектрических потерь, малым изменением диэлектрической проницаемости с частотой. Эти свойства делают поли-*n*-ксилилен отличным диэлектрическим и изоляционным материалом в условиях повышенной температуры и влажности. Электрические свойства поли-*n*-ксилиленовых пленок мало зависят от их толщины, и скорости их образования. Кроме того, для каждого

конкретного применения решаются вопросы, связанные с очисткой поверхности от ионных и жировых загрязнений, специальной подготовкой поверхности (аппретирование), защитой мест, не подлежащих покрытию, технологией ремонта изделий. При решении вопроса о целесообразности применения ППКП в каждом конкретном случае исходят из условий эксплуатации изделия, конструктивно-технологического исполнения, экономических показателей, требований к чистоте и экологии процесса.

ППКП является уникальным изоляционным покрытием, которое осаждается на подготовленную поверхность абсолютно равномерно с заданной толщиной независимо от площади и конфигурации изделия. Размеры покрываемых поверхностей ограничены лишь габаритами камеры осаждения и при необходимости любые элементы крупногабаритных трансформируемых систем могут быть надежно изолированы от воздействия окружающих факторов с помощью ППКП.

#### Библиографические ссылки

1. Чеботарев В., Косенко В. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.
2. Уразаев В. Г. Влагозащита печатных плат. М. : Техносфера, 2006. 344 с.
3. Калошина Н. В., Гречаник Г. Т. Испытания покрытий на основе полипараксилилена. М. : Наука, 2008. 408 с.

4. Шитова В. В., Хохлов Д. А. Получение диэлектрических пленок полипараксилилена за один технологический цикл. М. : Мир, 1993. 420 с.

5. Ширшова А. А. Технология влагозащиты и электроизоляции изделий РЭА полипараксиленом. М. : Радиотехника, 2011. 630 с.

#### References

1. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya*. [Design philosophy of information spacecraft] / SibSAU. Krasnoyarsk, 2011. 488 p.

2. Urazaev V. G. *Vlagozashhita pechatnyh plat*. [Moisture protection of printed circuit boards]. Moscow : Technosphere, 2006. 344 p.

3. Kaloshina N. V., Grechanik G. T. *Ispytaniya pokrytij na osnove poliparaksililena*. [Tests of coatings based on poly-para-xylylene]. Moscow: The science, 2008. 408 p.

4. Shitova V. V., Hohlov D. A. *Poluchenie dijelektricheskikh plenok poliparaksililena za odin tehnologichekij cikl*. [Production of poly-para-xylylene dielectric films per single technological cycle]. M. : World, 1993. 420 p.

5. Shirshova A. A. *Tehnologija vlagozashhity i jelektrlizoiacii izdelij RJeA poliparaksililena*. [Technology of moisture protection and electrical insulation of REE. [Radio-electronic equipment) products by poly-para-xylylene]. M. : Radio engineering, 2011. 630 p.

© Старостин Е. А., Московских М. С., Двирный В. В., Лебедев А. П., 2018

УДК 629.78.064.52

## ТЕХНОЛОГИЯ РАЗВИТИЯ КОНТРОЛЬНО-ПРОВЕРОЧНОЙ АППАРАТУРЫ, ПРИМЕНЯЕМОЙ ДЛЯ ПРОВЕРКИ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Н. В. Сухарев

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: Nicolawa@yandex.ru

*Представлен краткий обзор развития контрольно-проверочной аппаратуры (КПА), предназначенной для работы в качестве зарядно-разрядного комплекса с аккумуляторными батареями (АБ) космических аппаратов.*

*Ключевые слова: аккумуляторная батарея, космический аппарат, контрольно-проверочная аппаратура, электрические характеристики.*

## TECHNOLOGY OF DEVELOPMENT OF THE CONTROL AND TEST EQUIPMENT USED TO CHECK OF RECHARGEABLE BATTERIES OF SPACECRAFTS

N. V. Sukharev

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: Nicolawa@yandex.ru

*The short review of development of the control and test equipment (KPA) intended for work as a charging and digit complex with the rechargeable batteries (AB) of spacecrafts is submitted.*

*Keywords: battery, spacecraft, control and testing equipment, electrical characteristics.*

Активное совершенствование характеристик аккумуляторных батарей, использование новых типов аккумуляторов для систем электропитания космических аппаратов приводит к постоянному требованию совершенствовать контрольно – проверочную аппаратуру.

В зависимости от совершенствования аккумуляторных батарей для космических аппаратов, поэтапно менялись и требования к электрическим проверкам, и к контрольно-проверочной аппаратуре.

Для решения поставленных задач в конце 70-х годов XX века государственное предприятие «Днепропетровский научно-производственный комплекс «Электровозостроение» (ДЭВЗ) г. Днепропетровск разработал и изготовил КИА-1 (контрольно-измерительная аппаратура) для проверки электрических характеристик АБ.

КИА-1 предназначена для приведения в рабочее состояние и проведения автономных испытаний блока химических никель-водородных батарей.

Далее произошел значительный рост энергооборуженности АБ, увеличилось количество аккумуляторов в одной аккумуляторной батарее до 40. Это потребовало от КПА решения новых задач.

Для выполнения новых требований к испытаниям АБ было разработано и создано КПА – ЗРК-4 (зарядно-разрядный комплекс) с улучшенными характеристиками производства АО «Сатурн» г. Краснодар.

В ЗРК-4 так и не было реализовано требование автоматического управления режимами работы с АБ по

заданному алгоритму. Все режимы приходилось задавать вручную. Напряжение АБ, напряжение каждого аккумулятора контролировались по стрелочным приборам.

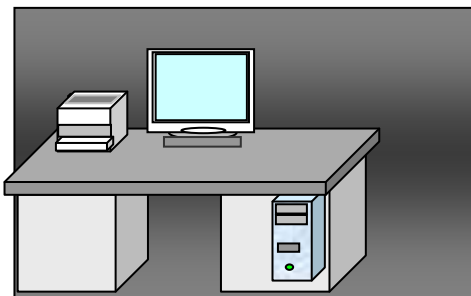
Возникла необходимость в разработке КПА третьего поколения. От КПА третьего поколения требовалось автоматизация процесса работы с АБ, введение в состав КПА ПЭВМ с возможностью управления, задания алгоритмов работы, вывода информации на экран в удобной для обработки форме.

Для решения проблемы автоматизации процесса работы с АБ, в середине 80-х годов ОКТБ ИП (Особое Проектно-Конструкторское и Техническое бюро источников питания) г. Днепропетровск разработало и изготовило КПА третьего поколения – ЗРК (зарядно-разрядный комплекс). ЗРК предназначен для заряда, разряда, проведения тренировочных циклов аккумуляторных батарей различных электрохимических систем.

В конце 90-х годов для более полного контроля за состоянием АБ в состав никель – водородных батарей ввели УКЗА (устройство контроля заряда аккумуляторов), предназначенное для контроля давления в аккумуляторах. Для возможности контроля давления в аккумуляторах при испытаниях потребовалось провести доработку КПА. Доработать существующее КПА предложил научно исследовательский институт автоматики и электромеханики томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники «НИИ АЭМ ТУСУР» г. Томск.



САПК



ЗРК 120/30/30 (3 стойки)



Общий вид ЗРПАК

«НИИ АЭМ ТУСУР» разработал и изготовил блок УК (устройство контроля) для контроля УКЗА и программное обеспечение, которое использовалось совместно с днепропетровским ЗРК.

Все три поколения КПА: КИА-1, ЗРК-4, ЗРК предназначены для приведения в рабочее состояние и проведения автономных испытаний только для никель-водородных батарей.

С появлением литий-ионных АБ для космических аппаратов возникла необходимость в разработке и изготовлении КПА четвертого поколения, с программным обеспечением, позволяющим создавать циклограммы испытаний, контролировать все характеристики АБ, производить запись и хранение информации, осуществлять диагностику аварийных и нештатных состояний, проводить балансировку литий-ионной батарей;

В 2008 году «НИИ АЭМ ТУСУР» г. Томск разработал и изготовил ЗРПАК (зарядно-разрядный программно-аппаратный комплекс), для работы с никель-водородными и литий-ионными АБ.

ЗРПАК предназначен для работы в качестве зарядно-разрядного комплекса для одновременной работы с тремя АБ космических аппаратов на всех этапах наземной эксплуатации. Для проверки соответствия электрических характеристик АБ заданным требованиям проводят входной контроль и автономные испытания АБ на заводе-изготовителе КА. Цель входного контроля – проверить характеристики АБ за заводе-изготовителе КА, после получения от предприятия изготовителя и не допустить установку на борт КА некондиционной аппаратуры [5].

ЗРПАК состоит из следующего оборудования:

- САПК специализированного аппаратно-программного комплекса – ПЭВМ;
- трех стоек ЗРК 120/30/30, для одновременной работы с тремя АБ.

Общий вид ЗРПАК приведен на рисунке.

Проведенный анализ развития контрольно-проверочной аппаратуры, позволяет сделать вывод, что ЗРПАК является на сегодняшний день КПА нового поколения, который позволяет решить проблемы, возникающие на предприятиях-изготовителях косми-

ческих аппаратов современных разработок, при использовании литий-ионных АБ нового поколения.

### Библиографические ссылки

1. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.
2. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Радиотехника, 2010. 800 с.
3. Гушин В. Н. Основы устройства космических аппаратов : учебник для вузов. М. : Машиностроение, 2003. 272 с.
4. Космические вехи : сб. науч. тр. / под ред. проф. Н. А. Тестоедова ; ОАО «ИСС» им. акад. М. Ф. Решетнева». Красноярск, 2009. 704 с.
5. Беляков И. Т., Зернов И. А., Антонов Е. Г. Технология сборки и испытаний космических аппаратов : учебник. М. : Машиностроение, 1990. 352 с.

### References

1. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. Basics of designing spacecraft information support: studies. allowance / Sib. state aerospace. univ. of Illinois. Krasnoyarsk, 2011. 488 p.
2. GLONASS. Principles of construction and operation / ed. A. I. Perova, V. N. Harisova. – 4th ed., pererab. I DOP. M. : Radio engineering, 2010. 800 p.
3. Gushchin V. N.. The basics of the device of spacecrafts: the textbook for high schools. M. : Mechanical Engineering, 2003. 272 p.
4. Space milestones: collection of scientific works. Tr. / under the editorship of prof.. Testoedov ; JSC “ISS to them. acad. M. F. Reshetnev”. Krasnoyarsk, 2009. 704 p.
5. Belyakov I. T., Zernov I. A., Antonov E. G. Technology of Assembly and testing of spacecraft: Textbook for higher technical schools. M. : Mechanical engineering, 1990. 352 p.

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЭФЕМЕРИДНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ**

A. С. Толстик<sup>1</sup>, В. М. Чубич<sup>2</sup>, О. С. Черникова<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт метрологии  
Российская Федерация, 630004, г. Новосибирск, просп. Димитрова, 4

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет  
Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20  
\*E-mail: chernikova@corp.nstu.ru

*На основе адаптивной модификации сигма-точечного фильтра Калмана осуществлено оценивание параметров модели радиационного давления солнечного излучения, позволившее существенно повысить качество прогнозирования траектории движения навигационного спутника.*

*Ключевые слова: сигма-точечный фильтр, квазиравдоподобное оценивание, радиационное давление, траектория движение спутника.*

**IMPROVEMENT OF QUALITY OF THE PROBLEM OF EPHEMERIS PROVIDING BASED ON MODERN METHODS OF PARAMETRICAL IDENTIFICATION**

A. S. Tolstikov<sup>1</sup>, V. M. Chubich<sup>2</sup>, O. S. Chernikova<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Scientific Research Institute of Metrology  
4, Dimitrov Av., Novosibirsk, 630004, Russian Federation

<sup>2</sup>Novosibirsk State Technical University  
20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation  
\*E-mail: chernikova@corp.nstu.ru

*Based on the adaptive modification of the Kalman sigma-point filter, the parameters of the radiation pressure model of solar radiation were estimated. The developed algorithms have improved the quality of forecasting the trajectories of the navigation satellite.*

*Keywords: unscented Kalman filter, quasimaximum estimation, solar radiation, satellite trajectory.*

Качество эфемеридно-временного обеспечения для ГНСС технологий в значительной мере зависит от степени адекватности применяемых математических моделей, описывающих движение орбитальной группировки навигационных спутников (НС). При формировании таких моделей проблемным остается учет возмущений от радиационного давления на спутник солнечного излучения. Настоящая работа посвящена решению задачи идентификации моделей радиационного давления на спутник солнечного излучения на основе применения современных математических методов.

Движение космического аппарата (КА) в инерциальной системе координат (ИСК) в гравитационном поле Земли можно описать следующей нелинейной непрерывно-дискретной моделью в пространстве состояний [1]:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} r(t) \\ \dot{r}(t) \end{pmatrix} = f(r(t), \dot{r}(t), \theta) + w(t), \quad t \in [t_0, t_N], \quad (1)$$

$$s(t_{k+1}) = r(t_{k+1}) + v(t_{k+1}), \quad k = 0, 1, \dots, N-1. \quad (2)$$

Здесь  $r(t)$  – вектор координат КА в ИСК;  $f(\cdot)$  – нелинейная вектор-функция, учитывающая влияние на траекторию движения КА радиационного давления

(РД) солнечного излучения, несферичности геопотенциала Земли, гравитационного воздействия Луны, Солнца и других планет;  $\theta$  – вектор неизвестных параметров модели РД;  $s(t_{k+1})$  – вектор измерения;  $w(t)$  и  $v(t_{k+1})$  – взаимно некоррелированные гауссовские векторы шумов системы и измерения соответственно с нулевыми математическими ожиданиями и ковариационными матрицами

$$E[w(t)w^T(\tau)] = Q(t)\delta(t - \tau),$$

$$E[v(t_{k+1})v^T(t_{i+1})] = R(t_{k+1})\delta_{ki}.$$

Относительно функции  $f(\cdot)$  в правой части уравнения состояния (1) заметим, что в настоящее время можно с незначительной погрешностью учесть несферичность геопотенциала и гравитационное влияние Луны, Солнца и других планет (см., например, [2; 3]). Иначе обстоит дело с моделированием воздействия сил РД. Воспользуемся следующей моделью РД в объектоцентрической системе координат (ОСК) из [4]:

$$f_{RD} = \Lambda \cdot d \cdot r_{OS}^{-2} \cdot [x_{RP} \cdot (\theta_1 + \theta_2 \cos \kappa + \theta_3 \sin \kappa) + y_{RP} \cdot (\theta_4 + \theta_5 \cos \kappa + \theta_6 \sin \kappa) + z_{RP} \cdot (\theta_7 + \theta_8 \cos \kappa + \theta_9 \sin \kappa)]. \quad (3)$$

Данная модель применяется в центрах обработки международной службы International GNSS Service. Здесь  $\Lambda$  – фактор затмения;  $d$  – фактор, зависящий от формы НС, его массы, отражательной и поглощательной способности материалов его поверхности;  $r_{os}$  – расстояние между спутником и Солнцем;  $x_{RP}, y_{RP}, z_{RP}$  – координаты НС в ОСК;  $k$  – аргумент широты НС.

Традиционно для оценивания параметров стохастических моделей в пространстве состояний применяются широко известный расширенный фильтр Калмана [5]. К сожалению, в нашем случае этот подход неприемлем. Это связано с тем, что вектор-функция  $f(\cdot)$  вычисляется достаточно сложно, в результате чего получение аналитических соотношений, необходимых для вычисления матриц Якоби проблематично. Остроту вопроса в значительной мере снимает появившийся относительно недавно так называемый сигма-точечный фильтр Калмана [6], который применяется для нелинейных моделей и не предполагает проведение линеаризации. В данной работе использована непрерывно-дискретная модификация сигма-точечного фильтра из [7], адаптированная на наш случай с неизвестными ковариационными матрицами шумов системы и измерений.

Возьмем в качестве измерительных данных срочные эфемериды НС GPS от 14.07.2016 г., полученные международной ГНСС-службой. В этом случае НС совершает более одного оборота вокруг Земли (проходит различные световые зоны). Расчет скорости НС в начальный момент времени произведем на основе срочных эфемерид с использованием интерполяции Эверетта. Оценивание параметров РД в модели (3), осуществим с помощью метода квазикасимального правдоподобия по данным траекторных наблюдений на участках полной освещенности и зон полутени. В результате получим:  $\hat{\theta} = (1.06501980, 0.120437072, 0.104263367, 0.092933778, 0.055005516, 0.013874860, 0.104305180, 0.008244252, 0.054217460)$ .

Подчеркнем, что обычно на практике прогнозирование траектории движения НС осуществляется при следующих значениях параметров модели (3):  $\theta_1 = 1, \theta_2 = \theta_3 = \dots = \theta_9 = 0$ .

Для сравнения качества прогнозирования траекторий орбитального движения спутника PG01 с финальной эфемеридой от 15.07.2016 г. вычислим  $\delta_s$  и  $\hat{\delta}_s$  по формулам

$$\delta_s = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{N-1} \|s(t_{k+1}) - s_p(t_{k+1})\|^2}{\sqrt{N}}},$$

$$\hat{\delta}_s = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{N-1} \|s(t_{k+1}) - \hat{s}_p(t_{k+1})\|^2}{\sqrt{N}}},$$

где  $\{s(t_{k+1}), k = 0, 1, \dots, N-1\}$  – финальная эфемерида НС;  $\{s_p(t_{k+1}), k = 0, 1, \dots, N-1\}$  – спрогнозированная по уравнению сигма-точечного фильтра траектория при  $\theta = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ ;  $\{\hat{s}_p(t_{k+1}), k = 0, 1, \dots, N-1\}$  –

спрогнозированная траектория при  $\theta = \hat{\theta}$ . В результате получим  $\delta_s = 9.0414e-06$  км,  $\hat{\delta}_s = 4.0146e-08$  км.

Таким образом, в результате уточнения параметров РД солнечного излучения удалось существенно (на 2 порядка) повысить точность прогнозирования траектории движения НС.

#### Библиографические ссылки

1. Дубошин Г. Н. Небесная механика. Методы теории движения искусственных небесных тел. М. : Наука, 1983. 352 с.
2. Бордовицына Т. В., Авдюшев В. А. Теория движения искусственных спутников Земли. Аналитические и численные методы : учеб. пособие. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2007. 178 с.
3. Урмаев М. С. Орбитальные методы космической геодезии. М. : Недра, 1981. 257 с.
4. Kouba J. A Guide to using international GNSS Service (IGS) Products. Ottawa, 2009. 34 p.
5. Чубич В. М., Филиппова Е. В. Активная идентификация стохастических динамических систем. Оценивание параметров : учеб. пособие. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. 63 с.
6. Julier S. J., Uhlmann J. K. A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems // Proc. Of AeroSense: 11-th Int. Symp. on Aerospace / Defence Sensing, Simulation and Control, 1997. 12 p.
7. Särkkä S. On unscented Kalman filtering for state estimation of continuous-time nonlinear systems // IEEE Transactions on Automatic Control, 2007. 11 p.

#### References

1. Duboshin G. N. *Nebesnaya mekhanika. Metody teorii dvizheniya iskusstvennyh nebesnyh tel* [Celestial mechanics. Methods of the theory of motion of artificial celestial bodies]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 352 p.
2. Bordovicyna T. V. *Teoriya dvizheniya iskusstvennyh sputnikov Zemli. Analiticheskie i chislennyye metody: ucheb. posobie* [Theory of motion of artificial Earth satellites. Analytical and numerical methods: tutorial]. Tomsk, Tomsk University Publ., 2007. 178 p.
3. Urmaev M. S. *Orbital'nye metody kosmicheskoy geodezii* [Orbital methods of space geodesy]. Moscow, NEDRA, 1981. 257 p.
4. Kouba J. A. [Guide to using international GNSS Service (IGS) Products]. *Geodetic Survey Division Natural Resources*, 2009. Vol. 6, 34 p.
5. Chubich V. M., Filippova E. V. *Aktivnaya identifikaciya stoxasticheskix dinamicheskix sistem. Ocenivanie parametrov: ucheb. posobie* [Active identification of stochastic dynamic systems. Parameter estimation: tutorial]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2016. 63 p.
6. Julier S. J., Uhlmann J. K. [A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems]. [Proc. Of AeroSense: 11-th Int. Symp. on Aerospace/Defence Sensing, Simulation and Control], 1997. 12 p.
7. Särkkä S. [On unscented Kalman filtering for state estimation of continuous-time nonlinear systems]. [IEEE Transactions on Automatic Control], 2007. 11 p.

УДК 543.4:544.2

## ПРИМЕНЕНИЕ СОТОВЫХ ПАНЕЛЕЙ В СПУТНИКОВОЙ ТЕХНИКЕ

А. С. Уракова<sup>1\*</sup>, В. Н. Наговицин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Политехнический институт «Сибирский федеральный университет»  
Межинститутская базовая кафедра «Прикладная физика и космические технологии»  
Российская Федерация, 662971, г. Железногорск Красноярского края, ул. Кирова 12а  
<sup>2</sup>АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
\*E-mail: urakova.aleksandra96@mail.ru

*Рассматриваются причины применения сотовых конструкций в спутниковой технике и обзор технологий обработки сотового заполнителя в растянутом состоянии.*

*Ключевые слова: сотовые конструкции, технология, сотовый заполнитель, крепление заготовки.*

## USING CELLULAR PANELS IN SATELLITE TECHNOLOGY

A. S. Urakova<sup>1\*</sup>, V. N. Nagovitsin<sup>1,2</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>JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
\*E-mail: urakova.aleksandra96@mail.ru

*The research considers causes of the use of cellular structures in satellite technology and an overview of honeycomb processing technology in an extended state.*

*Keywords: cellular structures, technology, honeycomb, fastening a blank.*

Сотовые конструкции представляют собой так называемый «сэндвич-пакет», состоящий из сотового заполнителя, который с помощью специального пленочного клея установлен между двумя листами (обшивками). Структура сотовых конструкций представляет собой систему, которая состоит из двух внешних тонких слоев и среднего, более толстого слоя. Обшивки изготавливаются из более прочных материалов (стали, сплавов легких материалов, дерева, пластмасс и др.). Заполнитель изготавливают из относительно малопрочных материалов с малой плотностью (из пробки, резины, пластмассы, вспененного полимерного материала, гофрировки). В космической технике также применяют соты, выполненные целиком из металлов (алюминия и титана) [1].

Все проектируемые и изготавливаемые в АО «ИСС» [2] сотовые конструкции можно весьма условно подразделить на три типа. Первый – корпусные сотовые панели, которые используются для построения общей конструктивно – силовой схемы спутника. Второй – термостатированные сотовые панели со встроенным жидкостным контуром и/или тепловыми трубами. Третий тип – сотовые панели специального назначения, которые изготавливаются из неметаллических материалов. В реальных конструкциях космических аппаратов предприятия преимущественно используется комбинированный тип сотовых панелей (см. рисунок). Достоинства и недостатки сотовых конструкций представлены в таблице.

При механической обработке сотового заполнителя в растянутом состоянии (СЗ), возникает сложность в закреплении [3; 4]. Способы крепления заготовки СЗ:

1. Магнитное крепление.

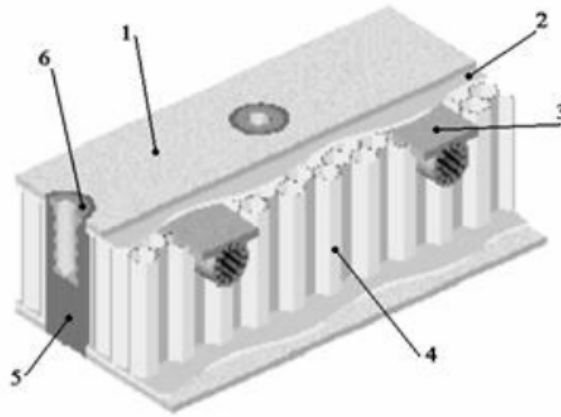
Способ крепления заготовки сотового заполнителя при механической обработке включает установку заготовки на магнитную плиту станка, закрепление заготовки путем, включения магнитной плиты, взаимодействующей с предварительно внедренным в заготовку магнитным материалом.

В качестве магнитного материала используют состав, содержащий полимерную матрицу и порошкообразный магнитный наполнитель, который наносят закреплением заготовки и выдерживают до отверждения состава.

2. Вакуумное крепление.

Вакуум-отсосы устанавливают на планшайбе, подающем столе или плите станка. Для вакуумного крепления с одной стороны заполнителя устанавливают (с помощью полигликоля, липкой ленты и т. п.) временную обшивку, удаляемую по окончании механической обработки противоположной стороны сотового блока. Затем на обработанную сторону также можно поставить временную обшивку для продолжения обработки.

При отсутствии обшивки (временной, постоянной), сотовый заполнитель закрывают пленкой, вакуум создается между пленкой и столом, фиксируя заготовку.



Фрагмент сотовой панели:  
 1 – обшивка, 2 – клеевой слой, 3 – тепловая труба,  
 4 – сотовый наполнитель, 5 – вспенивающийся клей, 6 – опорный узел

#### Достоинства и недостатки сотовых конструкций

Достоинства	Недостатки
Малая масса конструкции. Высокая жесткость. Удельная статическая прочность больше на 20–40 %. Теплоизоляционные свойства выше в 3–4 раза. Количество деталей, входящих в узел, меньше в 3–4 раза. Более гладкие поверхности узлов и агрегатов	Сложность контроля качества клеевого соединения обшивки и сотового наполнителя. Скопление конденсата внутри панели, что может приводить к ускорению процесса коррозии. Трудоемкость изготовления и проектирования больше на 15–20 %

3. Обработка льдом с укреплением сотового наполнителя.

При механической обработке сотовых алюминиевых наполнителей применяют обычную фрезу с охлаждением сотов льдом.

Соты предварительно заполняют водой, которую замораживают твердой углекислотой. Этот способ невозможно использовать для обработки сотов из нержавеющей стали, вследствие того, что в данном случае лед будет плавиться до завершения процесса обработки.

Проведен информационный обзор в области процесса обработки сотового наполнителя в растянутом состоянии.

#### Библиографические ссылки

1. Особенности механической обработки алюминиевых сотовых конструкций / В. В. Злотенко, Н. Н. Ишенина // Вестник СибГАУ. 2005. № 4 (10). С. 2.

2. Конструкция космических аппаратов // АО «ИСС» им. акад. М. Ф. Решетнева» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iss-reshetnev.ru/branch-center/design-cosmic-device> (дата обращения: 07.09.2018).

3. Математическая модель процессов теплообмена в сотовой панели с тепловыми трубами / Васильев Е. Н., Деревянко В. В. // Вестник СибГАУ. 2010. № 2 (28). С. 4–7.

4. Способ крепления ячеистых материалов при механической обработке // Национальная электронная библиотека [Электронный ресурс]. URL: <https://нэб.рф/catalog> (дата обращения: 07.09.2018).

#### References

1. Zlotenko V. V., Ishenina N. N. [Features of machining of aluminum cellular structures]. *Vestnik SibGAU*. 2005, No. 4, P. 2. (In Russ.)

2. The structures of the spacecraft Available at: <https://www.iss-reshetnev.ru/branch-center/design-cosmic-device> (accessed: 07.09.2018).

3. Vasiliev E. N., Derevyanko V. V. [Mathematical model of processes of heat exchange in the cellular panel with thermal pipes]. *Vestnik SibGAU*. 2010, No. 2, P. 4–7. (In Russ.)

4. Method of fastening of honeycomb materials when machining. Available at: <https://нэб.рф/catalog> (accessed 07.09.2018).

© Уракова А. С., Наговицин В. Н., 2018

УДК 621.3.029.6

## ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВОГО ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩЕГО ФИЛЬТРА С ШИРОКОЙ ПОЛОСОЙ ЗАГРЯЖДЕНИЯ

А. А. Хвалько, А. Б. Калюжная

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79  
E-mail: Anastasya.kaliuzhnaya@mail.ru

*Исследован фильтр с высокими частотно-селективными свойствами. В конструкции, которая может быть использована в ракетно-космической технике, взаимодействие между микрополосковыми резонаторами осуществляется через узкую поперечную щель, выполненную в заземляемом основании.*

*Ключевые слова: полосно-пропускающий фильтр, микрополосковый резонатор.*

## INVESTIGATION OF THE MICROPOW BAND-FILTER FILTER WITH A WIDE BAND STRENGTH

A. A. Xwalko, A.B. Kalyuzhnaya.

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
Siberian Federal University  
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
E-mail: Anastasya.kaliuzhnaya@mail.ru

*A filter with high frequency-selective properties was studied. In the design, which can be used in rocket and space technology, the interaction is carried out through a narrow transverse slot made in grounded ground.*

*Keywords: bandpass filter, microstrip resonator.*

В настоящее время широкое распространение получили спутниковые и наземные системы связи, которые работают в диапазоне сверхвысоких частот. Это приводит к повышению требований к характеристикам полосовых фильтров и всех компонентов радиосистем в целом. Основными требованиями является малый вес и габариты устройства, а также низкие потери в полосе пропускания и высокая избирательность. Планарная технология помогает добиться уменьшения габаритов фильтра [1–3].

Микрополосковая линия передач получила наибольшее распространение в СВЧ области среди планарных линий. Микрополосковая линия обладает малыми габаритами, ее легко изготовить, а также она имеет высокую надежность и сравнительно малые потери в полосе пропускания [4]. Особенностью фильтра предлагаемой конструкции является то, что его резонаторы взаимодействуют через дефект в заземляемом основании, длина и ширина которых определяют величину коэффициента связи резонаторов. Такое техническое решение обеспечивает, во-первых, компактное расположения полосковых проводников микрополосковых резонаторов друг над другом, а во-вторых, уменьшение длины проводников резонаторов за счет увеличения их эквивалентной индуктивности, что приводит в совокупности к уменьшению габари-

тов устройства. Следует отметить, что выигрыш в уменьшении размеров предлагаемого фильтра по сравнению с фильтром традиционной конструкции возрастает с уменьшением относительной ширины полосы пропускания, а также при увеличении числа резонаторов.

В настоящей работе представлены результаты исследований полосно-пропускающего фильтра новой конструкции, который по сравнению с самым близким аналогом наряду с миниатюрностью обладает также расширенной высокочастотной полосой заграждения [5].

### Библиографические ссылки

1. Тюрнев В. В. Теория цепей СВЧ : учеб. пособие. Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2003. 194 с.
2. Ковалев И. С. Конструирование и расчет полосковых устройств. М. : Советское радио, 1974. 294 с.
3. Альтман Дж. Л. Устройства сверхвысоких частот. М. : Мир, 1968. 487с.
4. Малорацкий Н. Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ. М. : Советское радио, 1976. 216 с.
5. Пат. 2222076 Российская Федерация, МКИ7 Н 01Р 1/203. Микрополосковый полосно-пропускающий фильтр / Шепов В. Н. Бюл № 2 от 20.01.2004.

**References**

1. Tyurnev V. V. Theory of Microwave Circuits : A Study Guide. Krasnoyarsk : IPC KSTU, 2003. 194 p.
2. Kovalev I. S. Design and calculation of strip devices. M. : Soviet Radio, 1974. 294 p.
3. Altman J. L. Ultra-high frequency devices. M. : MIR, 1968. 487 p.
4. Maloratsky N. G. Microminiaturization of elements and microwave devices. M. : Soviet Radio, 1976. 216 p.
5. Pat. 2222076 Russian Federation, MKI7 N 01R 1/203. Microstrip bandpass filter. Shepov V. N. bullet number 2 from 20.01.2004.

© Хвалько А. А., Калужная А. Б., 2018

УДК 629.783

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЖЕСТКОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ СПИЦЫ РЕФЛЕКТОРА  
АНАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

П. А. Хрущев

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: pav.hru0354@gmail.com

*Определяется жесткость спицы в составе рефлектора космического аппарата. Задача решена путем использования аналитических методов.*

*Ключевые слова: космические аппараты, зонтичная антенна, спица, аналитические методы, жесткость.*

**DESIGN OF STIFFNESS PARAMETERS OF THE SPOKE  
OF THE REFLECTOR BY ANALYTICAL METHOD**

P. A. Khrushchev

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: pav.hru0354@gmail.com

*This paper present one of stages determination stiffness for spoke design of the spacecraft. The task is solved by use of an analytical methods.*

*Keywords: spacecraft; umbrella-type space antenna; spoke; analytical method; stiffness.*

**Введение.** Современные крупногабаритные антенны для космических аппаратов создают трансформирующимися, в силу ограниченного пространства для размещения космического аппарата. После выхода на орбиту, раскрывшаяся антенна имеет большой диаметр, которого невозможно достигнуть при использовании антенн классического исполнения. В последнее время в качестве элементов конструкции рефлектора антенны используют сетчатые структуры [1–2]. На спицах рефлектора закрепляется отражающее полотно, так же спицы представляют собой формообразующий силовой каркас.

В работе определяется жесткость спицы для конструкции рефлектора космического аппарата [3–4].

**Аналитическая модель.** Рассмотрим схему со спицей с массой на конце, при жестком закреплении у основания (см. рисунок), где массой представлен силовой каркас рефлектора. Система обладает двумя степенями свободы:  $U$  – линейное перемещение по оси  $X$ ,  $\phi$  – угол поворота вокруг оси  $Z$ . Требуемая минимальная частота спицы  $f = 0,39$  Гц, длина спицы  $L = 7,85$  м, масса  $M = 67,5$  кг, моменты инерции рефлектора вокруг оси  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  соответственно: 1226, 613, 613 кг·м<sup>3</sup>.

**Определение изгибной жесткости поперечного сечения спицы.** Определение поперечной жесткости спицы на изгиб происходит из частотных уравнений [5, п. 19.13].

Для изгиба в плоскости  $xy$ , частота соответствует:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{2EJ_z}{M \cdot R_z^2 \cdot L}} \cdot \left( 1 + \frac{3 \cdot R_z^2}{L^2} - \sqrt{1 + \frac{3 \cdot R_z^2}{L^2} + \frac{9 \cdot R_z^4}{L^4}} \right)$$

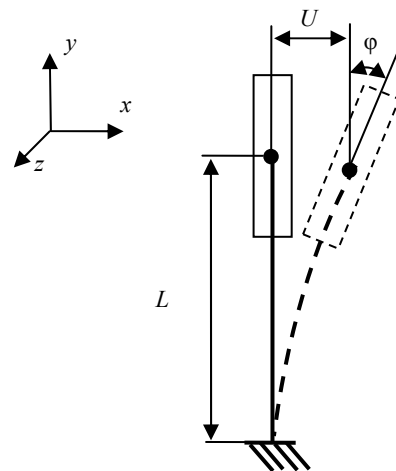


Рис. 1. Изгиб спицы с массой на конце

Аналогично в плоскости  $yz$ :

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{2EJ_x}{M \cdot R_x^2 \cdot L}} \cdot \left( 1 + \frac{3 \cdot R_x^2}{L^2} - \sqrt{1 + \frac{3 \cdot R_x^2}{L^2} + \frac{9 \cdot R_x^4}{L^4}} \right),$$

где  $R_x, R_z$  – радиусы инерции определяемые как:

$$R_x = \sqrt{\frac{I_x}{M}} = 4,2 \text{ м}; \quad R_z = \sqrt{\frac{I_z}{M}} = 3 \text{ м}.$$

Спица имеет две жесткости на изгиб, где  $f_1 = f_2 = f = 0,39$  Гц :



$$EJ_z = \frac{f_1 \cdot 2\pi \cdot M \cdot R_z^2 \cdot L}{1 + \frac{3 \cdot R_z^2}{L^2} - \sqrt{1 + \frac{3 \cdot R_z^2}{L^2} + \frac{9 \cdot R_z^4}{L^4}}},$$

$$EJ_x = \frac{f_2 \cdot 2\pi \cdot M \cdot R_x^2 \cdot L}{1 + \frac{3 \cdot R_x^2}{L^2} - \sqrt{1 + \frac{3 \cdot R_x^2}{L^2} + \frac{9 \cdot R_x^4}{L^4}}}.$$

Подставив соответствующие значения переменных, получаем жесткости спицы:  $EJ_z = 1,134 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$ ;  $EJ_x = 8,798 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$ .

Для удовлетворения требований из двух полученных жесткостей выбираем наибольшую  $EJ_z = 1,134 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$ .

В результате была определена жесткость спицы на изгиб в соответствии с требованием по минимальной частоте. Представленная в этой статье работа – это один из этапов расчета жесткости параметров конструкции рефлектора.

#### Библиографические ссылки

1. Anderson M. S. Buckling of periodic lattice structures. *AIAA Journal*, 1981, Vol. 19, P. 782–788.
2. Дрaбник А. Л., Зузенко В. Л., Кислов А.Г. Антенно-фидерные устройства. М. : Советское радио, 1974. 536 с.
3. Хейлен В., Ламменс С., Сас П. Модальный анализ: Теория и испытания / пер. с англ. В. С. Межина, Н. А. Невзорского. М. : Новатест, 2010. 319 с.

4. Биргер И. А. Прочность, устойчивость, колебания : справочник. В 3 т. Т. 3 / под ред. д-ра техн. наук И. А. Биргера, чл.-корр. АН Латв. ССР Я. Г. Пановко. С. 294–300.

5. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. 2-е изд., перераб. и доп. Киев : Наук. думка, 1988. 736 с.

#### References

1. Anderson M. S. *Buckling of periodic lattice structures. AIAA Journal*. 1981, Vol. 19. P. 782–788.
2. Drabnik A. L., Zuzenko V. L., Kislov A. G. *Antenna-fiderny sistemy [Antenna feeder systems]*, Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1974. 536 p.
3. Heylen W., Lammens S., Sas P. *Modal Analysis Theory and Testing*. KULeuven, 1997, 340 p. (Russ. ed.: Mezhin V. S., Nevzorskii N.A. *Modal'nyy analiz: teoriya i ispytaniya*. ООО "Novatest", Publ., 2010. 319 p.).
4. Birger I. A. *Prochnost, ustoichivost, kolebania. [Strength, stability, vibration] Directory in three volumes*. Vol. 1: ed. Dr. techn. science I. A. Birger. corr. Academy of Sciences of the Latvian SSR Y. G. Panovko. P. 294–300.
5. Pisarenko G. S., Yakovlev A. P., Matveev V. V. *Spravochnik po soprotivleniy materialov [Reference book on the resistance of materials]*. 2 nd ed., corr. and additional. Kiev: Science. Dumka, 1988. 736 p.

© Хрущелев П. А., 2018

УДК 629.78.064.56

**РАЗРАБОТКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФРОНТАЛЬНОЙ СЕТИ  
ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ РЕФЛЕКТОРА  
С ТРАПЕЦЕИДАЛЬНОЙ ФОРМОЙ ФАЦЕТ**

В. О. Шевчугов, В. В. Шальков

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: vshevchugov@mail.ru

*Рассматривается процесс проектирования формообразующей структуры рефлектора, определяются основные параметры, изменяемые в процессе построения модели. Описана полученная параметрическая модель и возможности ее перестроения*

*Ключевые слова: параметрическая модель, формообразующая структура, рефлектор*

**DEVELOPMENT OF PARAMETRIC MODEL OF A FRONT NET OF THE SHAPE-GENERATING  
STRUCTURE WITH TRAPEZOIDAL FORM OF FACETS**

V. O. Shevchugov, V. V. Shal'kov

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: vshevchugov@mail.ru

*The article considers a design process of shape-generating structure of reflector, the main parameters that modifies in the process of model building are determine. The paper describes the developed parametric model and the possibilities of its rebuilding.*

*Keywords: parametric model, shape-generating structure, reflector.*

Для использования в составе современных космических аппаратов широкое распространение получили крупногабаритные трансформируемые сетчатые рефлекторы. Применение данного типа рефлекторов позволяет создавать крупногабаритные, достаточно легкие конструкции, с высокой степенью трансформации. На сегодняшний день, благодаря своим преимуществам, проблема увеличения размеров и поиска рациональной конструкции для рефлекторов данного типа является весьма актуальной задачей [1].

Одной из составных частей сетчатого рефлектора является формообразующая структура (ФОС). ФОС предназначена для формирования радиоотражающей поверхности рефлектора требуемой точности.

Одним из ключевых параметров ФОС является количество точек регулировки. Оно определяется исходя из требований по точности, предъявляемых к рефлектору, а также от его размеров [2]. В процессе проектирования рефлектора, при поиске рациональной конструкции может происходить неоднократное изменение параметров модели [3]. К таким параметрам, в ФОС с трапецеидальной формой ячейки, как правило, относится количество и взаимное положение кольцевых и радиальных шнуров. Процесс перестроения модели, в отдельных случаях может занимать достаточно много времени [4; 5]. Чтобы сократить время перестроения модели, учитывая новые параметры, была создана параметрическая модель фронтальной сети формообразующей структуры рефлекто-

ра с трапецеидальной формой ячейки, которая выполняет автоматическое перестроение модели, используя параметры, определенные пользователем.

На рис. 1, представлен общий вид полученной параметрической модели. Данная модель построена для конструкции с 6 спицами и позволяет изменять такие параметры как:

- угол  $F11$ : Определяет взаимное угловое положение спиц рефлектора;
- углы  $F11/2$ ,  $F11/2$ ,  $F12/1$ : Определяют взаимное угловое положение подсекторов в секторах. Под сектором понимается область между соседними спицами;
- диаметр апертуры родительского параболоида ( $D$ );
- клиренс ( $H$ );
- диаметр зоны отсутствия сетеполотна ( $d$ );
- фокусное расстояние родительского параболоида ( $F$ );
- количество и взаимное положение кольцевых шнуров: максимально допустимое количество шнуров для представленной модели – 20;
- коэффициент  $k$  – коэффициент обратно пропорциональный величине прогиба дуги периферийного шнура;
- количество и взаимное положение радиальных шнуров: для каждого подсектора (1пс, 2пс, 3пс, рис. 1) индивидуально может варьироваться количество кольцевых шнуров от 0 до 6 штук.

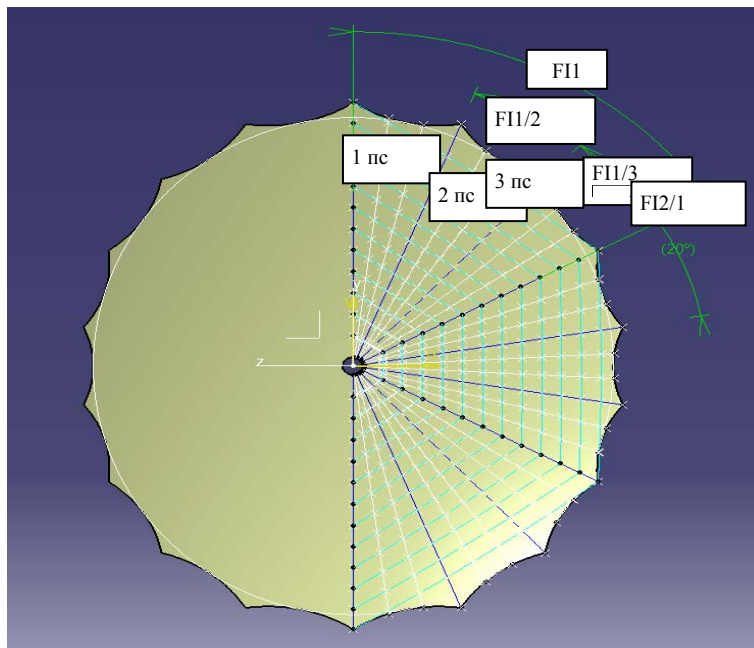


Рис. 1. Параметрическая модель ФОС с трапецидальной формой facets

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	'L1/1'	369,417	264,000	331,354	200,000		1	n	L1	L2	L3	L4	Lmin							
2	'L1/2'	369,417	264,000	331,354	200,000		2		20	7213,354	6452,062	6471,383	7256,063	6452,062						
3	'L1/3'	369,417	264,000	331,354	200,000		3			L1-2	L2-2	L3-2	L4-2	L5-2	L6-2	L7-2	L8-2	L9-2	L10-2	Lmin
4	'L1/4'	369,417	264,000	331,354	200,000		4			7213,354	7074,497	6759,199	6452,062	6277,369	6283,942	6471,383	3789,948	7113,842	7256,063	3789,948
5	'L1/5'	369,417	264,000	331,354	200,000		5			D	k	d	H							
6	'L1/6'	369,417	264,000	331,354	200,000		6			12000	10	350	2300							
7	'L1/7'	369,417	264,000	331,354	200,000		7			s1	s2	s3	s4							
8	'L1/8'	369,417	264,000	331,354	200,000		8			0,01	0,01	0,01	0,01							
9	'L1/9'	369,417	264,000	331,354	200,000		9													
10	'L1/10'	369,417	264,000	331,354	200,000		10													

Рис. 2. Таблица конструктивных параметров

Изменение представленных, и ряда других параметров, позволяет пользователю в кратчайшие сроки произвести перестроение модели в автоматическом режиме.

Изменение параметров модели осуществляется с помощью таблицы конструктивных параметров, которая представлена в виде таблицы Excel (рис. 2).

После изменения необходимых параметров, происходит их автоматическое считывание и перестроение модели.

Разработка параметрической модели является важным этапом рационализации ФОС. Так, параметрическая модель позволяет автоматически сформировать исходные данные для дальнейших расчетов в виде координат точек регулировки. Применение параметрических моделей позволяет, в совокупности со вспомогательной программой оценки среднеквадратического отклонения (СКО), получить и проанализировать в кратчайшие сроки большое количество вари-

антов, проверить те или иные конструктивные решения, оценить вклад в общее СКО этапа фасетирования. Это поможет существенно сократить продолжительность процесса поиска рациональной конструкции ФОС, а также сократить количество ошибок, возникающих в процессе построения моделей и переноса данных.

На данном этапе, модель позволяет получить только модель фронтальной сети ФОС, однако, при ее развитии возможно не только параметрическое построение модели ФОС в целом, но и частичное формирование конструкторской документации, что поможет сократить процесс разработки изделия и избежать возможных ошибок, возникающих при оформлении чертежей.

Таким образом, полученная модель, в совокупности с таблицами конструктивных параметров позволяет производить автоматические построения модели ФОС, а также оперативно вносить в них изменения.

**Библиографические ссылки**

1. Pellegrino S. Large retractable appendages in spacecraft. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 1995. № 32. P. 1006–1014.
2. Гряник М. В. Развертываемые зеркальные антенны зонтичного типа. М. : Радио и связь, 1987. 72 с.
3. Баничук Н. В., Карпов Н.И. Механика больших космических конструкций. 1977. 302 с.
4. Mikulas M. M., Thomson M. State of the art and technology needs for large space structures, vol.1: New and Projected Aeronautical and Space Systems, Design Concepts, and Loads of Flight-Vehicle Materials, Structures, and Dynamics – Assessment and Future Directions. ASME, NewYork,1994, ch. 3, P.173–238.
5. Tibert G. Deployable Tensegrity Structures for Space Applications: Doctoral Thesis. Stockholm, 2002. 244 p.

**References**

1. Pellegrino, S. Large retractable appendages in spacecraft. *Journal of Spacecraft and Rockets* 32, 6 (1995), P. 1006–1014.
2. Gryanyk M.V. Deployable mirror antennas of the umbrella type. M. : Radio and communication, 1987. 72 p.
3. Banichuk N. V., Karpov N. I. Mechanics of large space structures. 1977. 302 p.
4. Mikulas M. M., Thomson M. State of the art and technology needs for large space structures, vol. 1: New and Projected Aeronautical and Space Systems, Design Concepts, and Loads of Flight-Vehicle Materials, Structures, and Dynamics – Assessment and Future Directions. ASME, NewYork,1994, ch. 3, P.173–238.
5. Tibert G. Deployable Tensegrity Structures for Space Applications: Doctoral Thesis. Stockholm, 2002. 244 p.

© Шевчугов В. О., Шальков В. В., 2018

УДК 629.78.064.56

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОГО ОТКЛОНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ РЕФЛЕКТОРА ОТ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ПАРАБОЛОИДА НА ЭТАПЕ ФАЦЕТИРОВАНИЯ**

В. О. Шевчугов, А. С. Евдокимов

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: vshevchugov@mail.ru

*Представлена программа определения среднеквадратического отклонения рефлектора от теоретического параболоида на этапе факетирования. Рассматриваются возможности и результаты расчета программы.*

*Ключевые слова: среднеквадратическое отклонение поверхности, формообразующая структура, рефлектор, теоретический параболоид.*

**DEVELOPMENT OF A PROGRAM FOR ESTIMATION THE ROOT-MEAN-SQUARE DEVIATION OF REFLECTOR SURFACE FROM THE THEORETICAL PARABOLOID AT THE STAGE OF FACETING**

V. O. Shevchugov, A. S. Evdokimov

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: vshevchugov@mail.ru

*The article presents a program for determining the root-mean-square deviation from the theoretical paraboloid at the stage of faceting. The article presents the possibilities and calculation results of the program.*

*Keywords: root-mean-square deviation, shape-generating structure, reflector, theoretical paraboloid.*

Снижение массы космического аппарата (КА) всегда было актуальной задачей [1]. В настоящее время, существует тенденция применения на КА крупногабаритных трансформируемых сетчатых рефлекторов, которые позволяют создавать легкие конструкции большого диаметра с высокой степенью трансформации. Являясь сложной трансформируемой конструкцией, такие крупногабаритные рефлекторы требуют детальной проработки достаточно большого количества вариантов, в целях поиска наиболее рациональной конструкции рефлектора [2].

Одной из конструктивных частей сетчатого рефлектора является формообразующая структура. Формообразующая структура рефлектора состоит из 3 составных частей:

- фронтальная сеть;
- тыльная сеть;
- оттяжки;

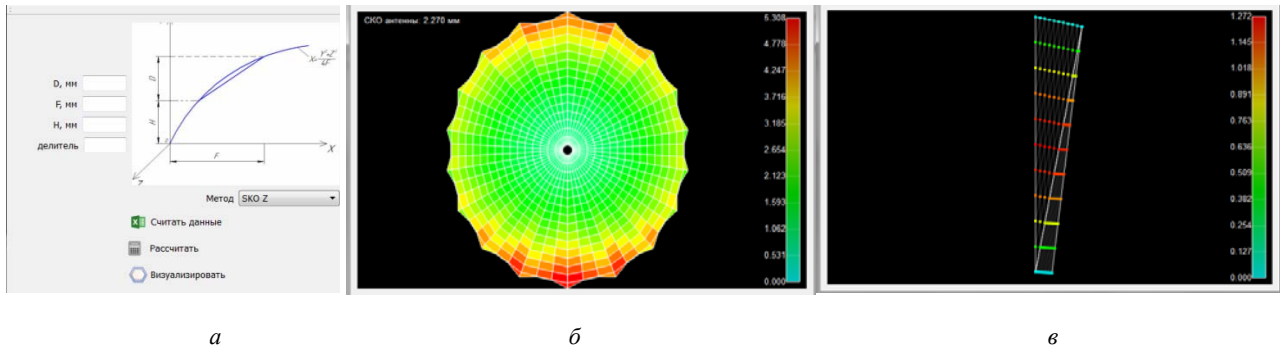
По большому счету, конструкция тыльной сети и системы оттяжек определяется конфигурацией фронтальной сети, поэтому при поиске рациональной конструкции ФОС достаточно определить рациональную конструкцию фронтальной сети.

В настоящее время, существуют множество программ, позволяющих произвести расчет конструкции, и получить деформированное состояние при различных видах нагрузений [3; 4]. Однако такие программы требуют от пользователя владения определенными

навыками, требуют построения достаточно детальных моделей, а учитывая процесс передачи и изменения данных под эти программы, осуществление даже приблизительного расчета одного варианта конструкции может занимать значительное время.

Одним из основных параметров, которым руководствуются при разработке рефлекторов данного типа, является точность отражающей поверхности, которая в свою очередь определяется среднеквадратическим отклонением (СКО) поверхности [5]. Существует ряд аналитических формул, позволяющих дать приблизительную оценку СКО поверхности, в зависимости от среднего размера факет [5]. Однако, на практике применение данных формул неудобно. Для возможности оценки СКО поверхности от теоретического параболоида на этапе факетирования, была разработана программа, интерфейс которой представлен на рисунке.

После запуска программы открывается основное окно (рисунок, а), запрашивающее от пользователя ввод параметров теоретического параболоида, а также параметра «делитель». Параметр «делитель» определяет точность проводимых расчетов. Чем больше «делитель» – тем больше точек будет учитываться внутри каждой факеты при проведении расчетов. После определения необходимых параметров необходимо обработать данные, которые должны представлять собой Excel-файл с координатами точек регулировки рефлектора.



Интерфейс программы

Затем программа произведет расчеты, результаты которых можно визуализировать (рисунок, б). В данном окне, будет представлено как СКО рефлектора, так и СКО каждой facets в отдельности. Зная СКО facets, можно принять решение по изменению ее формы и размеров, изменить модель и произвести повторные расчеты. Также существует возможность отображения отклонений точек от теоретического параболоида в заданной области (рисунок, в),

В основном окне предоставляется возможность выбора метода расчета. Метод расчета определяет способ определения отклонения точки от теоретического параболоида. При использовании первого метода отклонение определяется путем вычисления расстояния от текущей точки до теоретического параболоида вдоль ось  $OX$  (ось  $OX$  на рисунке, а). При использовании второго метода расчета, отклонение определяется как расстояние от текущей точки до теоретического параболоида вдоль оси, перпендикулярной плоскости текущей facets. После расчета отклонений, для каждой facets в отдельности и рефлектора в целом проводится вычисление СКО по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i^2},$$

где  $r_i$  – отклонение  $i$ -ой точки, от поверхности теоретического параболоида;  $N$  – количество точек.

Таким образом, представленная программа позволяет на ранних этапах проектирования получить наглядное представление о качестве отражающей поверхности для полученной модели. Программа не требует от пользователя специальных навыков. Для проведения расчетов достаточно построения только фронтальной сети формообразующей структуры. Применение данной программы может существенно сократить процесс поиска по рациональному построению фронтальной сети формообразующей структуры рефлектора.

### Библиографические ссылки

1. Tibert G. Deployable Tensegrity Structures for Space Applications: Doctoral Thesis. Stockholm, 2002. 244 p.
2. Гряник М. В. Развертываемые зеркальные антенны зонтичного типа. М. : Радио и связь, 1987. 72 с.
3. Баничук Н. В., Карпов Н. И. Механика больших космических конструкций. 1977. 302 с.
4. Mikulas M. M., Thomson M. State of the art and technology needs for large space structures. Vol. 1. New and Projected Aeronautical and Space Systems, Design Concepts, and Loads of Flight-Vehicle Materials, Structures, and Dynamics – Assessment and Future Directions. ASME, NewYork, 1994, Ch. 3. P. 173–238.
5. Pellegrino S. Large retractable appendages in spacecraft // Journal of Spacecraft and Rockets. 1995. № 32. P. 1006–1014.

### References

1. Tibert G. Deployable Tensegrity Structures for Space Applications: Doctoral Thesis. Stockholm, 2002. 244 p.
2. Gryanyk M. V. Deployable mirror antennas of the umbrella type. M. : Radio and communication, 1987. 72 p.
3. Banichuk N. V., Karpov N. I. Mechanics of large space structures. 1977. 302 p.
4. Mikulas M. M., Thomson M. State of the art and technology needs for large space structures, Vol. 1: New and Projected Aeronautical and Space Systems, Design Concepts, and Loads of Flight-Vehicle Materials, Structures, and Dynamics – Assessment and Future Directions. ASME, NewYork, 1994, ch. 3, P. 173–238.
5. Pellegrino, S. Large retractable appendages in spacecraft. Journal of Spacecraft and Rockets, 1995, 32, 6, P. 1006–1014.

© Шевчугов В. О., Евдокимов А. С., 2018

УДК 621.792.053

## ПРЕИМУЩЕСТВА ТОКОПРОВОДЯЩИХ КЛЕЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ В СРАВНЕНИИ С ТОКОПРОВОДЯЩИМИ ПОКРЫТИЯМИ

В. В. Свередюк<sup>1,2\*</sup>, В. Д. Ворончихин<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>АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29

\*E-mail: svereduk91@gmail.com

*Представлены преимущества клеевых композиций, содержащие в качестве токопроводящих наполнителей углеродные материалы различной морфологической структуры, в сравнении с токопроводящими композиционными покрытиями.*

*Ключевые слова: токопроводящий клей, токопроводящее покрытие, углеродные наполнители.*

## THE ADVANTAGES OF THE CONDUCTIVE ADHESIVE COMPOSITIONS IN COMPARISON WITH A CONDUCTIVE COATING

V. V. Sveredyuk<sup>1,2\*</sup>, V. D. Voronchikhin<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>JSC "Krasnoyarsk Machine Building Plant"  
29, Krasnoyarsky Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russia Federation

\*E-mail: svereduk91@gmail.com

*The paper presents the advantages of adhesive compositions containing as conductive fillers carbon materials of different morphological structure in comparison with conductive composite coatings.*

*Keywords: conductive adhesive, conductive coating, carbon fillers.*

В настоящее время для монтажа деталей электронных приборов, снятия статического электричества и восстановления токопроводящего слоя в авиационной и ракетостроении все большее применение находят токопроводящие клеи и токопроводящие композиционные покрытия [1].

Токопроводящие клеи изготавливают на основе эпоксидных смол, обеспечивающих относительно высокую прочность склеивания металлов и композиционных материалов. Отвердителями чаще всего служат амины, такие как полиэтиленполиамин, диэтилентриамин и другие. Клеи, содержащие в себе амины, могут отверждаться при невысокой и даже комнатной температуре, что является большим преимуществом при изготовлении деталей электронных приборов, которые практически не выдерживают нагрева. Нелетучими разбавителями часто выступают глицидиловые эфиры, такие как бутилглицидиловый, глицидиловые эфиры диэтиленгликоля смола ДЭГ-1), они учувствуют в реакции сшивания смолы и значительно повышают прочность клеевого соединения. В качестве наполнителя токопроводящих клеев наибольшее распространение получили тонкодисперсные порошки металлов, карбонильный никель, углеродные материалы [2; 3]. Полученные клеевые соединения выдерживают большое количество циклов вибрации и теплового старения при повышенных температурах

в течение большого периода времени. При этом их сопротивление возрастает всего 2–3 раза [4].

Еще одним важным преимуществом использования токопроводящих клеев является восстановление токопроводящего слоя полимерных материалов, таких как стеклопластики, покрытые углеволокном, где толщина клеевого соединения может достигать 2–5 мм. В данном случае необходимо клеевое соединение выдерживающее воздействие высоких температур, не теряя при этом электропроводности и прочности. Наибольшее применение находят клеевые композиции, содержащие в качестве основы полиуретаны.

Стабильность сопротивления клеевых соединений в процессе старения зависит как от природы склеиваемого металла, так и от природы склеиваемого металла. Необходимым условием при склеивании благородных металлов, таких как медь, алюминий, никель является их защита от процесса электрохимической коррозии, обусловленной разницей электродных потенциалов клея и склеиваемых поверхностей. Следовательно, сопротивление клеевых соединений тем стабильнее, чем меньше влаго- и воздухопроницаемость клея, чем выше его адгезия и меньше разница между электродными потенциалами клея и склеиваемых материалов [4].

В качестве пленкообразующих в токопроводящих покрытиях используют эпоксидные, фенолформаль-

дегидные, кремнийорганические полимеры, полиэфир, полиуретаны и другие [1]. В качестве наполнителей токопроводящих покрытий применяются те же, что и для клеев [5; 6]. Отличием является, то что в покрытиях необходимы более дисперсные наполнители, чем для клеев. Для получения покрытий с высокой проводимостью применяют мелкодисперсное серебро с частицами чешуйчатой или хлопьевидной формы. Благодаря тиксотропным свойствам эмалей, содержащих чешуйчатые частицы, снижается седиментация частиц в пленке, что обеспечивает увеличение поверхностной проводимости.

Как и в случае клеев, формирование электрических контактов между частицами наполнителя зависит от степени отверждения связующего. Токопроводящие краски обладают низкой вязкостью, благодаря чему ориентация частиц в цепочки происходит в них быстрее, чем в клеях.

Степень разбавления токопроводящих красок практически не влияет удельное сопротивление покрытия, но с увеличением разбавления для достижения требуемой толщины и заданного поверхностного сопротивления покрытия требуется нанести большое количество слоев. Главным недостатком токопроводящих покрытий, является применение металлических наполнителей из-за их быстрой седиментации, приводящей к расслоению покрытий.

#### Библиографические ссылки

1. Гуль В. Е., Шенфиль Л. З. Электропроводящие полимерные композиции. М. : Химия, 1984. 240 с.
2. Шарова И. А., Лукина Н. Ф. Свойства и назначение авиационных клеев // Новости материаловедения. Наука и техника. 2016. № 2 (20). С. 41–49.
3. Шестаков А. С., Привалов В. И. Токопроводящие клеи. Механизмы проводимости // Информационно-технологический вестник. 2016. № 4 (10). С. 90–96.

4. 50 лет лаборатории «Клеи и клеевые препреги» / А. П. Петрова, Н. Ф. Лукина, О. А. Стародубцева и др. М. : ВИАМ, 2008. 26 с.

5. Петрова А. П. Клеящие материалы. Справочник. М. : Редакция журнала «Каучук и резина», 2002. 196 с.

6. Клеящие материалы. Герметики : справочник / А. П. Петрова, А. А. Донской, А. Е. Чалых и др. СПб. : Професионал, 2008. 589 с.

#### Reference

1. Gul' V. E., Shenfil' L. Z. EHlektroprovodyashchie polimernye kompozicii [Electrically conductive polymer compositions]. M. : Himiya, 1984. 240 p.

2. Sharova I. A., Lukina N. F. Svoystva i naznachenie aviacionnyh kleev [Properties and purpose of aviation adhesives] // Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika. 2016. № 2 (20). P. 41–49. (In Russ.)

3. Shestakov A. S., Privalov V. I. Tokoprovodyashchie klei. Mekhanizmy provodimosti [Conductive adhesives. Conductivity mechanisms] // Informacionno-tekhnologicheskij vestnik. 2016. № 4 (10). P. 90–96. (In Russ.)

4. 50 let laboratorii “Klei i kleevye prepregi” [50 years of the laboratory for “Adhesives and adhesive prepregs”] / A. P. Petrova, N. F. Lukina, O. A. Starodubceva et al. M. : VIAM, 2008. 26 s.

5. Petrova A. P. Kleyashchie materialy. Spravochnik [Adhesive materials. Handbook]. M. : ZAO “Redakciya zhurnala “Kauchuk i rezina”, 2002. 196 p.

6. Kleyashchie materialy. Germetiki. Spravochnik [Adhesive materials. Sealants. Reference book] / A. P. Petrova, A. A. Donskoj, A. E. Chalyh et al. SPb. : Professional, 2008. 589 p.





**Секция**

**«ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ПРОИЗВОДСТВО  
И ИСПЫТАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ»**

УДК 629.7.036.54.063.6:621.565.93/.94

## ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЯ В НЕПОДВИЖНОМ МЕЖЛОПАТОЧНОМ КАНАЛЕ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

И. В. Асташов, 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 метод численного моделирования течения в межлопаточном неподвижном канале центробежного насоса энергетических установок на основе интегрального соотношения пространственного пограничного слоя.*

*Ключевые слова: энергетические установки, центробежный насос, численное моделирование, интегральное соотношение, пространственный пограничный слой.*

## NUMERICAL SIMULATION OF THE FLOW IN THE FIXED INTER-BLADE CENTRIFUGAL PUMPS CHANNEL POWER UNITS SPACECRAFT

I. V. Astashov, D. A. Zhuikov

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

*The paper deals with the method of numerical simulation of inter-blade fixed channel centrifugal pump power units based on integrated equations of the spatial boundary layer.*

*Keywords: power units, centrifugal pump, numerical simulation, integrated equations, spatial boundary layer.*

Разработка современных энергетически эффективных и высоко надежных летательных аппаратов нового поколения для ракетно-космической отрасли является важной научно-технической задачей.

Турбонасосные агрегаты (ТНА) современных энергетических установок летательного аппарата являются высоконагруженными энергетическими узлами, основной задачей которых является стабильная подача компонентов топлива в камеру сгорания на всех режимах работы двигателя. Качественное проектирование и оптимизация агрегата возможно при наличии современных математических моделей всех элементов агрегата, позволяющих определить поля скоростей, давлений и температур в проточных трактах насосов и турбин ТНА.

Ключевой задачей построения математической модели течения рабочей жидкости в центробежном насосе (ЦН) является задача о течении в рабочем колесе насоса как основного элемента создания необходимого напора с заданным расходом представляющего собой криволинейный вращающийся плоский канал.

На первом этапе рассмотрено течение в криволинейном неподвижном межлопаточном канале, где течение разбивается на два участка: течения в ядре потока вдоль линии тока конгруэнтной цилиндрической лопатки и в пограничном слое. Решение задачи течения в ядре потока является определяющим для дальнейшего решения течения в пограничном слое, в котором будут найдены напряжения трения, кото-

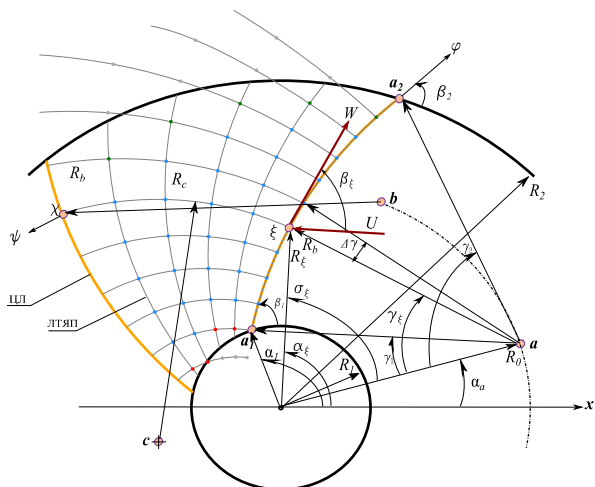
рые в свою очередь учитываются при решении течения в ядре потока по определению скоростей и давления вязкой жидкости.

Для определения гидравлических потерь, а именно напряжений трения на поверхности канала применяется система дифференциальных уравнений пространственного пограничного слоя (ППС) в интегральных величинах на неподвижном основании [1–3] в естественной системе координат.

Определение поля скоростей основано на струйной теории лопаточных машин [3], в результате чего определяются значения всех скоростей в каждой точке координатной сетки (см. рисунок). Относительная скорость  $W$  – это продольная скорость ядра потока необходимая для расчета параметров ППС. Кроме того, для численного решения системы дифференциальных уравнений ППС необходимо определить дифференциалы, входящие в эти уравнения. Для этого рассматривается баланс сил, действующий на элементарный объем жидкости в межлопаточном канале.

Решение течения в ППС ведется разностно-характеристическим методом [2] вдоль известной линии тока. Течение в криволинейном межлопаточном канале с применением градиентной функцией изменения продольной скорости в ППС характеризуется относительными характерными толщинами (ОХТ) – константами [4], где напряжения трения на поверхности канала в продольном направлении определяются в зависимости от выбранного закона профиля скорости в пограничном слое [1].

На основе этой численной модели был разработан программный модуль для автоматизированной системы гидродинамического расчета [5], где проведены предварительные численные исследования.



Расчетная схема течения в ядре потока на поверхности канала:

ЦЛ – цилиндрическая лопатка постоянной высоты;  
ЛТЯП – линия тока ядра потока конгруэнтная ЦЛ;  
 $x, y$  – ортогональная,  $R, \alpha$  – цилиндрическая,  
 $\varphi, \psi$  – естественная системы координат;  
 $W, U$  – относительная и окружная скорость ядра потока соответственно

Таким образом, рассмотренная численная модель течения жидкости в неподвижном межлопаточном канале центробежного насоса и разработанная на ее основе методика расчета параметров потока позволяет определить гидравлические потери на трение и корректно установить поле скоростей и давлений по радиусу диска, а, следовательно, определить действительный напор рабочего колеса центробежного насоса. Также программный модуль можно использовать в компьютерных моделях, имитирующих работу энергетических установок в целом на различных, в том числе переходных режимах для выполнения глубокой оптимизации и определения масс-энергетических характеристик агрегата.

#### Библиографические ссылки

1. Вращение жидкости над неподвижным основанием по закону твердого тела / А. А. Кишкин, А. А. Зуев, Е. В. Черненко, П. Н. Смирнов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Сер. Технические науки. 2011. № 1. С. 126–131.

2. К расчету пространственного пограничного слоя при развороте потока в круговом секторе / Д. В. Черненко, Е. В. Черненко, А. А. Зуев, Ю. Н. Шевченко // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Сер. Технические науки. 2009. № 1. С. 15–18.

3. Овсянников Б. В., Боровский Б. И. Теория и расчет агрегатов питания ЖРД. М.: Машиностроение, 1986.

4. Степанов Г. Ю. Гидродинамика решеток турбомашин. М.: Физматгиз, 1962.

5. Автоматизированная система термодинамического расчета и оптимизации параметров элементов турбомашин (ASTROPET): свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2013610054 от 09.01.2013 / А. А. Кишкин, Е. В. Черненко, Д. А. Жуйков, А. В. Делков, Д. В. Черненко; Заявка № 2012619448 от 02.11.2012.

#### References

1. Kishkin A. A., Zuev A. A., Chernenko E. V., Smirnov P. N. *Vrashcheniye zhidkosti nad nepodvizhnym osnovaniyem po zakonu tverdogo tela* [Liquid rotation over the motionless basis under the law of a solid body]: University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series, 2011, Vol. 1, P. 126–131. (In Russ.)

2. Chernenko D. V., Chernenko E. V., Zuyev A. A., Shevchenko Y. N. *K raschetu prostranstvennogo pogranichnogo sloya pri razvorote potoka v krugovom sektore* [Calculation of the spatial boundary layer flow at the turn in the circular sector: Proceedings of the higher educational institutions]. North-Caucasian region. Series: Engineering, 2009, № 1, P. 15–18. (In Russ.)

3. Ovsyannikov B. V., Borovsky B. I. *Teoriya i raschet agregatov pitaniya ZHRD* [Theory and calculation power units LRE]. M.: Engineering, 1986. 376 p.

4. Stepanov G. Y. *Gidrodinamika reshetok turbomashin* [Hydrodynamics of lattices of turbomachinery]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1962. 512 p.

5. Kishkin A. A., Chernenko E. V., Zhuykov D. A., Delkov A. V., Chernenko D. V. *Avtomatizirovannaya sistema termogidrogazodinamicheskogo rascheta i optimizatsii parametrov elementov turbomashin (ASTROPET) Svidetel'stvo gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2013610054* [Automated system of thermo hydro gas-dynamic calculation and optimization of parameters of turbomachinery elements (ASTROPET)]: Certificate of state registration of the computer program No. 2013610054]. SibGAU, 2013. (In Russ.)

© Асташов И. В., Жуйков Д. А., 2018

УДК.62-1/9

## ВОЗМОЖНОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ГАЗОНАСЫЩЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ РАКЕТНОГО ТОПЛИВА В ПРОЦЕССЕ ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А. М. Бегишев, Г. А. Яценко

Производство «Испытательно-заправочный комплекс» АО «Красмаш»  
Российская Федерация, 662991, г. Железногорск Красноярского края, п. Подгорный, ул. Заводская, 1  
E-mail: alex-beg95@mail.ru

*Авторы рассматривают особенности процесса газонасыщения КЖРТ, а также исследуют возможности оптимизации конструкции системы газонасыщения, с помощью установки струйного насоса на огневом испытательном стенде производства «ИЗК» АО «Красмаш».*

*Ключевые слова: испытание ЖРД, газонасыщение КЖРТ, струйный насос.*

## OPPORTUNITIES FOR OPTIMIZING THE GAS CONSUMPTION OF ROCKET FUEL COMPONENTS IN THE PROCESS OF FIRE LASER TESTS

A. M. Begishev, G. A. Yatsenko

Production „Testing and refueling complex“ of JSC „Krasmach“  
1, Zavodskaya Str., Podgorny, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Region, 662991, Russian Federation  
E-mail: alex-beg95@mail.ru

*The authors consider the features of the process of gas saturation of components of liquid rocket fuel, and also explores the possibilities of optimizing the design of the gas saturation system, by installing a jet pump, at the fire test stand of the production “test and refueling complex” of JSC “Krasmach”.*

*Keywords: LPRE test, gas saturation of liquid rocket fuel components, jet pump.*

Испытаниям жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) присущи определенные требования, связанные как со спецификой процессов, происходящих в этих двигателях, так и с условиями их эксплуатации. Экспериментальная отработка и подтверждение надежного функционирования ЖРД на огневых испытательных стендах, включают в себя ряд особенностей, связанных с наличием специальной испытательной техники, квалифицированных испытателей и инженерно-руководительного состава, автоматизированной регистрации параметров испытания, а также с методологией обеспечения имитации натуральных условий на всех этапах жизненного цикла изделия.

В процессе доводки и наземной обработки ЖРД необходимо проверять надежность работы двигателей в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным. Для этой цели стенды для испытания ЖРД оборудуются системами имитации высотных и температурных условий, объектных условий и другими системами, имитирующими влияние на двигатель различных факторов [1].

В жидкостной ракетно-двигательной установке (ЖРДУ) топливо в той или иной мере может растворять газ, генерируемый для наддува топливных баков ракеты.

Растворение в топливе газа оказывает существенное влияние на давление в топливных баках, в случае эксплуатации долгохраняемых ракет (например, в цикле «зима-лето»), а также на кавитационные

характеристики магистралей питания и насосов турбонасосного агрегата (ТНА) ЖРД. Содержание газа в компоненте зависит как от типа компонента, так и от давления, температуры и состава газовой фазы [2]. Газовая фаза, находящаяся в топливе, попадает в кавитационные каверны и приводит к увеличению критического давления в проточной части насоса в зоне кавитации по сравнению с давлением насыщенных паров на входе в насос, что в свою очередь повышает риск срыва устойчивости работы насоса ТНА в результате развития кавитации. Таким образом, для нормальных условий функционирования ЖРДУ предельные концентрации растворенных газов в топливе строго регламентируются.

Растворимость газа в жидком топливе подчиняется закону Генри, из которого следует, что объемная концентрация растворенного газа прямо пропорциональна его парциальному давлению над жидкостью [1]:

$$c = K \cdot p,$$

где  $c$  – объемная концентрация газа в жидкости;  $p$  – давление газа;  $K$  – коэффициент растворимости Генри, при низких давлениях является функцией температуры жидкости.

Для проверки влияния насыщения (абсорбции) топлив газами на эксплуатационные характеристики ракетных систем стендовые испытания проводятся с газонасыщением компонентов жидкого ракетного топлива (КЖРТ) [3].

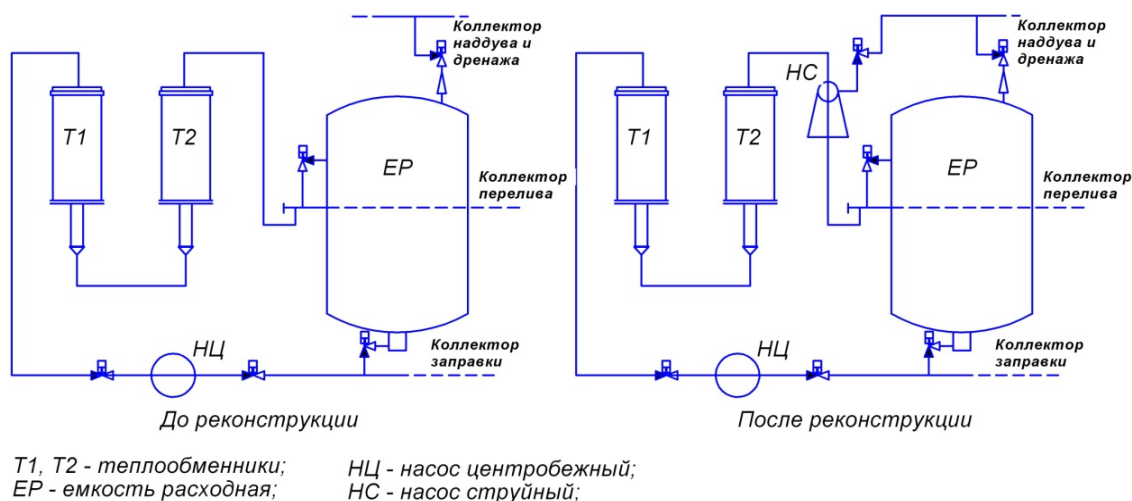


Схема газонасыщения КЖРТ

На огневом испытательном стенде производства «Испытательно-заправочный комплекс» (ИЗК) АО «Красмаш» – сооружении 1, корректировка степени газонасыщения производится с помощью системы термостатирования методом перемешивания. Способ заключается в том, что в газовой подушке расходной емкости с КЖРТ, в зависимости от средней температуры компонента топлива, создается избыточное давление, необходимое для получения газосодержания, соответствующего требованиям конструкторской документации (КД).

Подача азота прекращается и путем прокачки КЖРТ с помощью центробежного насоса по замкнутому контуру системы термостатирования (без подачи термоагента), происходит интенсивное перемешивание компонента, до тех пор, пока не установится равновесное состояние КЖРТ. Равновесие между фазами определяется термодинамическими свойствами жидкой и газовой фазами и зависит от состава фаз, температуры и давления. В связи с этим по всей продолжительности производственного процесса производится контроль избыточного давления газа в подушке и средней температуры компонента в расходных емкостях. При изменении температуры компонента в процессе газонасыщения производится соответствующее изменение давления газовой подушки для получения требуемой в КД степени газонасыщения. Насыщение ведется в течение определенного времени, после чего в газовой подушке создается давление выше того, при котором велось насыщение, чтоб исключить разнасыщение (десорбцию).

Недостаток данного метода обуславливается малой зоной соприкосновения газообразной и жидкой фаз, а также длительным циклом прохождения компонентом контура системы термостатирования, что в свою очередь сказывается на эффективности и длительности процесса насыщения компонента газом.

Скорость протекания абсорбционных процессов определяется скоростью процесса массообмена, между газовой и жидкой фазами [4]. Одним из основных факторов увеличения степени отклонения системы от равновесного состояния являются тип способа сопри-

косновения и характер взаимного движения фаз. Таким образом, один из путей оптимизации операции газонасыщения может быть установка в систему термостатирования дополнительного абсорбционного аппарата. В качестве такого аппарата может выступить струйный насос (эжектор) с КЖРТ в качестве эжектируемой среды, установленный после центробежного насоса и термостата. Данное техническое решение, представленное на рисунке, должно быть реализовано в результате реконструкции технологических систем на сооружении 1 производства «ИЗК» АО «Красмаш». Компонент в процессе циркулирования по контуру системы, поступает в рабочее сопло эжектора, тем самым ускоряясь, создаёт в камере эжектора зону пониженного давления. Эжектирующая среда, в качестве которой выступает газообразный азот, подводится из полости газовой подушки расходной емкости, и всасываясь в камеру эжектора, перемешивается с потоком рабочей среды, тем самым частично растворяясь в топливе. Для повышения работоспособности струйного насоса в качестве абсорбционного аппарата, также возможна установка на выходе из эжектора специального завихрителя, цель которого, за счет возникновения турбулентности потока, создать интенсивное перемешивание рабочей среды. Таким образом, установка струйного насоса позволит значительно повысить эффективность газонасыщения, расширив зону соприкосновения газообразной и жидкой фаз, но в то же время, значительно не усложнит существующую конструкцию системы газонасыщения компонента испытательного стенда.

#### Библиографические ссылки

1. 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.
2. Рамм В. М. Абсорбция газов. М. : Химия, 1976. 656 с.
3. Методология экспериментальной отработки ЖРД и ДУ, основы проведения испытаний и устройства испытательных стендов : монография / А. Г. Га-

леев, В. Н. Иванов, А. В. Катенин и др. Киров : МЦНИП, 2015. 436 с.

4. Венгерский Э. В. Гидродинамика двухфазных потоков в системах питания энергетических установок. М. : Машиностроение, 1982. 128 с.

#### References

1. *Ispytaniye zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Testing of liquid rocket engines] / A. E. Zhukovsky, V. S. Kondusev, V. Ya. Levin et al. ; pod. red. V. Z. Levina. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 199 p.

2. Ramm V. M. *Absorbtsiya gazov* [Absorption of gases]. Moscow, Khimiya Publ., 1976. 656 p.

3. *Metodologiya eksperimental'noy otrabotki ZHRD i DU, osnovy provedeniya ispytaniy i ustroystva ispytatel'nykh stendov: monografiya* [Methodology of experimental development of LPRE and DU, the basis of testing and the installation of test benches] / A. G. Galeev, V. N. Ivanov, A. V. Katenin et al. Kirov : MCNIP Publ., 2015. 436 p.

4. Vengersky E. V. *Gidrodinamika dvukhfaznykh potokov v sistemakh pitaniya energeticheskikh ustanovok*. [Hydrodynamics of two-phase flows in power system of power plants]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 128 p.

© Бегишев А. М., Яценко Г. А., 2018

УДК 621.454.2

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЯГОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА НА ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДАХ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А. В. Веселов

<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: Veselov.andrey2009@yandex.ru

*Предлагается совершенствование методики градуировки тягоизмерительного устройства на испытательных стендах ЖРД. Изучены существующие методики, проанализированы недостатки и предложена возможность введения тензометрических датчиков силы и гидравлического привода.*

*Ключевые слова: испытательные стенды ЖРД, тягоизмерительное устройство, градуировка.*

## MODERNIZATION THE SMILING THE DEVICE ON THE TEST BENCH LRE

A. V. Veselov<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 „Krasnoyarsk Machine Building Plant“  
29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
E-mail: Veselov.andrey2009@yandex.ru

*The article proposes to improve the method of calibration of the load-measuring device on the test benches of the LRE. Studied existing techniques, analyzed the deficiencies and proposed the possibility of introducing a strain-gauge force sensors and the hydraulic actuator.*

*Keywords: LRE test stands, load-measuring device, calibration*

Важнейшей задачей при испытании изделий ракетно-космической техники является обеспечение качества, надежности функционирования и получение точной информации о состоянии испытываемого изделия.

Жидкостный ракетный двигатель представляет собой изделие, работающее в условиях больших давлений, температур, инерционных и динамических нагрузок [1]. Одним из важнейших параметров жидкостного ракетного двигателя является тяга, развиваемая двигателем. Тяга ЖРД – это параметр нулевой категории, и погрешность при ее определении не должна превышать 0,5 %.

Испытания ракетных двигателей осуществляются на специально оснащенных испытательных комплексах. Испытательные комплексы состоят из стендов для установки двигателей; наблюдательных бункеров, из которых осуществляется управление процессом испытаний; емкостей для хранения компонентов топлива; химических, измерительных, вычислительных и других лабораторий; производственных и приборных мастерских, монтажных помещений для проведения работ с двигателем до и после испытания [2].

Стенд эксплуатировался длительное время и претерпел ряд модернизаций. Однако конструкция тяго-

измерительного устройства сохранилась в оригинальном варианте изготовления и к настоящему времени морально устарела. Тягоизмерительное устройство (см. рисунок) входит в систему измерений параметров двигателя при испытаниях и состоит из преобразователя тяги в электрический сигнал, передающего его на аналого-цифровой преобразователь. Преобразователь тяги представляет собой упругий элемент, преобразующий перемещения в электрический сигнал.

Основным недостатком существующей конструкции преобразователя тяги является трудоемкость процесса градуировки. При градуировке преобразователь тяги через систему рычагов нагружается съемным набором гирей значительной массы. В системе рычагов действуют значительные усилия, на поверхностях контакта рычагов (призмы и подушки) напряжения вызывают износ материала и изменение коэффициента преобразования усилий. Градуировка проводится непосредственно перед каждым испытанием ЖРД по нескольким повторяющимся циклам последовательного навешивания возрастающих и уменьшающих масс.

Установка и снятие гирей производится работниками вручную, что требует значительных физических усилий и затрат времени.

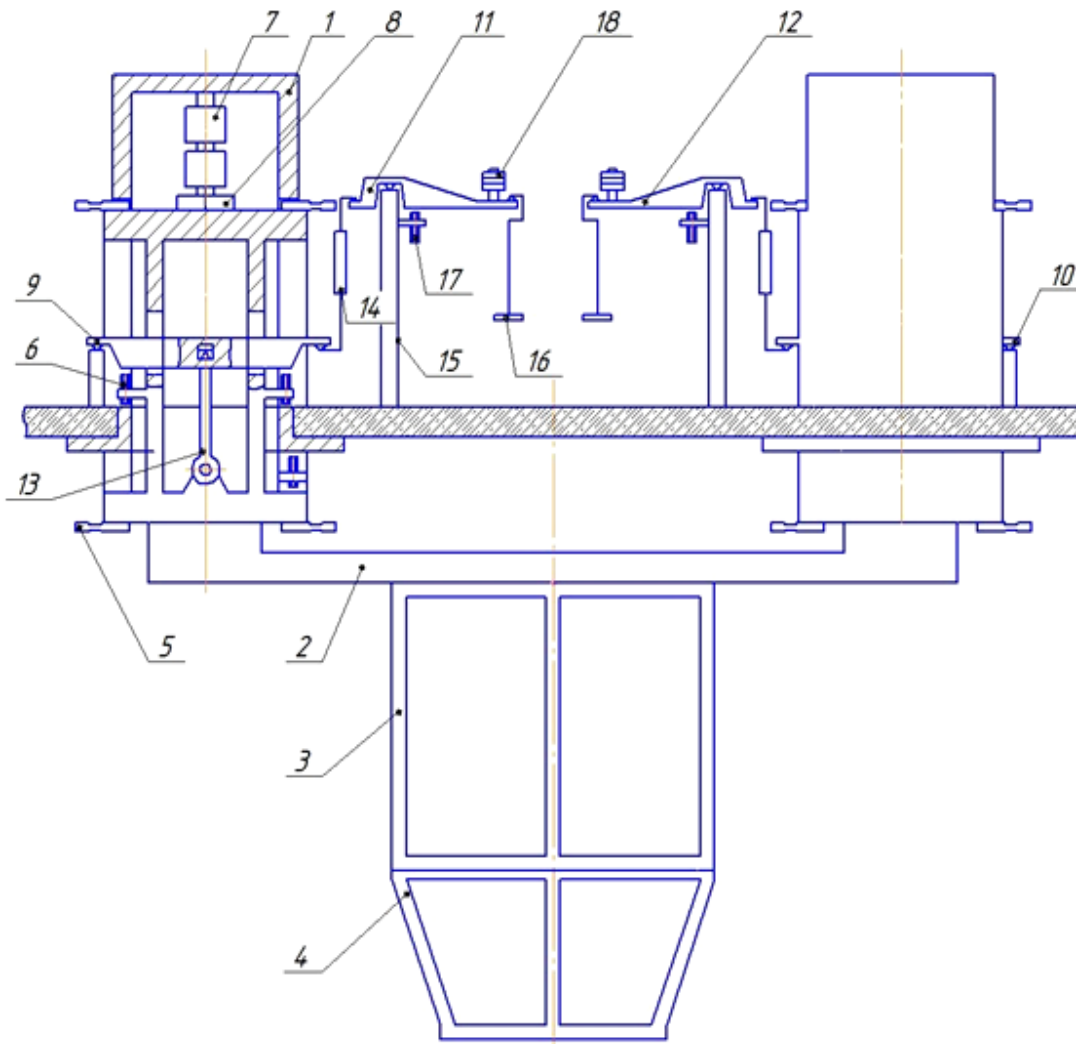


Схема тягоизмерительного устройства:

- 1 – стойка; 2 – рама; 3 – рама стендовая; 4 – рама переходная; 5 – пружина Ш-образная;  
 6 – винт стопорный; 7 – силоизмеритель; 8 – вкладыш регулировочный; 9 – рычаг А1;  
 10 – рычаг А2; 11 – рычаг Б1; 12 – рычаг Б2; 13 – тяга; 14 – тендер; 15 – стойка; 16 – подвеска;  
 17 – винт; 18 – груз балансировочный

Для облегчения, ускорения и повышения точности процесса градуировки тягоизмерительного устройства предлагается изменить методику градуировки нагружения гири и перейти на гидравлический привод с тензометрическими или пьезометрическими преобразователями.

В качестве тензоизмерительного преобразователя предлагается динамометр 3-го разряда (ДОС-3) на растяжение как эталон. Принцип действия динамометра состоит в том, что под действием приложенной нагрузки происходит деформация упругого элемента, на котором нанесен тензорезисторный мост. Деформация упругого элемента вызывает разбаланс тензорезисторного моста. Электрический сигнал разбаланса моста поступает во вторичный измерительный преобразователь для аналого-цифрового преобразования, обработки и индикации результатов измерений [3]. Динамометр 3-го класса с погрешностью 0,12 % обеспечит выполнение требований государственной пове-

рочной схемы по передаче единиц силы. В качестве гидропривода может использоваться гидропресс с ручным приводом на 2 тонны. Динамометр необходимо закрепить на рычагах поз. 11, 12. Гидропривод будет закреплен с одной стороны к динамометру, с другой стороны к полу. Усилие на рычаги будет путем нагружения через гидропривод, при этом необходимо контролировать показания динамометра.

При составлении протокола градуировки необходимо учитывать массу динамометра и системы нагружения.

Преимущества предложенной конструкции:

1. Уменьшит случайную составляющую погрешность.
2. Уменьшит вариацию (более стабильная градуировочная характеристика).
3. Сократит время проведения градуировки.
4. Значительно уменьшит трудоемкость процесса градуировки.



В дальнейшем в работе планируется разработка автономной системы градуирования с обратной связью. Это позволит производить градуировку дистанционно с высокой точностью.

#### Библиографические ссылки

1. Испытание и обеспечение надежности ракетных двигателей : 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.

2. Технология производства жидкостных ракетных двигателей : учебник / В. А. Моисеев, В. А. Тарасов, В. А. Колмыков, А. С. Филимонов ; под ред. В. А. Моисеева и В. А. Тарасова. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008, 381 с.

3. ГОСТ 9500–84. Динамометры образцовые переносные. Общие технические требования. М. : Стандартинформ, 1984. 7 с.

#### References

1. Ispytaniye i obespecheniye nadezhnosti raketnykh dvigateley [Testing and ensuring the reliability of rocket engines] : studies / A. I. Kolomentsev, M. V. Kraev, V. P. Nazarov, etc.; Sib. State. Aerocosmic. un-t ; Mosk. Aviation. un-t. Krasnoyarsk Publ., 2006. 336 p.

2. Tekhnologiya proizvodstva zhidkostnykh raketnykh dvigateley : uchebnik [Production technology of liquid rocket engines: the Textbook] / V. A. Moiseev, V. A. Tarasov, V. A. Kalmykov; A. S. Filimonov; ed. by V. A. Moiseev and V. A. Tarasov. Moscow, BMSTU Publ., 2008. 381 p.

3. GOST 9500–84. Dinamometry obraztsovyye perenosnyye. Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya [State Standard 9500-84. Dynamometers are model portable. General technical requirements]. Moscow, Standardinform Publ., 1984. 7 p.

© Веселов А. В., 2018

УДК 629.76

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ КРИОГЕННЫХ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РАЗГОННЫХ БЛОКОВ

А. А. Зуев, В. П. Назаров, В. О. Фальков

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: dla204@inbox.ru

*Проведены экспериментальные исследования и стендовые испытания криогенных жидкостных ракетных двигателей перспективных разгонных блоков. Проведена верификация предложенных конструктивных и схемных решений. Получены основные энергетические характеристики, осуществлена отработка рабочих процессов, обеспечивающих работоспособность двигателя.*

*Ключевые слова: криогенные ракетные двигатели, разгонные блоки, стендовые испытания.*

## EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS AND BENCH TESTS OF CRYOGENIC LIQUID ROCKET ENGINES ARE PROMISING UPPER STAGES

A. A. Zuev, V. P. Nazarov, V. O. Falkov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: dla204@inbox.ru

*Experimental studies and bench tests of cryogenic liquid-propellant rocket engines of advanced upper stages were carried out. Verification of the proposed design and circuit solutions is carried out. The main energy characteristics are obtained, working out of the working processes that ensure the efficiency of the engine is carried out.*

*Keywords: cryogenic rocket engines, upper stages, bench tests.*

В процессе реализации современных отечественных и международных космических программ многие космические аппараты выводятся на высокие околоземные орбиты или совершают полеты в дальнее космическое пространство по межпланетным траекториям. Для решения таких задач используются специальные транспортные средства, которые в различных литературных изданиях называют космическими буксирами, блоками выведения, разгонными блоками. В отраслевой научно-технической документации, в основном, используется термин «разгонные блоки» (РБ), который принят в данной работе.

Характерной особенностью разгонных блоков является их относительная универсальность и автономность по отношению как к полезным нагрузкам, так и к ракетам-носителям, доставляющим на низкие опорные орбиты комплекс, состоящий из полезной нагрузки и разгонного блока. Основную часть разгонного блока составляет двигательная установка (ДУ), включающая маршевый жидкостный ракетный двигатель (ЖРД), топливные баки окислителя и горючего, систему обеспечения запуска двигателя в невесомости, систему ориентации и стабилизации, другие специальные системы и устройства, обеспечивающие выполнение полетного задания РБ [1].

Маршевые двигатели разгонных блоков должны обладать повышенной энергетической эффективностью и надежностью, способностью длительного

нахождения в режиме стартовой готовности, возможностью многократного запуска в невесомости. Максимальный удельный импульс имеют ракетные двигатели, работающие на криогенных компонентах топлива «жидкий кислород–жидкий водород» [2]. Первым отечественным криогенным ЖРД является двигатель 11Д56, разработанный КБ «Химмаш» под руководством А. М. Исаева для программы пилотируемого полета на Луну, которая в нашей стране не была реализована.

На основе этого двигателя в КБ «Химмаш» был отработан и освоен в производстве двигатель КВД1 для криогенного разгонного блока 12КРБ, который в настоящее время эксплуатируется в составе индийской ракеты-носителя GSLV [3].

Двигатель КВД1 можно рассматривать в качестве базовой модели криогенных ЖРД для перспективных разгонных блоков космических ракет-носителей среднего и тяжелого класса. Блочный принцип конструкции данного двигателя допускает модернизацию отдельных функциональных блоков и двигателя в целом, исходя из назначения и задач разгонного блока [4; 5].

Высокие требования, предъявляемые к ЖРД разгонных блоков, во многом обеспечиваются реализацией научно обоснованных программ экспериментальных исследований, проведением большого объема стендовых испытаний двигателей на различных

режимах с моделированием и имитацией условий эксплуатации РБ в космическом пространстве.

Экспериментальные исследования, стендовые испытания и отработка кислородно-водородных ЖРД разгонных блоков, работающих в космосе, требуют решения большого комплекса научно-технических, технологических и организационных задач. Практика показывает, что проводить огневые испытания и экспериментально-исследовательские работы криогенных двигателей на одном испытательном стенде нецелесообразно. Поэтому весь комплекс работ проводился на стендах В1Б и В2Б Научно-исследовательского центра ракетно-космической промышленности (НИЦ РКП, г. Москва).

В процессе экспериментальных исследований и стендовых испытаний двигателей, созданных путем модернизации базовой модели двигателя КВД1, проведена верификация предложенных конструктивных и схемных решений, В результате стендовых испытаний получены основные энергетические характеристики и осуществлена отработка рабочих процессов, обеспечивающих работоспособность двигателя.

При проведении испытаний на высотном стенде В1Б:

- отработан процесс захлаживания полостей «О» и «Г» двигателя;

- отработан процесс заливки полостей и магистралей двигателя криогенными компонентами топлива;

- отработаны пусковые процессы при различном температурном состоянии камеры двигателя;

- отработан процесс выведение двигателя на номинальный режим тяги с последующим переходом на управление, в соответствии с алгоритмами поддержания тяги и соотношения расходов компонентов топлива;

- проведена проверка динамических характеристик РБ (фазовый сдвиг, резонансные частоты и т. д.) в дискретных положениях и угловых отклонениях камеры.

В результате ресурсных испытаний на стенде В2Б:

- отработан процесс многократного включения двигателя (от 3-х до 6-ти включений);

- проведены ресурсные испытания двигателя с суммарным временем работы 2500 с при штатном времени работы 800 с.

В результате испытаний двигателя в составе разгонного блока 12КРБ отработан процесс предварительного захлаживания гелием температурой 40...60 К, что позволило сократить основной режим захлаживания компонентами топлива в полете до 185 секунд.

Высокие показатели стабильности параметров на всех режимах работы, достигнутые в процессе стендовых огневых испытаний двигателей, свидетельствуют о реализации основной цели научно-исследовательской работы.

## Библиографические ссылки

1. Ракетные двигатели космических аппаратов / В. П. Назаров, В. Ю. Журавлев, М. В. Краев, Е. М. Краева ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2015. 200 с.

2. Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей / под ред. В. П. Глушко. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1989. 463 с.

3. Петрик В. А. Дерягин Ю. А., Пиунов В. Ю. Двигатели разгонных блоков разработки КБ «Химмаш» им. А. М. Исаева – филиала ФБУП ГКНПЦ им. М. В. Хруничева // Двигатель. 2010. № 4 (70). С. 36–37.

4. Российские жидкостные ракетные двигатели на экологически чистых компонентах топлива для разгонных блоков ракет-носителей / В. И. Морозов, Е. Л. Заславский, Р. Ф. Морозов и др. // Альтернативная энергетика и экология. 2008. № 3. С. 42–54.

5. 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.

## Reference

1. Raketnye dvigateli kosmicheskikh apparatov [Spacecraft engines] / V. P. Nazarov, V. Yu. Zhuravlev, M. V. Kraev, E. M. Kraeva ; Siberian State Aerospace University, Krasnoyarsk, 2015? 200 p.

2. Alemasov V. E., Dregalin A. F., Tishin A. P. Teoriya raketnykh dvigateley [Theory of rocket engines]. pod red. V. P. Glushko. 4-e izd., pererab. i dop. M., Mashinostroenie, 1989, 463 p.

3. Petrik V. A. Deryagin Yu. A., Piunov V. Yu. Dvigateli razgonnykh blokov razrabotki KB Khimmash im. A. M. Isaeva – filiala FBUP GKNPTs im. M. V. Khrunicheva [The rocket upper-stages designed by Isaev Construction Office Himmash – Khrunichev State Research and Production Space Center]. Dvigatel'. 2010, № 4 (70), P. 36–37.

4. Rossiyskie zhidkostnye raketnye dvigateli na ekologicheski chistykh komponentakh topliva dlya razgonnykh blokov raket-nositeley [Russian Liquid Propellant Systems Operated by Ecologically Clean Propellant Components for Upper-Stages of Rocket Carriers] / V. I. Morozov, E. L. Zaslavskiy, R. F. Morozov et al. // Al'ternativnaya energetika i ekologiya, 2008, № 3, P. 42–54.

5. Optimization of Structural Schemes Of Oxygen-Hydrogen Rocket Engine Boosters (In Russian) / V. Yu. Piunov, V. P. Nazarov, A. A. Zuev et al. // XX Anniversary International Scientific Conference “RESHETNEV READINGS” in 2 volumes. Vol. 1. Krasnoyarsk: Siberian State Aerospace University, 2016, P. 212–213.

© Зуев А. А., Назаров В. П., Фальков В. О., 2018

УДК 62.254.3

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ КОЛЕСА ТУРБИНЫ

Т. А. Королёва, В. Ю. Журавлев, Д. В. Остапенко, М. А. Зайцев, Д. А. Савчин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: 79135639189@yandex.ru

*Рассмотрена схема установки тензорезисторов на рабочее колесо турбины, принцип определения остаточных деформаций.*

*Ключевые слова: рабочее колесо, остаточные деформации, метод тензометрирования, тензорезистор, мостовой метод.*

## METHOD FOR THE DETERMINATION OF RESIDUAL VOLTAGES OF THE TURBINE WHEEL

T. A. Korolyova, V. U. Zhuravlyov, D. V. Ostapenko, M. A. Zaycev, D. A. Savchin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: 79135639189@yandex.ru

*The paper deals with the arrangement of the lode cells on the turbine disk and the principle for determine residual deformations.*

*Keywords: the turbine disk, residual deformations, tensometric method, strain gage, bridge method.*

Турбонасосные агрегаты являются высоконагруженными энергетическими узлами. Их основной задачей является стабильная подача компонентов топлива в камеру сгорания на всех режимах работы двигателя. Для того чтобы обеспечить заданную надежность изделия (в данной работе рассматривается колесо турбины) проводится ряд испытаний. Процесс изготовления детали включает в себя ряд технологических процессов: литье, различные виды механической и термической обработок, вследствие этого в изделии возникают остаточные напряжения. Если величина остаточных напряжений в металле будет выше допустимой нормы, то во время работы колесо турбины может не выдержать нагрузки и деформироваться, что поведет за собой отказ работы всего двигателя. Чтобы минимизировать возможность отказа работы двигателя из-за остаточных напряжений в рассматриваемой детали, проводятся испытания на определение остаточных напряжений. Для измерения остаточных деформаций используется метод электро-тензометрирования, основанный на измерении сопротивления тензодатчика при деформации исследуемой детали [1; 2].

Из всех методов измерения сопротивлений наиболее точным является мостовой метод. Существует несколько видов мостовых схем. Наиболее распространенной является схема, основанная на использовании четырехплечего измерительного моста, называемого иначе мостом Уинстона (рис. 1). Он представляет собой сочетание замкнутого контура, составленного из четырех последовательно соединенных элементов (тензорезисторов).

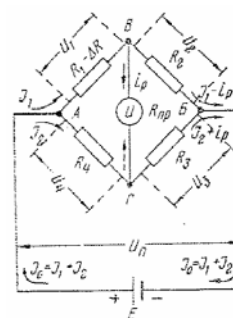


Рис. 1. Направление токов в цепях мостовой схемы

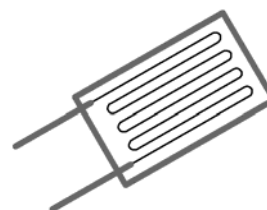


Рис. 2. Проволочный тензорезистор

Одними из главных элементов в данном виде испытаний являются проволочные тензорезисторы (рис. 2), которые представляют собой плоскую петлеобразную проволочную обмотку прямоугольной формы (решетку), к концам которой припаяны или приварены относительно толстые выводы из медной проволоки или фольги. Принцип измерения деформаций с помощью тензорезисторов состоит в том, что

при деформации изменяется его активное сопротивление [3]. Деформация исследуемой конструкции, переданная чувствительному элементу, приводит к изменению его сопротивления, функционально зависимо от деформации вдоль главной оси тензорезистора, сопротивления до деформации, коэффициентов передачи деформации и ее преобразования. На показания тензорезисторов влияют многие факторы: условия транспортировки, условия хранения, точность и правильность наклейки, качество клея и т. д. Поэтому, для предотвращения ошибок в измерениях, тензорезисторы подвергаются постоянному контролю.

На завод приходят тензорезисторы с заявленным одинаковым сопротивлением, но вследствие транспортировки, датчики могут немного менять свое сопротивление [4]. Для снятия показаний с колеса турбины необходимо 15 тензорезисторов (колесо турбины делится на пять секторов, на каждый сектор устанавливаются 3 датчика) (рис. 3).

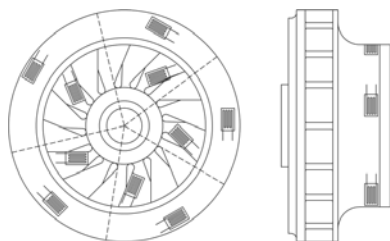


Рис. 3. Схема разрезки рабочего колеса турбины и установки тензорезисторов

Несмотря на то что показания снимаются с точностью до десятых долей Ом, тензорезисторы в каждый сектор подбираются с точностью до сотых долей, что позволяет увеличить точность измерения показаний.

На данный момент на заводах используются тензодатчики российского производства. Они очень удобны в использовании, но уступают в характеристиках датчикам украинского производства, которые

использовались ранее. Поэтому усовершенствование технологии изготовления тензодатчиков является очень важной задачей для российских предприятий.

#### Библиографические ссылки

1. ГОСТ 21616–91. Тензорезисторы. Общие технические условия. Комитет стандартизации и метрологии СССР. Взамен ГОСТ 21616–76, утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 25.04.91. М. : Стандартинформ, 1991. № 573. С. 47.
2. ГОСТ 20420–75. Тензорезисторы. Термины и определения. Комитет стандартизации и метрологии СССР. Утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета стандартов СССР от 01.01.76. М. : Стандартинформ, 1976. № 79. С. 15.
3. Шушкевич В. А. Основы электротензометрии. Минск : Вышэйш. шк., 1975. С. 352.
4. Клокова Н. П. Тензорезисторы. М. : Машиностроение, 1990. С. 222.

#### References

1. GOST 21616–91. Tenzoresistoriy. Obshchie tekhnicheskie usloviya. [State Standart 21616-91 Strain gauges. General specifications, approved and put into operation]. Moscow, Standartinform Publ., 25.04.91. 47 p.
2. GOST 20420–75. Tenzoresistoriy. Terminy i opredeleniya. [State Standart 20420–75 Strain gauges. Terms and Definitions, approved and put into operation]. Moscow, Standartinform Publ., 01.01.76. № 79. 15 p.
3. Shushkevich V. A. Osnovy ehlektrotenzometrii. [Basis of electrotensometry]. Minsk, 1975. 352 p.
4. Klokova N. P. Tenzoresistoriy [Strain gauges.] Moscow, Mashinostroyeniye, 1990. 222 p.

© Королёва Т. А., Журавлев В. Ю., Остапенко Д. В.,  
Зайцев М. А., Савчин Д. А., 2018

УДК 004.92; 658.562

## БЕСКОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ 3D-КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УЗЛОВ И АГРЕГАТОВ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А. А. Лобза, А. Ю. Васянина, Д. А. Ермоленко, В. С. Лобза

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: tonkikh.anastasiya.1995@mail.ru

*Рассматривается применение 3D-методов бесконтактного контроля геометрии узлов и агрегатов ЖРД посредством современного оборудования.*

*Ключевые слова: бесконтактный контроль, 3D-сканер, узлы и агрегаты ЖРД, портативная координатно-измерительная машина (КИМ) с лазерным сканером, САД-моделирование, приемная цифровая ВЕБ-камера, лазерный дальномер, 3D-оборудование.*

## NON-CONTACT 3D GEOMETRICAL PARAMETERS CONTROL OF THE PRODUCT

A. A. Lobza, A. U. Vasyanina, D. A. Ermolenko, V. S. Lobza

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: tonkikh.anastasiya.1995@mail.ru

*In the paper was reviewed using 3D-methods of non-contact geometrical parameters control of assemblies of liquid rocket engines.*

*Keywords: non-contact control, 3D-scanner, assemblies of liquid rocket engines, portable coordinate measuring machine with laser scanner, CAD-modeling, WEB-camera, laser rangefinder, 3D-equipment.*

В настоящее время практически любое современное предприятие не сможет стать успешным без организации дополнительного контроля геометрии изготавливаемых изделий. Объемный контроль геометрии сложных деталей и узлов ЖРД достаточно проблематично обеспечить контактным методом, поэтому на их смену приходят новые технологии с применением высокоточных 3D-сканеров, работающих на специальном программном обеспечении, портативных координатно-измерительных машин (КИМ) с лазерным сканером.

3D-сканер представляет собой автоматизированную машину с подвижной измерительной головкой. Возможность оборудования позволяет произвести оцифровку поверхности и сопоставить данные сканирования с исходной САД-моделью. По результатам такого сравнения создается отчет с картой отклонений геометрии детали от исходной САД-модели [1].

Лазерное сканирование широко применяют для получения 3D-моделей отдельных деталей, узлов, поэтому портативные КИМ стали оснащать лазерными сканерами (ЛС). ЛС состоит из излучающего маломощного безопасного для глаз лазера обычно красного цвета (длиной волны 680 нм) и приемной цифровой ВЕБ-камеры. Луч лазера отражается в измеряемой детали и попадает в ВЕБ-камеру. Сканирующим устройством в данной установке является лазерный дальномер, приспособленный для замера изделия. Полученные данные обрабатываются штатным программным обеспечением по сложным алгоритмам и

преобразовываются в так называемое трехмерное облако точек, которое характеризует положение большего числа координат измеряемой детали относительно друг друга. В последующем программа фильтрует данные и накладывает оставшиеся точки на полигональную сетку или модель и получается трехмерное изображение измеряемого изделия [2].

Погрешность современных лазерных сканеров (например, лазерный сканер LC15Dx) составляет 1,9 мкм, что соответствует точности КИМ оснащенными тактильными датчиками (например: у КИМ ZEISS CONTURA погрешность измерений составляет 1,5 мкм).

Достоинствами бесконтактных методов является: возможность контроля геометрических параметров крупногабаритных изделий, деталей сложной формы, линейных и угловых размеров; возможность произвести полный анализ отклонений формы от эталонной детали; получение САД-модели; имеется возможность восстановления конструкторской документации в случае ее отсутствия или утраты [3].

Недостатками контроля геометрических параметров, осуществляемых посредством 3D-оборудования, заключаются в возникновении наложения ограничений на объекты, которые необходимо оцифровать, в частности это касается изделий с зеркальной, прозрачной поверхностью [4]. Также для получения полной информации об изделии, необходимо произвести ряд повторяющихся операций за несколько циклов работы для достижения результатов.

Таким образом, на данном этапе все больше становится актуально применять на предприятиях 3D-оборудование для контроля изготавливаемой продукции.

Бесконтактные методы 3D-контроля позволяют получать более точные значения геометрии деталей, а также значительно автоматизировать процесс проверки сложных по конфигурации изделий.

#### References

1. Electronic textbook StatSoft. Available at: <http://www/invent3d.ru/3D-control> (accessed: 10.09.18).

2. Electronic textbook StatSoft. Available at: [http://dopusk.net/?page\\_id=1369](http://dopusk.net/?page_id=1369) (accessed: 11.09.18).

3. Electronic textbook StatSoft. Available at: <http://can-touch.ru/vse-o-3d-skanerax/> (accessed: 09.09.18).

4. Electronic textbook StatSoft. Available at: [http://ru.dtent.ru/catalog/izmeritel\\_nye\\_sistemy/izmeritel\\_naya\\_mashina\\_dlya\\_3D\\_skanirovaniya/](http://ru.dtent.ru/catalog/izmeritel_nye_sistemy/izmeritel_naya_mashina_dlya_3D_skanirovaniya/) (accessed: 10.09.18).

© Лобза А. А., Васянина А. Ю.,  
Ермоленко Д. А., Лобза В. С., 2018

## ОСОБЕННОСТИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ КРИОГЕННЫХ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ РАЗГОННЫХ БЛОКОВ

В. П. Назаров, А. А. Зуев, В. О. Фальков

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

*Рассмотрены особенности стендовых испытаний криогенных ракетных двигателей разгонных блоков. Особенности моделирования условий высотной работы двигателей. Особенности определения теплового состояния двигателя с имитацией внешних условий.*

*Ключевые слова: криогенные ракетные двигатели, разгонные блоки, стендовые испытания.*

## FEATURES OF BENCH TESTS OF CRYOGENIC LIQUID ROCKET ENGINES BOOSTERS

V. P. Nazarov, A. A. Zuev, V. O. Falkov

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

*The features of bench tests of cryogenic rocket engines of upper stages are considered. Features of modeling conditions of high-altitude operation of engines. Features of determining the thermal condition of the engine with simulation of external conditions.*

*Keywords: cryogenic rocket engines, upper stages, bench tests.*

Экспериментальные исследования, стендовые испытания и отработка кислородно-водородных ЖРД разгонных блоков, работающих в космосе, требуют решения большого комплекса научно-технических, технологических и организационных задач. Практика показывает, что проводить огневые испытания и экспериментально-исследовательские работы криогенных двигателей на одном испытательном стенде нецелесообразно. Поэтому весь комплекс работ проводился на стендах В1Б и В2Б Научно-исследовательского центра ракетно-космической промышленности (НИЦ РКП, г. Москва).

Моделирование условий высотной работы двигателя достигается при проведении испытаний в барокамере (вакуумной камере). Давление в барокамере может составлять 2–3 кПа и поддерживается весь период испытаний постоянным. Потери полного давления газового потока продуктов сгорания достигают 95...97 % в зависимости от степени расширения сопла камеры двигателя.

В сопле происходит торможение сверхзвукового потока газа в системе косых скачков уплотнения, которое замыкается слабым прямым скачком. На практике при инженерных расчетах совокупность косых скачков заменяется одним сильным скачком уплотнения [1]. Если совокупность параметров (давление в камере сгорания, площади критического сечения и срез сопла) позволяет обеспечить безотрывное истечение в сопле, то реализуется штатный газодинамический и тепловой режимы. При истечении из камеры продуктов сгорания в атмосферу такой режим сохра-

няется до статического давления на срезе сопла 0,025...0,03 МПа. При уменьшении давления газов на срезе сопла скачки уплотнения заходят в него, вызывая перегрев вплоть до прогара в сверхзвуковой части. Поэтому необходимо осуществлять теплозащиту сопла в зоне скачка уплотнения.

При испытаниях ЖРД есть несколько способов защиты сопла от прогара.

В первую очередь определяются основные параметры, которые позволяют решить вопрос о возможности обеспечения безотрывного течения в сопле.

С помощью газодинамических функций осуществляется оценка статического давления на срезе сопла при непосредственном истечении в атмосферу:

$$q(\lambda) = \frac{F_{кр}}{F_{ср}}, \quad (1)$$

где  $q(\lambda)$  – приведенная плотность потока;  $\lambda$  – приведенная скорость потока;  $F_{кр}$ ,  $F_{ср}$  – площади критического сечения и срез сопла соответственно.

Одновременно  $g(\lambda)$  рассматривается в виде

$$g(\lambda) = \frac{W_t}{a_{кр}}, \quad (2)$$

где  $W$  – скорость газа в рассматриваемом сечении;  $a_{кр}$  – скорость газа в критическом сечении.

По изменению параметра  $\lambda$  определяем  $\pi(\lambda) = P_t / P_0$ . Это отношение статического давления движущегося газа в текущем сечении к полному давлению изоэнтропически заторможенному газу в том



же сечении. Отсюда  $P_i = \pi(\lambda) \cdot P_\sigma$ . Если оно меньше 0,03 МПа (абсолютное), то необходимо использовать средства защиты сопла от прогара. Одним из таких средств является газодинамическая труба (ГДТ), которая используется на стенде ВИБ.

Газодинамическая труба является диффузором, предназначенным для торможения сверхзвуковой струи до дозвуковой с повышением статического давления и температуры. Ее эффективность определяется степенью сжатия газа  $\Pi = P_{\text{выхГ}} / P_{\text{вхГ}}$ . Несмотря на то, что в статическое давление  $P_{\text{вхГ}}$  преобразуется от 3 до 5 % полного давления (это связано с большими потерями в скачках уплотнения в ГДТ), степень сжатия составляет 50...70. Можно отметить, что в самых современных авиационных турбореактивных двигателях степень сжатия в компрессоре не превышает 40, и это при том, что ГДТ не нужна внешняя энергия для обеспечения газодинамических процессов.

Торможение в ГДТ, как и в сопле осуществляется в системе косых скачков уплотнения. Оценка эффективности ГДТ определяется при ее газодинамическом расчете.

Определение  $\lambda$ :  $q(\lambda) = F_{\text{кр}} / F_{\text{ср}} \rightarrow \lambda$ . Скорость газа после расчетного скачка определяется как  $\lambda' = (1/\lambda) \cdot q(1/\lambda)$ . Коэффициент восстановления полного давления после замыкающего скачка:  $\sigma = q(\lambda) / q(1/\lambda)$ .

Полное давление после теоретического скачка  $P_{\text{выхГ}} = \sigma P$ . Если оно больше 0,1 МПа (абсолютное), то тогда ГДТ запускается, что гарантирует безотрывность течения газов в сопле двигателя. Если оно меньше, то гарантии нет. При больших степенях расширения сопла камеры двигателя одной ГДТ может быть недостаточно для обеспечения безотрывного истечения продуктов сгорания в атмосферу. В этом случае используются барокамеры с объемом до десятков тысяч кубометров с предварительно откаченным воздухом и давлением на уровне 2–3 кПа, которые служат сборниками продуктов сгорания. Это дорогие объекты с ограниченным временем работы. Другим вариантом является использование вакуумных насосов, устанавливаемых на выходе из ГДТ. В этом случае наиболее предпочтительными являются газовые сверхзвуковые эжекторы, которые являются струйными аппаратами. Преимуществами эжекторов является простота конструкции, что позволяет спроектировать и изготовить оптимальный аппарат в отличие от серийных вакуумных насосов, которые обычно сведены в типо-размерные ряды.

Газовые эжекторы хорошо сопрягаются с реальными газодинамическими трактами стендов для испытаний ракетных двигателей. В качестве активного газа (эжектирующего) можно использовать азот, воздух или иные газы. Продукты сгорания компонентов ракетного топлива обладают высокоэнергетическими характеристиками, поэтому в качестве активной среды в эжекторах целесообразно использовать газ с высокой температурой, например, за счет сжигания окислителя и горючего в газогенераторе или камере [2; 3].

Отдельной задачей является определение теплового состояния двигателя с имитацией внешних условий, в первую очередь низкого давления окружающей среды. Способом защиты сверхзвуковой части сопла от прогорания является коллектор, расположенный в зоне среза сопла с подачей в него воды. Вода через кольцевой зазор или совокупность отверстий малого диаметра впрыскивается перпендикулярно оси камеры двигателя, образуя при неработающем двигателе сплошную завесу, полностью перекрывающую площадь сечения среза сопла. При этом водяная завеса дробится и движется вместе с воздухом к зоне отрыва потока, где образуется воздушно-водяная вихревая структура, организующая стабильный поток продуктов сгорания по ее оси. Образующийся вихрь прижимает высокотемпературный поток к оси сопла, предотвращая его контакт со стенкой. Одновременно происходит охлаждение продуктов сгорания, что благоприятно сказывается на тепловом состоянии газоотводящей системы.

Пневмогидравлические схемы (ПГС) стендов во многом определяются спецификой использования криогенных компонентов. Температура кипения жидкого водорода (20 К), обуславливает применение высокоэффективной теплоизоляции. Это связано с условиями теплового подобия стенда и реального объекта, а также высокой стоимостью водорода, поэтому потери его за счет испарения необходимо минимизировать за счет качественной теплоизоляции. Жидкий кислород достаточно широко распространен в промышленности и имеется большое количество технических средств на всех этапах его использования [4].

Основным видом теплоизоляции является экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ). Емкости и расходные трубопроводы выполнены с внешним кожухом. В пространство между ним и расходным трубопроводом устанавливается ЭВТИ. Она представляет собой многослойные отражающие экраны с чередованием теплоизолятора. Отражающие экраны изготовлены из полиэфирной пленки с металлическим напылением, а теплоизоляция представляет собой тонкую стеклоткань. Для повышения эффективности теплоизоляции в межтрубном пространстве создавался и поддерживался вакуум на уровне 2–3 кПа. Для предотвращения контакта расходного трубопровода и кожуха с определенным шагом устанавливаются стеклопластиковые проставки. Большая разница температур между расходным трубопроводом и кожухом требует использования сильфонных компенсаторов температурных перемещений. Все эти конструктивные мероприятия обеспечивают минимизацию тепловых потерь и практически полное исключение теплопередачи за счет конвекции, теплопроводности и излучения [5]. Для теплоизоляции запорно-регулирующей арматуры и датчиков используется вспененный полиуретан. Его особенностью является стойкость к низким температурам и замкнутая пористость, что исключает конденсацию паров воды в его объемной структуре. Это позволяет сохранить начальные теплоизоляционные свойства.

### Библиографические ссылки

1. Bullok J. R., Santiago J. R. RL-60 – The Next Step in the Evolution of Upper Stage Engines. AIAA Paper AIAA 2004-3529 // 40<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. 11-14 July 2004. Fort Lauderdale, Florida. 13 p.

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. Галлеев, Ю. В. Захаров, В. П. Макаров, В. В. Родченко. М. : Изд-во МАИ, 2014. 328 с.

4. Махин В. А., Миленко Н. П., Пронь Л. В. Теоретические основы экспериментальной отработки ЖРД. М. : Машиностроение, 1973. 284 с.

5. Пухов В. А., Чучеров А. И. Стендовые огневые испытания ЖРД. М. : Машиностроение, 1971. 216 с.

### Reference

1. Bullok J. R., Santiago J. R. RL-60 – The Next Step in the Evolution of Upper Stage Engines. AIAA Paper

AIAA 2004-3529 // 40<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. 11–14 July 2004. Fort Lauderdale, Florida. 13 p.

2. Yatsunenko V. G., Nazarov V. P., Kolomeyntsev A. I. Stendovye ispytaniya zhidkostnykh raketnykh dvigateley [Stand Tests of Liquid Propellant Engines]. Siberian State Aerospace University ; Moscow Aviation Institute. Krasnoyarsk, Publ., 2016. 248 p.

3. Proektirovanie ispytatel'nykh stendov dlya eksperimental'noy otrabotki ob'ektov raketno-kosmicheskoy tekhniki (Designing Simulators for Development Verification of Rocket-Space Technologies) (In Russian.) / A. G. Galleev, Yu. V. Zakharov, V. P. Makarov, V. V. Rodchenko. Moscow, MAU Publ., 2014. 328 p.

4. Makhin V. A., Milenko N. P., Pron' L. V. Teoreticheskie osnovy eksperimental'noy otrabotki ZhRD [Theoretical Grounds of Development Verification of Liquid Propellant Engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 284 p.

5. Pukhov V. A., Chucherov A. I. Stendovye ognevye ispytaniya ZhRD. [Test Bed Firing of Liquid Propellant Engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971. 216 p.

© Назаров В. П., Зуев А. А.,  
Фальков В. О., 2018

УДК 62-29

## СПОСОБЫ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ СБОРКИ КАМЕРЫ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

М. А. Орешков

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

*Рассмотрен способ контроля геометрических размеров камеры ЖРД на основе точного изготовления оснастки.*

*Ключевые слова: оснастка, камера, ЖРД, точность, КИМ.*

## METHODS FOR CONTROLLING GEOMETRIC SIZES OF THE ASSEMBLY OF THE LPG CHAMBER

M. A. Oreshkov

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

*A method for controlling the geometric dimensions of a liquid rocket engine chamber based on precise manufacturing of rigging.*

*Keywords: rigging, camera, liquid rocket engine, precision, CMM.*

Точное изготовление изделий ракетно-космической отрасли является неотъемлемой частью производства, способствующей увеличению надежности и долговечности изделий. Точным изделием в прошлом считалось изготовленное в пределах допусков до сотых долей миллиметра. В настоящее время такими считаются с допусками в пределах несколько микрон. Например, при повышении точности деталей шарикоподшипника и уменьшении его зазора с 20 до 10...15 мкм срок его службы увеличивается с 740 до 1200 ч.

Под точностью в технологии машиностроения понимают степень соответствия производимого изделия требованиям чертежа по размерам и технологическим требованиям.

Проектирование и изготовление оснастки камер жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) в ракетно-космической отрасли играет одну из важных ролей. При этом используют стандартную и унифицированную оснастку. Применение специальной оснастки обосновывается технологом и конструктором.

При установке блоков камеры на оснастку при сборке камеры ЖРД, а также при пайке внутренних и наружных оболочек камеры необходимо обеспечить одинаковую точность изготовления, т. е. качество внутреннего диаметра огневой стенки и наружного диаметра устанавливаемой оснастки.

В связи с трудностью и проблематичностью обеспечения данной точности, оснастка изготавливается с большей погрешностью по сравнению с самой камерой. Так, при сварке блоков камеры применяемая оснастка имеет зачастую 12 качество точности при

9 качестве точности внутреннего диаметра огневой стенки. То же самое можно сказать при пайке блоков камеры наружной и внутренней оболочек. Стоит отметить, что применяемая оснастка перед вводом в эксплуатацию проходит специальный контроль и при ее окончательном внедрении может потребоваться конструкторская доработка. При обнаружении каких-либо незначительных дефектов доработки производятся силами участка подготовки производства цеха-потребителя. В случае, если силами участка цеха-потребителя не обойтись, оснастка возвращается цеху-изготовителю. После доработки и ремонта оснастка проверяется, испытывается и опробуется в том же порядке, какой предусмотрен для вновь изготовленной оснастки. При этом размеры, выставляемые на диаметры посадки, как и другие основные размеры, заносятся в паспорт и периодически контролируются.

Исходной заготовкой для изготовления таких оснасток являются поковки и штамповки. Оправки камер изготавливаются из литейных заготовок. Последующая механическая обработка отливок ведется в цехе-потребителе. Детали, выполненные из поковки, могут быть выполнены методом механической обработки. Все допуски и размеры указываются на чертежах. Допуски расположения формы и поверхностей при сборке оснастки регламентируются средствами технологического оснащения.

При непосредственном контроле размеров сборки камер пользуются специальными инструментами – например при замере диаметральных размеров камер ЖРД могут пользоваться специальными штангенцир-

кулями. При замере длины камеры применяются штангенрейки. Все перечисленные замеры также могут осуществляться в специальных измерительных КИМах (контрольно-измерительных машинах).

Таким образом, качества применяемой оснастки, на которую устанавливаются блоки камеры ЖРД при сборке под сварку и пайку, зачастую грубее качества камеры-изделия порядка трех единиц. Такая точность позволяет не только удешевить стоимость изготовления конструкции, но также позволяет обеспечить необходимый зазор, благодаря которому обеспечивается необходимая посадка блока камеры на оснастку.

#### Библиографический список

1. Технология производства жидкостных ракетных двигателей : учебник / В. А. Моисеев, В. А. Тарасов, В. А. Колмыков; А. С. Филимонов ; под. ред. В. А. Моисеева, В. А. Моисеева, В. А. Тарасова. М. : Изд-во

МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 381 с. (Технологии ракетно-космического машиностроения).

2. Технология производства космических аппаратов : учебник для вузов / Н. А. Тестоедов [и др.] ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2009. 352 с.

#### References

1. Technologia proizvodva zhidkostnich rocketnich dvigatelei : Textbook / V. A. Moiseev, V. A. Tarasov, V. A. Kolmykov; A. S. Filimonov ; Sub. V. A. Moiseev, V. A. Moiseev, V. A. Tarasova. Moscow : MSTU them. N. E. Bauman, 2008. 381 p. : ill. (Technologies of rocket and space engineering).

2. Technologia proizvodva kosmicheskikh apparatov : textbook for universities / N. A. Testoedov [et al.] ; Sib. state. aerospace. un-t. Krasnoyarsk, 2009. 352 p.

© Орешков М. А., 2018

УДК 621.454.2

## АНАЛИЗ МЕТОДИК ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Д. В. Остапенко, М. А. Зайцев, М. И. Толстопятов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: dmitriy.ostapenko.94@mail.ru

*Рассматривается анализ методик термодинамического расчета жидкостных ракетных двигателей при равновесном и замороженном режиме. Полученные значения сравниваются с параметрами реальных ЖРД.*

*Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, удельный импульс в пустоте, стехиометрическое соотношение компонентов, действительное соотношение компонентов, коэффициент избытка окислителя, равновесный режим, замороженный режим.*

## ANALYSIS OF THE METHODS OF THERMODYNAMIC CALCULATION OF LIQUID ROCKET ENGINES

D. V. Ostapenko, M. A. Zaycev, M. I. Tolstopyatov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: dmitriy.ostapenko.94@mail.ru

*The paper deals with the analysis of the methods of thermodynamic calculation of liquid rocket engines at the equilibrium and frozen regime. The comparative of obtained values with the parameters of real liquid rocket engines.*

*Keywords: liquid rocket engine, specific impulse in vacuum, stoichiometric ratio of components, actual component ratio, ratio of an excess oxidizer, equilibrium regime, frozen regime.*

Важнейшим элементом ракетно-космической техники является жидкостный ракетный двигатель. Проектирование ЖРД достаточно трудоемкий процесс, в ходе которого необходимо определить основные параметры и характеристики двигателя на основе термодинамического расчета.

В настоящее время термодинамические расчеты можно выполнять с помощью персональных компьютеров в специализированных программных комплексах, где расчет проводится в равновесном и замороженном режимах, что существенно облегчает задачу. Однако при этом не учитываются различные виды потерь, влияющие на такие характеристики двигателя, как удельный импульс. Величина удельного импульса напрямую зависит от различного вида потерь, кото-

рые были заложены конструктором при проектировании, и состава продуктов сгорания полученного в ходе термодинамического расчета. Однако при испытаниях ЖРД полученные значения удельного импульса будут отличаться от расчетных [1].

По этой причине с целью сравнения методик [2; 3] был проведен термодинамический расчет ЖРД в равновесном и замороженном режиме по известным параметрам двигателей С5.92 [4] и РД-107 [5]. Выбор данных двигателей обусловлен тем, что применяемые топливные пары наиболее распространены в отечественном двигателестроении, также у них различные эксплуатационные характеристики

Термодинамический расчет проводился по параметрам, представленным в таблице.

Исходные данные для термодинамического расчета

Параметры	РД 107	С5.92
Рк, МПа	5,85	9,6
Дз, м	0,72	0,4576
Дкр, м	0,1658	0,0369
Дз/Дкр	4,34	12,4
Гу.п, м/с	3080	3204,6
Кд	2,47	1,95
Ко	3,408	3,062
$\alpha$	0,725	0,636
Окислитель	О <sub>2</sub> (жидкий кислород)	N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (АТ)
Горючее	СН <sub>1,956</sub> (керосин)	С <sub>2</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub> (НДМГ)
Го, кДж/кг	-398	-212
Гг, кДж/кг	-1948	824

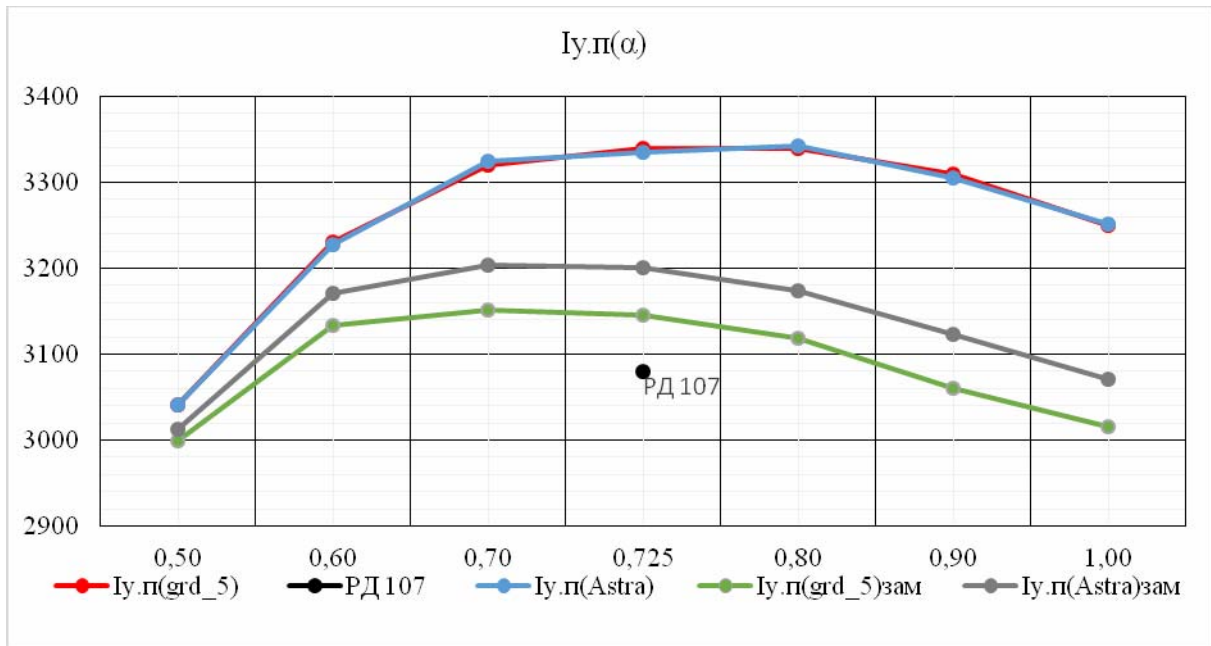


Рис. 1. Зависимость удельного импульса в пустоте от коэффициента избытка окислителя в равновесном и замороженном режимах при параметрах РД-107

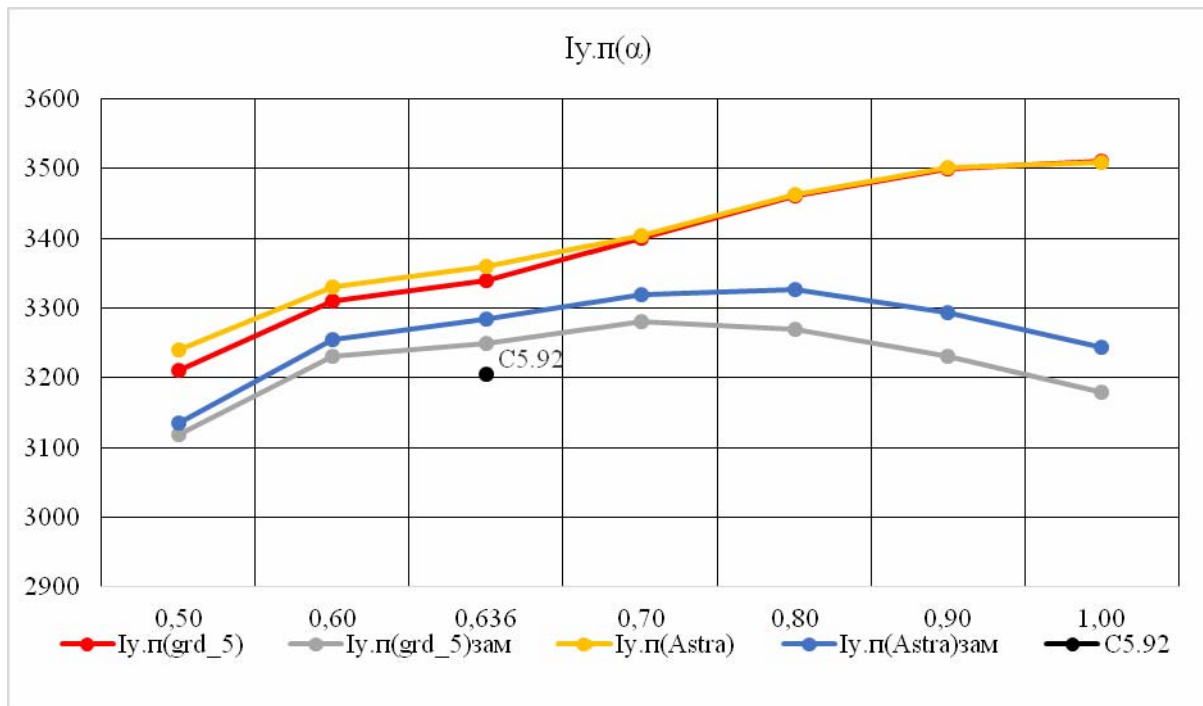


Рис. 2. Зависимость удельного импульса в пустоте от коэффициента избытка окислителя в равновесном и замороженном режимах при параметрах С5.92

В результате расчета были построены графические зависимости удельного импульса в пустоте от коэффициента избытка окислителя, а также состав продуктов сгорания для двух двигателей рис. 1, 2.

Как видно из графиков (рис. 1, 2), полученных по методикам [2; 3], значения удельного импульса в пу-

соте от коэффициента избытка окислителя практически полностью совпадают при равновесном режиме, но отличаются при замороженном. Данное расхождение можно объяснить тем, что существует различие в продуктах сгорания. При этом значение удельного импульса в замороженном режиме достаточно близко

к параметрам реальных двигателей, что говорит о верной реализации методик [2; 3] даже без учета потерь, имеющих в ЖРД.

#### Библиографические ссылки

1. Добровольский М. В. Жидкостные ракетные двигатели. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 484 с.
2. Горностаев В. И. Термодинамический расчет двигателя : учеб. пособие / Сиб. аэрокосмич. акад. Красноярск, 1994. 39 с.
3. Трусов Б. Г. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1991. 40 с.
4. Двигатели С5.92 И С5.221. Разгонный блок «ФРЕГАТ» [Электронный ресурс]. URL: <http://www/main.php?id=53> (дата обращения: 18.08.2018).
5. ЖРД РД-107 и РД-108 и их модификации [Электронный ресурс]. URL: <http://www.lpre.de/energomash/RD-107/index.htm> (дата обращения: 21.08.2018).

#### References

1. Dobrovolskiy M. V. Zhidkostnyye raketnyye dvigateli [Liquid-propellant rocket engines]. Moscow, BMSTU., Publ., 2005. 484 p.
2. Gornostayev V. I. Termodinamicheskiy raschet dvigatelya [Thermodynamic calculation of the engine]. Uchebnoe posobie. Krasnoyarsk, SAA Publ., 1994. 39 p.
3. Trusov B. G. Modelirovaniye khimicheskikh i fazovykh ravnovesiy pri vysokikh temperaturakh. [Modeling of chemical and phase equilibria at high temperatures]. Moscow, BMSTU., Publ., 1991. 40 p.
4. DVIGATELI S5.92 I S5.221. RAZGONNYY BLOK "FREGAT". [ENGINES C5.92 and C5.221. "FRIGATE" SPACE TUG] (In Russ.). Available at: <http://www/main.php?id=53> (accessed: 18.08.2018).
5. ZHRD RD-107 i RD-108 i ikh modifikatsii. [LRE RD-107 and RD-108 and their modifications] (In Russ.). Available at: <http://www.lpre.de/energomash/RD-107/> (accessed: 21.08.2018).

© Остапенко Д. В., Зайцев М. А.,  
Толстопятов М. И., 2018

УДК 004.932

## ВОЗМОЖНОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ УСКОРЕННОГО МЕТОДА КАВИТАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Д. А. Савчин, Д. С. Швецова, В. П. Назаров

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

*Представлена методика ускоренных кавитационных испытаний насосов жидкостных ракетных двигателей, позволяющая сократить время испытаний и повысить их точность.*

*Ключевые слова: кавитация, шнекоцентробежный насос, испытания.*

## POSSIBILITY OF USING ACCELERATED CAVITATION TESTS OF LIQUID ROCKET ENGINE PUMPS

D. A. Savchin, D. S. Shvetsova, V. P. Nazarov

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

*The paper deals with the review of an accelerated method of cavitation tests of centrifugal pumps of liquid rocket engines.*

*Keywords: cavitation, centrifugal pump, tests.*

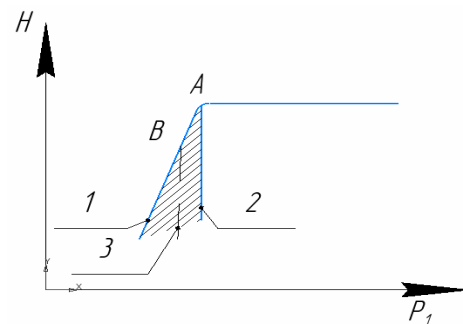
В насосах жидкостных ракетных двигателей при падении входного давления  $P_1$  ниже определенного критического давления  $P_{кр}$  возникает кавитация – явление, которое может привести к срыву режима работы насоса, сопровождаемому уменьшением напора, КПД и расхода жидкости через насос. Вследствие этого появляется необходимость проведения испытаний на определение антикавитационных свойств насоса. Эти свойства характеризуются величиной критического входного подпора  $\Delta h_{кр}$ , который определяется по критическому входному давлению из формулы:

$$\Delta h_{кр} = \frac{P_{1кр} + P_a - P_a}{\rho} + 0,5v_{вх}^2,$$

где  $P_{1кр}$  – критическое входное давление, Па;  $P_a$  – атмосферное давление, Па;  $P_s$  – давление насыщенных паров жидкости, Па;  $v_{вх}$  – скорость жидкости на входе в насос, м/с.

Согласно принятой методике, кавитационные испытания проводятся следующим образом: после вывода насоса на рабочий режим путем установки номинальных значений угловой скорости и расхода жидкости давление на входе в насос ступенчато снижается. При каждом снижении после установления режима производится замер основных параметров насоса: давления на входе и выходе насоса  $P_1, P_2$ , Па; угловой скорости вращения ротора  $\omega$ , рад/с; расхода жидкости через насос  $\dot{m}$ , м<sup>3</sup>/с. По этим данным определяют значение напора, а затем на миллиметровой бумаге строят напорную характеристику – зависимость  $H(P_1)$ . На рисунке представлены кавитационные характеристики насоса, получаемые: 1) без со-

блюдения условия  $\dot{m} = \text{const}$  в области срыва – кривая 1; 2) с соблюдением условия  $\dot{m} = \text{const}$  – кривая 2.



Кавитационные характеристики насоса

Также на рисунке заштрихована область получения возможных характеристик, эта особенность методики формально позволяет влиять на антикавитационные свойства насоса, вследствие чего снижается достоверность испытаний, что может отразиться на ухудшении надежности насосных агрегатов. Экспериментальные данные показали, что расхождение результатов испытаний доходит до 6,3 %, а погрешность определения  $\Delta h_{кр}$ , доходящая до 10 %.

Таким образом, на основании изложенного 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.

В докладе представлена методика проведения испытаний, согласно которой предлагается определять характеристики насосов при непрерывном и достаточно быстром изменении  $P_1$ , что позволит сократить длительность испытаний и существенно уменьшить кавитационную эрозию рабочих колес. При этом предлагается в режиме срыва не поддерживать постоянным  $\dot{m}$ , что позволит отказаться от недостаточно надежных регуляторов расхода.

При ускоренных испытаниях появляется необходимость решения задачи автоматизации процесса регистрации основных параметров. С этой целью разработана регистрирующая система, в состав которой входят вибростержневые датчики давления, преобразователи частоты в напряжение и двухкоординатные самописцы.

Определение кавитационных параметров насоса при непрерывном и достаточно быстром снижении входного давления приводит к тому, что процессы в системе «насос-измерительная система-гидростенд» становятся нестационарными. Поэтому был выполнен анализ влияния нестационарности процессов на результаты испытаний.

При увеличении скорости изменения входного давления растет величина динамической погрешности (~20–60 %). Чтобы ее уменьшить, необходимо снижать  $P_1$  со скоростью ~100 Па/с, т. е. за время  $t \sim 10$  мин. Необходимо подчеркнуть, что ограничение скорости снижения входного давления накладывается только при работе насоса в области срыва, в бессрывном режиме скорость может быть увеличена.

Теоретический анализ условий работы «насос-измерительная система-гидростенд» при определении антикавитационных свойств насосов на нестационарном режиме позволил выработать требования, которым должны удовлетворять измерительные системы стенда, чтобы динамическая погрешность определения параметров насоса была минимальна. Проведенные эксперименты подтвердили правильность сделанных предположений, показали сходимость расчета и эксперимента при скоростях снижения  $P_1$  до 2000 Па/с и позволили отработать методику проведения ускоренных кавитационных испытаний насосов.

С целью экспериментальной проверки возможности автоматизированного определения критического давления на входе в насос непосредственно в процессе испытаний был изготовлен опытный образец прибора автоматической регистрации (ПАР). Погрешность определения  $P_{1кр}$  составила 1,63 %, а время проведения трех серий испытаний составило ~17 мин.

На основании приведенных данных можно сделать вывод, что ускоренный способ проведения испытаний в условиях серийного производства позволяет решить следующие проблемы:

- уменьшить вероятность эрозионного разрушения, сократив время испытаний;
- снизить трудоёмкость обработки результатов испытаний;
- устранить влияние субъективного фактора на результаты испытаний;
- повысить точность определения кавитационных параметров насосов за счет автоматизации процесса определения критического входного давления.

Разработанный прибор автоматической регистрации путем несложных доработок может быть использован для определения кавитационных параметров практически всех типов лопаточных насосов.

#### Библиографические ссылки

1. Башта Т. М. Машиностроительная гидравлика. М. : Машиностроение, 1971. 672 с.
2. Овсянников Б. В., Боровский Б. И. Теория и расчет агрегатов питания ЖРД. 3-е изд. М. : Машиностроение, 1986. 376 с.
3. Encyclopedia Britannica [Электронный ресурс]. URL: <https://www.britannica.com/science/cavitation> (дата обращения: 11.08.2018).
4. Карелин В. Я. Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1975. 336 с.
5. Чебаевский В. Ф., Петров В. И. Кавитационные характеристики высокооборотных шнеко-центробежных насосов / под ред. д-ра техн. наук, проф. С. Д. Гришина. М. : Машиностроение, 1979. 152 с.
6. Яременко О. В. Испытания насосов : справочное пособие. М. : Машиностроение, 1976. 225 с.

#### References

1. Bashta T. M. *Mashinostroitel'naya gidravlika* [The Engineering hydraulics]. Moscow, Mashinostroenie publ, 1971. 672 p.
2. Ovsyannikov B. V., Borovsky B. I. *Teoriya i raschet agregatov pitaniya ZhRD*. [The theory and calculation of unit of liquid rocket engines] Izдание 3, Moscow, Mashinostroenie, 1986. 376 p.
3. Encyclopedia Britannica. Available at: <https://www.britannica.com/science/cavitation> (accessed: 06/18/2018).
4. Karelin V. Ya. *Kavitatsionnye yavleniya v centrobezhnykh i osevykh nasosakh* [Cavitation phenomena in centrifugal and axial pumps]. Izдание 2, pererabot i dop. Moscow, Mashinostroenie, 1975. 336 p.
5. Chebaevsky V. F., Petrov V. I. *Kavitatsionnye kharakteristiki vysokooborotnykh shnekocentrobezhnykh nasosov* [Cavitation characteristics of high-speed centrifugal pumps]; pod. red. S. D. Grishina. Moscow, Mashinostroenie, 1979. 152 p.
6. Yaremenko O. V. *Ispytaniya nasosov* [Pump tests]. Spravochnoe posobie. Moscow, Mashinostroenie, 1976. 225 p.

© Савчин Д. А., Швецова Д. С., Назаров В. П., 2018

## АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДЕЛИ ТРУБОПРОВОДА СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ДЛЯ СТАНКА-ТРУБОГИБА

С. В. Титенков<sup>1</sup>, В. Ю. Журавлев<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
E-mail: Kras@krasmail.ru

<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

*Описывается алгоритм проектирования трубопровода сложной конфигурации (ТСК) для автоматизированного трубогибочного станка с ЧПУ с учетом требований отраслевого документа, регламентирующего изготовление ТСК – ОСТ 92-1600–84. Описываются сложности процесса проектирования пространственных трубопроводных систем (ПТС) производимых для базового модуля разгонного блока (БМРБ). Показаны примеры использования информационно-справочной системы высокопроизводительного устройства хранения информации с PDM-системой Windchill (или программы Lotsia PDM Plus).*

*Ключевые слова:* базовый модуль разгонного блока, трубопровод сложной конфигурации, пространственные трубопроводные системы, система Windchill.

## ALGORITHM DESIGN MODEL OF A PIPELINE OF COMPLEX CONFIGURATION FOR MACHINE-BENDING

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  
E-mail: Kras@krasmail.ru

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

*The paper describes an algorithm for designing a complex configuration pipeline (TSC) for an automated pipe bending machine with CNC, taking into account the requirements of the industry document regulating the manufacture of TSC – OST 92-1600–84. The article describes the complexity of the design process of spatial pipeline systems (PTS) produced for the base module of the upper stage (BMRB). Examples of using information and reference system of high-performance storage device with PDM-system Windchill (or Lotsia PDM Plus program) are shown.*

*Keywords:* basic module of upper stage, complex configuration pipeline, spatial pipeline systems, Windchill system.

В настоящее время процесс проектирования, изготовления и монтажа трубопроводов сложной конфигурации, входящих в изделия РКТ, проходит несколько этапов:

- создание полномасштабного макета до начала производства изделия;
- создание по изготовленному макету эталонных трубопроводов;
- изготовление штатных трубопроводов;
- многократная подгибка штатных трубопроводов по эталону.

Это требует большого количества ручного труда и не дает гарантии обеспечения оптимальной конфигурации и надлежащего качества продукции.

Рабочие чертежи на трубопроводы сложной конфигурации представляют собой только схематическое изображение трассы трубопровода, что приводит к неудобству сборки и монтажа трубопровода.

Из-за сложной пространственной конфигурации трубопроводов, традиционные чертежи на монтаж их в составе изделия, содержат большое количество видов, сечений, по которым сложно представить пространственную конфигурацию сборки и монтажа трубопроводов без макетирования [1].

Внедрение комплексной автоматизированной системы проектирования, изготовления и монтажа трубопроводов сложной конфигурации с применением 3D-модели позволяет:

- исключить сложный и трудоемкий процесс эталонирования трубопроводов;
- повысить точность изготовления и сборки трубопровода;
- исключить операцию подгибки по месту;
- автоматизировать всю технологическую последовательность от проектирования до монтажа трубопроводов;

– исключить влияние субъективного человеческого фактора на основных этапах работ;

– улучшить технологию изготовления трубопроводов и их монтажа в составе узла и изделия за счет перехода на работу с 3D-моделью изделия или агрегата и визуализации процесса монтажа с установленной последовательностью сборки (создание видеороликов для обучения персонала сборочных производств);

– создать и хранить конструкторско-технологические данные в электронном виде в единой базе данных – Windchill.

В настоящее время на российском рынке программных средств, применяемых для автоматизации конструкторско-технологического проектирования и решения других задач автоматизации технической подготовки производства, представлены все известные системы автоматизированного проектирования (САД). Данные программы подразделяют на САД-системы: нижнего, среднего и верхнего уровней.

К системам нижнего уровня, предназначенным для автоматизации выпуска конструкторской и технологической документации, подготовки управляющих программ, сокращения времени разработки проектов, относят САД – системы:

– AutoCAD, Mechanical Desktop (Autodesk Inc., США);

– T-FLEX CAD 2D (Топ Системы, Россия);

– Компас-График (Аскон, Россия) и др.

К САД-системам среднего уровня проектирования трубопроводных систем, которые позволяют создать объемную модель изделия, по которой контролируется взаимное расположение деталей, определяются инерционно-массовые, прочностные и прочие характеристики, моделируются все виды ЧПУ-обработки, отрабатывается внешний вид по фотореалистичным изображениям, относят:

– Inventor (Autodesk Inc., США);

– SolidWorks (Dassault Systemes SolidWorks Corp., Франция);

– SolidEdge (Siemens PLM Software, Германия) (бывший UGS, США);

– T-FLEX CAD 3D (Топ Системы, Россия);

– КОМПАС-3D (Аскон, Россия);

– АДЕМ (АДЕМ Технолоджиз, Россия) и др.

САД-системы верхнего уровня применяют в случае массового производства деталей или высокотехнологичных деталей с большой добавленной стоимостью, в ином случае данные САД-системы могут не окупить свои лицензионные, временные, организационные, технологические и прочие затраты. К ним относятся САД-системы:

– CATIA (Dassault Systemes, Франция);

– Siemens NX (Siemens PLM Software, Германия) (бывший UGS, США);

– Pro/Engineer (PTS, США).

Этап конструкторского моделирования трубопровода в 3D-модель с сохранением полученного результата в электронном архиве в АО «Красмаш» выполняют в программе Solid Works (а также в программах: Creo Parametric, Компас 3D, AutoCAD Inventor, T-Flex) с использованием информационно-справоч-

ной системы, в том числе единую систему конструкторской документации (ЕСКД) через ТехноПРО.

Алгоритм компоновки трубопровода в САД-системе состоит из следующих этапов:

1. Создание упрощенных 3D-моделей деталей и узлов изделия, необходимых для однозначного определения зон прокладки трасс трубопроводов;

2. Создание упрощенных габаритных 3D-моделей основных элементов (ёмкостей, ферм, переходников и т. д.) и их взаимная увязка;

3. Предварительное расположение и прорисовка штуцеров на емкости, к которым будут стыковаться трубопроводы;

4. Предварительная прорисовка на переходнике основных элементов мест крепления трубопроводов;

5. Взаимная увязка элементов между собой, привязка к их основным плоскостям стабилизации;

6. Предварительное размещение арматуры (клапанов, наконечников, тройников и т. д.) изделия осуществлялось с учетом удобства обслуживания и ремонта, а также минимальных прямолинейных участков и радиусовгиба.

Создание модели трубопровода в САД-системе состоит из следующих этапов:

1. Прокладка трассы трубопровода с учетом зон обхода зон отсеков, минимальных зазоров и возможности их дополнительного крепления, с определением начальных, конечных точек трассы трубопровода (см. рисунок, а).

2. Уточнение компоновки изделия по результатам анализа и оптимизации трассы трубопровода.

3. Создание библиотеки ДСЕ трубопровода и элементов его крепления: уголка для крепления трубопровода, шпильки для крепления трубопровода, прижима для крепления трубопровода, наконечника трубопровода, компенсатора трубопровода, компенсатора трубопровода.

4. Поэлементное разнесение сборки трубопровода.

5. Анализ, оптимизация трассы трубопровода и проверка на допустимые зазоры и пересечение с трассами близлежащих трубопроводов после размещения ДСЕ в трубопроводе и элементов его крепления.

6. Проработка этапов сборки изделия и технологической возможности изготовления трубопровода и определение мест разъема трубопровода и разбиение трубопровода на несколько, с определением положения монтажных стыков с учетом возможности сборки, сварки, рентгеноконтроля и испытаний.

7. Уточнение компоновки изделия по результатам анализа и оптимизации трассы трубопровода.

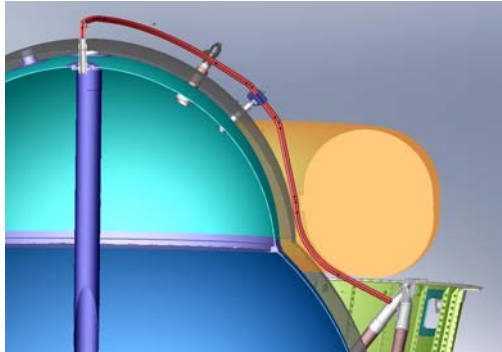
8. Определение мест нанесения маркировки на трубопроводе.

9. Получение окончательной модели трубопровода после уточнения компоновки изделия (рисунок, б).

В конце этапа получается изготовление предварительного изделия – шаблона (эталона). Процесс эталонирования трубопровода регламентируется нормативным документом ОСТ 92-1600–84 [2].

Из представленных рисунков видна сложная конфигурация значительного количества трубопроводов. Учитывая большое число трубопроводов (разных

диаметров и траекторий) используемых при создании БМРБ сложность и трудоёмкость технологического процесса изготовления их эталонов и самих изделий ведёт к увеличению сроков внедрения КД в производство, что в свою очередь увеличивает сроки изготовления БМРБ.



а



б

Определение дополнительного места крепления, начальных и конечных точек трассы трубопровода, 3D-модель трубопровода

Учитывая безусловность выполнения гособоронзаказа, сокращение временных издержек постоянной отработки технологии изготовления на трубогибах разных 3D-трубопроводов, из разных материалов,

диаметров и партий поставки, исключит риски временных задержек изготовления выпускаемого изделия.

Выполнение вышеуказанных задач требует создание универсальной технологической методики запуска изготовления трубопровода 3D-конфигурации, которая должна включать в себя решение всех возможных причин внештатных ситуаций работы станка – трубогиба, позволять минимальными временными и материальными затратами выходить в режим штатной работы.

### 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.
2. ОСТ 92-1600–84. Производство трубопроводов. Общие технические условия. Эталонирование трубопроводных систем, гибка труб и формообразование концов трубопроводов. М. : Стандартинформ, 1984. 96 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. designer rocket-space systems acad. M. F. Reshetnev : 2 parts ; under the general editorship of Y. Y. Loginov ; Sib. state aerospace. univ. Krasnoyarsk, 2013. Part 1.
2. 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. 96 p.

© Титенков С. В., Журавлев В. Ю., 2018

УДК 629.7.036.54.063.6:621.565.93/.94

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОВЕРИТЕЛЬНОГО ИНТЕРВАЛА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОСЕВОЙ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

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 повышения точности определения доверительного интервала энергетических параметров при периодических испытаниях осевой газовой турбины ЖРД.*

*Ключевые слова: ЖРД, турбина, доверительный интервал.*

## IMPROVEMENT OF ACCURACY OF DETERMINATION OF TRUSTING INTERVAL OF ENERGY PARAMETERS OF AXIAL GAS TURBINE

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 increasing the accuracy of determining the confidence interval of the energy parameters during periodic tests of the axial gas turbine of LRE is considered.*

*Keywords: LRE, turbine, confidence interval.*

Одним из наиболее ответственных и энергонапряженных узлов жидкостного ракетного двигателя является турбонасосный агрегат, который обеспечивает непрерывную подачу компонентов топлива в камеру двигателя.

К ТНА предъявляются важные требования [1] такие как обеспечение работоспособности и основных параметров при заданном ресурсе с необходимыми возможными паузами установленной продолжительности; обеспечение на всех режимах работы двигателя, подачи компонентов топлива требуемого расхода и давления при высокой степени надежности с приемлемым КПД всего агрегата.

Для подтверждения рабочих характеристик турбины, во время производства партии проводятся различные испытания, турбины, как обособленного узла, так и в составе двигательной установки (так называемые «огневые испытания»). Рассмотрим испытание турбины ТНА как отдельного узла. Для испытания используются установки с подачей рабочего газа с открытой или закрытой циркуляцией рабочего газа. Рабочим телом является модельный газ (повторяющий рабочий газ, используемый при работе ТНА, по лишь по некоторым свойствам), а сами испытания относятся к параметрическим. При параметрических испытаниях определяют физические параметры и характеристики турбин, причем результаты испытаний представляются в виде графиков или числовых значений параметров конкретной турбины.

Одним из важных параметров испытательного стенда, помимо обеспечения необходимых рабочих параметров, является возможность оценки точности

полученных результатов, которая оценивается вычислением доверительного интервала (с учетом погрешностей приборов измерения) во время отработки на стенде новой турбины, замены измерительных приборов, после окончания ремонтных работ. Большинство параметров, характеризующих работу ЖРД, определяют косвенными методами с использованием результатов нескольких прямых измерений, т. е. в общем случае числовое значение определяемой физической величины является функцией нескольких независимых переменных [2]  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

При определении КПД необходимо учесть статическую погрешность приборов измерения динамического давления и температуры на входе и выходе из турбины, давления на входе и выходе расходомерного участка, давления окружающей среды. Погрешность прибора определяются его классом точности, который указан в паспорте на измерительный прибор. Учет погрешности расхода рабочего тела производится также по приборами измерения давления и температуры, но с учетом участка, где они установлены – для измерения расхода устанавливаются специальные сужающие устройства: расходомерную диафрагму, сопло или трубу Вентури, изготовленную в соответствии с ГОСТом по установленным требованиям [3; 4]. Для определения случайной погрешности используют данные приборов во время испытания с учетом известного закона распределения. Учет влияния случайной и статической погрешности дает абсолютный предел погрешности.

Так как КПД является функцией данных аргументов, то для определения погрешностей функции (ре-

зультаты косвенных измерений) по погрешности аргументов (результатов прямых измерений) применяют аппарат дифференциального исчисления. Используемую функцию необходимо разложить методом логарифмического дифференцирования на члены, определяемые прямым измерением. Разложение выполняют по известной методике [2]

Учет данных значений позволит повысить точность оценки измерения основных параметров турбины при испытаниях.

#### Библиографические ссылки

1. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей : учебник для студентов вузов / Г. Г. Гахун, В. И. Баулин, В. А. Володин и др. ; под общ. ред. Г. Г. Гахуна. М. : Машиностроение, 1989. 424 с.
2. Испытания жидкостных ракетных двигателей / А. Е. Жуковский, В. С. Кондрусев, В. В. Окорочков. М. : Машиностроение, 1992. 352 с.
3. ГОСТ 8.586.2–2005. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. М. : Стандартинформ, 2005. 43 с.
4. ГСССД 8–79. Воздух жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость при температурах 70–1500 К и давлениях 0,1–100 МПа. М. : Стандартинформ, 1980. 11 с.

#### References

1. Konstruktsiya i proyektirovaniye zhidkostnykh raketnykh dvigateley: Uchebnik dlya studentov vuzov [Design and design of liquid rocket engines: A textbook for university students on the specialty]. G. G. Gahun, B. I. Baulin, V. A. Volodin et al. ; Under the general. Ed. G. G. Gahun. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 424 p.
2. Ispytaniya zhidkostnykh raketnykh dvigateley. [Tests of liquid rocket engines]. A. E. Zhukovsky, V. S. Kondrusev, V. V. Okorochkov. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1992. 352 p.
3. GOST 8.586.2–2005. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya yedinstva izmereniy (GSI). Izmereniye raskhoda i kolichestva zhidkostey i gazov s pomoshch'yu standartnykh suzhayushchikh ustroystv. [State Standard 8.586.2–2005. State system for ensuring the uniformity of measurements (ICG). Measurement of flow and quantity of liquids and gases using standard narrowing devices]. Moscow, Standartinform Publ., 2005. 43 p.
4. GSSSD 8–79. Vozdukh zhidkiy i gazoobraznyy. Plotnost', ental'piya, entropiya i izobarnaya teployemkost' pri temperaturakh 70–1500 K i davleniyakh 0,1–100 MPa. [GSSSD 8–79. The air is liquid and gaseous. Density, enthalpy, entropy and isobaric heat capacity at temperatures of 70–1500 K and pressures of 0.1–100 MPa]. Moscow, Standartinform Publ., 1980. 11 p.

© Торгашин А. С., Жуйков Д. А., 2018

УДК 67.05::53.08:62-1/-9

## МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА НА СТЕНДАХ ИСПЫТАНИЯ НАСОСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАЗОМЕТРА

Д. С. Швецова, 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: darya.shvetsova@yandex.ru

*Рассматриваются предложения по усовершенствованию метода измерения крутящего момента при проведении гидродинамических испытаний насосов жидкостных ракетных двигателей (ЖРД).*

*Ключевые слова: стенд испытания насосов (СИИ), балансирная рама, рейтерное устройство, крутящий момент, торсионный вал.*

## THE METHOD OF TORQUE MEASUREMENT ON THE PUMP TEST STANDS WITH USING PHASOMETER

D. S. Shvetsova, D. A. Savchin, L. P. Nazarova

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

*The paper deals with proposal of improving the method of torque measurement during the hydrodynamic tests of centrifugal pumps of liquid rocket engines.*

*Keywords: pump test stand (PTS), balanced frame, rider bed, torque, torsional shaft.*

Гидродинамические испытания (гидропролив) являются ответственным этапом в производственном цикле изделий ракетно-космической техники. Они позволяют сделать вывод о соответствии фактических параметров насосов значениям, заданным конструкторской документацией, что определяет качество выпускаемой продукции. Такие испытания позволяют определить ряд основных характеристик агрегатов ракетного двигателя, а именно: гидравлическое сопротивление, напор, перепад давления, КПД и т.д.

Цель проведения гидропролива заключается в определении напорной и кавитационной характеристик насоса, а также его КПД. Анализируя данные, полученные за многие годы проведения таких испытаний, можно сделать вывод, что определение КПД насоса  $\eta$  вызывает наибольшее затруднение, а точность не превышает 2,5 %. Проведя анализ членов, входящих в зависимость (1), по которой рассчитывается КПД [1], видно, что определение расхода, напора, плотности жидкости и угловой скорости ротора насоса не вызывает затруднений. Такие измерения проводятся с погрешностью менее одного процента. Однако определение крутящего момента, создаваемого на валу насоса, сопряжено с большими трудностями, а погрешность колеблется от 0,87 до 2,98 % (здесь и далее погрешность посчитана по методике, изложенной в работе [2]) в зависимости от испытываемого насоса

$$\eta = \frac{\dot{m}H\rho}{\omega M_{кр}},$$

где  $\dot{m}$  – массовый расход;  $H$  – напор;  $\omega$  – угловая скорость;  $M_{кр}$  – крутящий момент.

Методика определения крутящего момента при испытаниях насосов ЖРД состоит в следующем [3]: на балансирной раме установлен электродвигатель с мультипликатором, рама посредством системы рычагов соединена с рейтерным устройством, где при помощи датчика и встроенного электродвигателя происходит перемещение рейтерной головки, которая уравнивает систему. Сигнал с датчика поступает на измерительное устройство, которое фиксирует значения момента.

Достоинства данного метода:

– возможность провести тарировку статическим способом.

Недостатки метода:

– низкая точность измерения момента, погрешность от 0,87 до 2,98 % [2];

– зависимость точности определения КПД от соотношения  $M_{кр}/M_{пр}$  ( $M_{пр}$  – предельный момент) и, как следствие, необходимость для каждого типа насоса изготавливать отдельный стенд;

– сложность в обслуживании стенда;

– увеличенное время проведения испытаний (время успокоения стенда – 10–15 секунд), иногда превышающее время работы насоса в изделии;

– подверженность влиянию окружающей среды;

В совокупности все перечисленные недостатки не позволяют провести испытания с необходимой точностью, а кроме того, снижают надежность насосов вследствие увеличенного времени испытаний. Существующая методика не отличается гибкостью и экономически затратная.

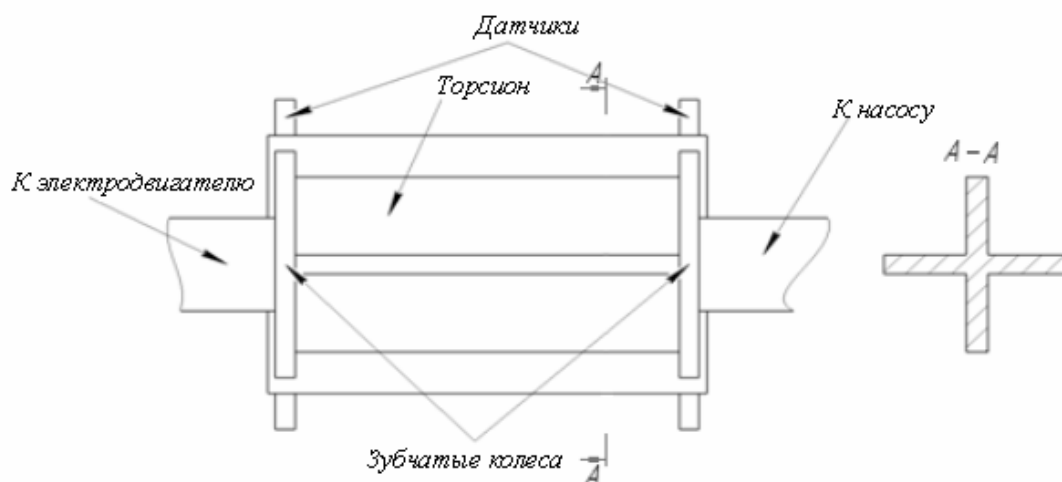


Схема фазового измерителя крутящего момента

Для улучшения существующей методики можно добиться, чтобы значение соотношения  $M_{кр}/M_{пр}$  было близко к единице. Это можно сделать либо проектируя для каждого насоса свой стенд, добиваясь значения предельного момента близким к моменту насоса, либо испытывать насос на повышенных режимах. В первом случае испытания будут сопряжены со значительными финансовыми и временными затратами, а второй случай ограничен прочностью насоса и снижает его надежность.

Для повышения точности определения КПД, снижения затрат на подготовку и проведение испытаний, а также для увеличения надежности насосов предлагается в качестве устройства измерения крутящего момента использовать фазовый измеритель крутящего момента (ФИКМ) на основе торсионного вала. Фазовые методы измерения обладают высокой точностью, простотой в обслуживании, на их основе можно создать устройство, способное за короткое время сделать замер крутящего момента с погрешностью менее 1 %.

ФИКМ (см. рисунок) состоит из торсионного вала, на концах которого закреплены зубчатые колеса. Один конец вала подсоединяется к мультипликатору через рессору, а другой соединяется с валом шнекоцентробежного насоса. Торсион с колесами располагается в гильзе. Напротив каждого колеса расположены два индукционных датчика, диаметрально противоположные друг другу. Датчики фазированы.

Поперечное сечение торсионного вала имеет крестообразную форму, которая, обеспечивая достаточный угол закручивания и при этом сохраняет продольную жесткость. Использование вала с круглым сечением нецелесообразно, так как он не обеспечит необходимый угол закручивания, а жесткости такого вала недостаточно при работе на высоких оборотах.

Использование двух датчиков на каждом зубчатом колесе позволяет практически полностью убрать искажения, вызванные радиальным биением вала, а также увеличить амплитуду выходного сигнала. Помимо всего существует система предохранения, состоящая из срезного штифта и корпуса втулки

и срабатывающая при достижении момента среза, равного  $M_{ср} = 1,2M_{кр}$ .

Принцип работы фазового измерителя крутящего момента следующий: в начальный момент времени, когда насос не заполнен рабочей жидкостью, между зубьями колес сохраняется угол  $\alpha_1$ , заданный при тарировке и соответствующий нулевому моменту. В результате заполнения насоса жидкостью на его валу возникает момент, направленный в противоположную вращению электродвигателя сторону. Вследствие этого происходит закручивание торсионного вала и, как следствие, изменение угла  $\alpha_1$ . Изменение угла между зубьями колес приводит к изменению разницы фаз, регистрируемой датчиками. Каждой разнице фаз соответствует определенное значение крутящего момента, определенное при тарировке измерителя [4; 5].

Достоинства предложенного метода:

- погрешность во всем диапазоне измерений – 0,93 %;
- низкая чувствительность к производственным факторам;
- универсальность метода – достаточно изготовить несколько вариантов торсионного вала для каждого диапазона моментов;
- уменьшение времени проведения испытаний;
- простота обслуживания;
- возможность использовать совместно с имеющейся технологией испытаний;

Недостатки предложенного метода:

- нелинейная зависимость разницы фаз и моментов;
- сложность изготовления торсионного вала.

Однако перечисленные недостатки не препятствуют внедрению предлагаемого метода измерения крутящего момента, который позволит повысить точность и сократить временные и финансовые затраты на проведение испытаний.

#### Библиографические ссылки

1. Овсянников Б. В., Боровский Б. И. Теория и расчет агрегатов питания ЖРД. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1986.



2. Рабинович С. Г. Погрешности измерений. Л. : Энергия, 1978. 262 с.

3. Технология сборки и испытаний насосов жидкостных ракетных двигателей : учеб. пособие / М. В. Краев, В. П. Назаров, Л. П. Назарова, Б. Ф. Оратынский ; под общ. ред. проф. М. В. Краева. Красноярск : САА, 1993. 103 р.

4. Смирнов П. Т. Цифровые фазометры. Л. : Энергия, 1974. 144 с.

5. Фролов Л. Б. Измерение крутящего момента. М. : Энергия, 1967. 120 с.

#### References

1. Ovsyannikov V. V., Borovsky V. I. *Teoriya i raschet agregatov pitaniya ZhRD*. [The theory and calculation of unit of liquid rocket engines]. Izdanie 3, Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 376 p.

2. Rabinovich S. G. *Pogreshnosti izmereniy* [The faults of the measurements]. Lipetsk, Energiya Publ., 1978. 262 p.

3. *Tekhnologiya sborki i ispytaniy nasosov zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Technology of assembling and tests of pumps of liquid rocket engines]. Uchebnoe posobie. M. V. Kraev, V. P. Nazarov, L. P. Nazarova, B. F. Oratynsky; pod. red. prof. M. V. Kraeva. Krasnoyarsk, SAA Publ., 1993. 103 p.

4. Smirnov P. T. *Tsifrovyye fazometry*. [Digital phasometers]. Lipetsk, Energiya Publ., 1974. 144 p.

5. Frolov L. B. *Izmerenie krutyashchego momenta* [Torque measurement]. Moscow, Energiya Publ., 1967. 120 p.

© Швецова Д. С., Савчин Д. А.,  
Назарова Л. П., 2018

УДК 621.454.2

## ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Т. А. Шевченко, О. В. Корчикова

АО «Красноярский машиностроительный завод»  
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29  
\*E-mail: tanja-taja2@mail.ru

*Высокочастотные колебания являются одной из основных проблем при опытно-конструкторском производстве ЖРД, которые сопровождаются разрушением конструкции двигателя.*

*Ключевые слова: высокочастотные колебания, неустойчивость.*

## HIGH-FREQUENCY OSCILLATIONS IN COMBUSTION CHAMBERS OF LIQUID ROCKET ENGINES

T. A. Shevchenko, O. V. Korchikova

JSC „Krasnoyarsk Machine Building Plant“  
29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation  
\*E-mail: tanja-taja2@mail.ru

*High-frequency oscillations are one of the main problems in the development of experimental design, which are accompanied by the destruction of the engine design.*

*Keywords: high-frequency oscillations, instability.*

Практически в каждом ЖРД возникает неустойчивость рабочих процессов: самопроизвольные неуправляемые колебания значений давления, скорости, температуры газа и жидкостей и пр. Сначала возникает участок развития колебательного процесса (0,01...0,02 с), затем существует участок автоколебаний, т.е. самоподдерживающихся нелинейных периодических колебаний примерно постоянной амплитуды. Наличие неустойчивости приводит к вибрациям и механическому разрушению конструкций, локальным оплавлением стенок, нестабильности тяги. Решение проблем выявления причин неустойчивости и погашения ее требует серьезных исследований в ходе длительной экспериментальной доводки двигателя. Колебательными системами являются газообразные и жидкие вещества в агрегатах ДУ (камера, ГГ, трубопроводы, газопроводы и др.). Обычно автоколебания поддерживаются за счет тепловой энергии, выделяющейся при горении топлива, поступление энергии в колебательную систему регулируется обратной связью между источником энергии и системой [1].

Высокочастотная неустойчивость характерна значением частоты колебаний параметров газа в камере 1000 Гц и больше. Время распространения волны сравнимо с периодом колебаний, а длина ее – с размерами камеры сгорания. Возникают поперечные (радиальные и тангенциальные) моды автоколебаний, так как потери энергии этих мод колебаний с выносом энергии меньше, чем в продольных модах колебаний. Источником энергии для развития и поддержания ВЧ – колебаний является горение, частота колебаний зави-

сит от акустических свойств газа в объеме камеры сгорания [1].

Существенное влияние на ВЧ – неустойчивость оказывают пристеночные эффекты у стенки, создаваемые для уменьшения тепловых потоков в нее. Уменьшение количества непрореагировавшего топлива по периферии камеры повышает устойчивость процессов по отношению к тангенциальным модам колебаний [1].

Повышение устойчивости обеспечивают специальными антипульсационными перегородками, изменяющими акустические свойства камеры, и предохранением предпламенной зоны от воздействия пульсаций. ВЧ – неустойчивость крайне сложна и недостаточно изучена, она может стать непреодолимым препятствием при создании двигателя большой тяги [2].

Колебания давления в камере сгорания, их амплитуда и частота изменяются в широких пределах: по форме – от синусоидальных до очень сложных, по частоте – от десятков герц до тысяч герц. Колебательный процесс происходит на частотах, совпадающих с собственными акустическими частотами колебательных систем, значения которых обратно пропорциональны линейным размерам объемов, занимаемых газом или жидкостями, и прямо пропорциональны скорости звука в среде. В зависимости от частоты автоколебания в ЖРД принято разделять на низко – (до 200 Гц), средне – (200...500 Гц) и высокочастотные ( $f > 600$  Гц) автоколебания. Размер двигателя (т.е. его тяга) позволяет отнести автоколебания к конкретному виду неустойчивости [1].

Для низко- и среднечастотной неустойчивости в камере сгорания характерны продольные колебания параметров. При этом параметры во всем объеме камеры одинаковы, так как характерный размер объема газа меньше акустической длины волны. Для ЖРД с тягой 0,1...5 МН такой неустойчивости соответствует диапазон частот  $f = 1...100$  Гц. Причиной их служат случайные разбросы в горении топлива – колебания в расходе продуктов сгорания, что приводит к пульсациям давления. Также причиной НЧ (низко-частотной) неустойчивости могут быть кавитационные колебания, возникающие в насосах при взаимодействии кавитационных полостей с гидравлическим трактом питания насоса. Из-за НЧ-неустойчивости возникают опасные продольные упругие колебания корпуса ракеты. Колебания в системе двигатель – упругий корпус ракеты вызывают возмущения от двигателя в замкнутую динамическую систему двигатель-корпус. Колебания корпуса приводят к колебаниям жидкости в баках и трубопроводах, что приводит к колебаниям уровня тяги. А изменение тяги вызывает колебания упругого корпуса [1].

Если колебания жидкости совпадает с собственной частотой колебаний корпуса и имеется совпадение по фазе, то возникают автоколебания. Продольные колебания корпуса ракеты из-за изменения перегрузок приводят к колебаниям объема и давления газовой подушки баков. Могут возникнуть автоколебания: давление в баке – давление на входе в двигатель-тяги-

корпус ракеты. Стабилизацию системы упругий корпус-двигатель осуществляют изменением динамических свойств топливоподающего тракта путем установки демпфирующих устройств. Для СЧ – неустойчивости характерны продольные колебания параметров потока в контурах: ГГ – подводящие магистрали, газопод-камера сгорания [1].

Причины возникновения такой неустойчивости такие же, что и НЧ-неустойчивости: связь процесса горения с гидродинамической системой подачи и смеобразования.

#### Библиографические ссылки

1. Electronic textbook StartSoft [Электронный ресурс]. URL: <https://helpiks.org/4-76526.html> (дата обращения: 02.09.2018).
2. Electronic textbook StartSoft [Электронный ресурс]. URL: [www.nic-rkp.ru/doc/science\\_publication\\_003.pdf](http://www.nic-rkp.ru/doc/science_publication_003.pdf) (дата обращения: 02.09.2018).

#### References

1. Electronic textbook StartSoft. Available at: <https://helpiks.org/4-76526.html> (accessed: 02.09.2018).
2. Electronic textbook StartSoft. Available at: [www.nicrkp.ru/doc/science\\_publication\\_003.pdf](http://www.nicrkp.ru/doc/science_publication_003.pdf) (accessed: 02.09.2018).

© Шевченко Т. А., Корчикина О. В., 2018

УДК 629.78

## ТЕХНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ЗАЖИГАНИЯ И ВОСПЛАМЕНЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ТОПЛИВА ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

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: gsyatsunenko@gmail.com

*Приведен обзор способов зажигания компонентов топлива в ракетных двигателях, краткое описание конструкции каждого метода, преимущества и недостатки.*

*Ключевые слова: ЖРД, зажигание, воспламенение, ПЗУ.*

## TECHNICAL ANALYSIS OF IGNITION METHODS OF FUEL COMPONENTS OF LIQUID ROCKET ENGINES

G. S. Yatsunenko

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

*This article gives an overview of the ignition methods of fuel components in rocket engines, a brief description of the designs for each method, along with advantages and disadvantages.*

*Keywords: LRE, ignition, combustion, pyro ignitor.*

Воспламенение компонентов топлива в ракетных двигателях является одной из важнейших задач, которые решаются при проектировании, так как качественное зажигание способно обеспечить плавный характер запуска, а значит – снизить перегрузки на старте [1].

Для несамовоспламеняющихся топливных пар существует множество путей осуществления инициализации горения, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Каждый из способов зажигания будет рассмотрен ниже.

Химическое зажигание зачастую представлено двумя конструктивными исполнениями. Для первого варианта в трубопровод горючего перед камерой сгорания добавляется пусковое горючее, которое отделяется от основного горючего и камеры сгорания прорывными мембранами. Во время запуска двигателя эти мембраны последовательно разрываются и в камеру попадает сначала пусковое горючее, которое самовоспламеняется с окислителем, а после – основное горючее, поддерживающее дальнейшее горение. Данный вариант исполнения химического зажигания является простым и надежным, однако не предусматривает многократных запусков двигателя. Альтернативным вариантом служит схема, при которой пусковое горючее находится в отдельном баке, имеет отдельные магистрали, клапаны и специальную пусковую форсунку. С поступлением команды на запуск, клапаны магистрали окислителя и пускового горючего открываются, компоненты поступают в камеру сгорания, где самовоспламеняются. Поступившее в камеру с небольшой задержкой основное горючее повышает интенсивность горения, и, с ростом давле-

ния, прекращается поступление в камеру пускового горючего. Подобная схема менее надежна по сравнению с первой, так как включает в себя большее число элементов, однако позволяет осуществлять многократный запуск двигателя.

Пиротехническое зажигание также зачастую выполняется по двум конструктивным схемам. Первый вариант предполагает закрепление пирозапального устройства (ПЗУ) на штанге и его расположение в камере сгорания. При этом для штанги основанием может служить как поверхность стартовой площадки для первой ступени, так и заглушка сопла – для прочих ступеней. Вторая схема исполнения предполагает размещение ПЗУ в полостях непосредственно на поверхности камеры сгорания в количестве двух-трех штук с целью повышения надежности системы зажигания. Принцип действия для обеих схем одинаков: по команде на запуск, ПЗУ воспламеняется, создавая факел из продуктов сгорания, который воспламеняет поступившие в камеру сгорания компоненты топлива. Пиротехнический метод зажигания прост и надежен, однако подходит лишь для однократного запуска двигателя.

Для электроискрового зажигания наиболее распространена схема, при которой на камеру сгорания устанавливается запальный блок с выходом в центре смесительной головки. В запальный блок подаются газообразные компоненты топлива, которые воспламеняются имеющейся внутри устройства электроискровой свечой. Образовавшийся в результате факел попадает в камеру сгорания, где воспламеняет компоненты топлива. Иногда запальный блок располагают и

перпендикулярно продольной оси камеры. Важно отметить, что данный способ зажигания в основном используется для двигателей, работающих на паре кислород-водород, так как требует наличия газообразных пусковых компонентов и минимального уровня примесей в них. Приведенная схема позволяет осуществлять многократный запуск двигателя, однако имеет ряд недостатков, делающих ее менее надежной по сравнению с более простыми способами зажигания. В частности, для образования искры требуется высокое электрическое напряжение, которое необходимо создать и поддерживать в условиях вакуума. Кроме того, сама свеча довольно требовательна к количеству примесей, которые имеются в полости запального блока [2].

Лазерное зажигание является одним из перспективных способов воспламенения компонентов топлива. Возможная конструкция устройства лазерного зажигания была разработана Конструкторским бюро химавтоматики на основе электроискрового запального устройства. Подача компонентов в камеру сгорания происходит с небольшой разницей во времени, что приводит к изменению соотношения компонентов в определенных точках. Источник лазерного излучения передает импульсы в заранее обозначенную точку, где, за счет изменяющихся параметров смеси компонентов, создаются оптимальные условия для воспламенения. Точка фокусировки излучения может находиться как на внутренней поверхности камеры сгорания, так и в объеме внутри нее. После того, как зажигание произошло, горение начинает распространяться по всей камере, а рост давления приводит к отключению лазерной системы. При этом узел ввода и фокусировки излучения, подобно электроискровому запальному устройству, может быть расположен как на смесительной головке, так и на боковой поверхности камеры [3]. Исследованиями в области лазерного зажигания занимается также Государственный научный центр имени М. В. Келдыша. Проведенные эксперименты показали, что надежное воспламенение возможно как при боковой, так и при осевой стыковке лазера. Помимо этого, образовавшийся в результате многократных запусков осадок продуктов сгорания не мешал работе системы. Дальнейшие исследования позволили определить оптимальные зоны фокусировки излучения, которые обеспечивают высокую надежность зажигания, для пары компонентов кислород-керосин [4; 5]. Преимуществами лазерного зажигания являются практически неограниченная многократность запусков подобной системы, а также ширина диапазона рабочих давлений и возможность выбора зоны начала горения. Недостатками данного способа являются сложность и, как следствие, низкая надежность лазерных систем по сравнению с другими способами.

Другим перспективным способом воспламенения компонентов топлива рассматривается электроплазменное зажигание. Данный способ является развитием идеи электроискрового зажигания. На камере сгорания располагается запальное устройство, содержащее в себе плазменную свечу зажигания, и соединенное с полостью камеры каналом. Суть работы

подобной системы заключается в создании электрического разряда между контактами, находящимися в заполненной газом рабочей полости. Чаще всего эта полость заполнена одним из компонентов топлива или их смесью в газообразном состоянии. Под воздействием электрического разряда, газ в полости нагревается до высоких температур и расширяется, попадая в камеру сгорания, где происходит воспламенение основных компонентов топлива.

Существуют разработки, в которых комбинируются различные системы зажигания: сотрудниками Центрального научно-исследовательского института машиностроения был запатентован способ зажигания, в котором применяются как лазерный, так и электроплазменный метод. Общей проблемой для электроплазменного зажигания в ракетной технике является неприменимость уже имеющихся аналогов для авиационных газотурбинных двигателей и двигателей внутреннего сгорания, так как подобные низковольтные системы не могут обеспечить надежного воспламенения компонентов ракетного топлива. Именно поэтому в случае ракетных двигателей электроплазменная система зажигания требует увеличения напряжения или добавления иных источников энергии. Конструктивно запатентованная система представляет собой запальное устройство, расположенное на поверхности камеры сгорания, и соединенное с полостью камеры сгорания каналом. Полость запального устройства содержит в себе запальную свечу, а один из концов запального устройства представляет собой фокусирующую линзу. Через эту линзу в ЗУ поступает излучение от импульсного лазерного устройства, точка фокусировки которого находится в объеме полости. При поступлении команды на запуск двигателя, компоненты топлива поступают в запальное устройство, где воспламеняются от электрической свечи и получают энергию в результате оптического пробоя от дополнительного источника энергии, которым служит импульсное лазерное устройство. Основными преимуществами электроплазменного метода воспламенения являются возможность многократного запуска двигателя, а также возможность создания запального факела с высокой температурой. К недостаткам данной системы относятся сложность конструкции, необходимость применения высоковольтной схемы питания, а также повышенные требования к параметрам запального газа для свечи.

Особое место среди проблем проектирования ЖРД занимает воспламенение криогенных компонентов топлива. В настоящее время ведутся активные исследования в области кислородно-метановых двигателей как в России, так и в других странах мира, что лишь увеличивает необходимость создания надежной системы зажигания для криогенных компонентов. Основной сложностью в подобной топливной паре является низкая температура рабочих жидкостей, которая нарушает работу электроискровых запальных устройств. Дополнительные трудности при воспламенении может создать соотношение компонентов, которое не располагает к легкой инициализации процесса горения. Учитывая другие современные веяния в проектировании космической техники, такие как снижение стоимости вывода полезной нагрузки на

орбиту и многократность использования аппаратов, становится понятно, что прочие методы воспламенения также не отвечают или не полностью отвечают заявленным требованиям. С подобной точки зрения наиболее перспективно выглядит именно лазерное зажигание, так как физический контакт устройства с компонентами топлива ограничен или отсутствует, а воспламенение происходит за счет оптического пробоя среды. Имеющиеся наработки по вопросу лазерного зажигания в настоящий момент требуют повышения их надежности, так как для некоторых топливных пар все еще остаются актуальными такие трудности, как образование осадка на фокусирующей линзе или попадание на нее крупных капель жидкости, что препятствует прохождению оптического импульса и нарушает работу системы. Низкие температуры компонентов также приводят к определенным изменениям в конструкции запальных устройств, так как контакт импульсного лазерного устройства с охлаждаемыми топливом поверхностями способен привести к сбоям в его работе. По этой причине блоки, генерирующие сигнал, который затем передается на фокусирующую линзу через оптическое волокно, необходимо снабжать теплоизоляцией или же выносить на значительные расстояния от источника низких температур.

Развитие систем зажигания для ракетных двигателей является крайне важной задачей, так как не только увеличивает общую надежность устройства, но и расширяет рамки их многократного использования, а также позволяет уменьшить необходимый объем топлива. На фоне коммерциализации космической отрасли и обострения конкуренции, решение данных вопросов становится ключевым в сохранении конкурентоспособности.

#### Библиографические ссылки

1. Добровольский М. В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: учебник для вузов / под ред. Д. А. Ягодникова. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 488 с.

2. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей : учебник для студентов вузов / Г. Г. Гахун [и др.] ; под ред. Г. Г. Гахуна. М. : Машиностроение, 1989. 424 с.

3. Веселов А. В., Фуфачев Н. С. Лазерное зажигание в ЖРД // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : тезисы IX Всерос. науч.-практ. конф. (8–12 апреля 2013, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. С. 50–51.

4. Ребров С. Г., Голиков А. Н., Голубев В. А. Лазерное воспламенение ракетных топлив в модельной камере сгорания // Труды МАИ. 2012. № 53.

5. Ребров С. Г., Голубев В. А., Голиков А. Н. Лазерное зажигание топлива кислород-керосин в ракетной технике: от запальных устройств к маршевым ракетным двигателям // Труды МАИ. 2017. № 95.

#### References

1. Dobrovolsky M. V. Liquid rocket engines. Fundamentals of design / ed. D. A. Yagodnikov. 2-nd ed., Reworked and supplemented. M. : Published MSTU. N. E. Bauman, 2005. 488 p.

2. Design and design of liquid rocket engines / G. G. Gahun [et al.] ; Ed. G. G. Gakhun. M. : Mechanical Engineering, 1989. 424 p.

3. Veselov A. V., Fufachev N. S. Laser ignition in liquid rocket engines // Actual problems of aviation and astronautics: theses of the IX All-Russian scientific-practical conference. Conf. (8–12 April 2013, Krasnoyarsk): 2 vol. / under the total. Ed. Y. Y. Loginov; Sib. state. aerospace. un-ty. Krasnoyarsk, 2013. P. 50–51.

4. Rebrov S. G., Golikov A. N., Golubev V. A. Laser ignition of rocket fuels in a model combustion chamber // Proceedings of the MAI. 2012. № 53.

5. Rebrov S. G., Golubev V. A., Golikov A. N. Laser ignition of oxygen-kerosene fuel in rocket technology: from ignition devices to marching rocket engines // Proceedings of the MAI. 2017. № 95.



**Секция**

**«ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ  
В КОНСТРУКЦИЯХ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ,  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК  
И СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ»**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПОДШИПНИКА\*

Е. Н. Васильев<sup>1</sup>, В. А. Деревянко, Д. П. Емельянов

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44

<sup>1</sup>E-mail: ven@icm.krasn.ru

*Проведены экспериментальные и расчетные исследования температурного режима подшипника качения электронасосного агрегата.*

*Ключевые слова: электронасосный агрегат, подшипник, температурный режим, трение.*

## INVESTIGATION OF TEMPERATURE REGIME OF BEARING

E. N. Vasil'ev<sup>1</sup>, V. A. Derevyanko, D. P. Emel'yanov

<sup>1</sup>Institute of Computational Modelling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>1</sup>E-mail: ven@icm.krasn.ru

*Experimental and computational studies of the temperature regime of the rolling bearing of the electric pump unit are carried out.*

*Keywords: electric pump unit, bearing, temperature regime, friction.*

Ресурс электронасосного агрегата (ЭНА) системы терморегулирования КА в значительной степени определяется условиями работы подшипников, которые в первую очередь зависят от наличия и свойств теплоносителя, при этом теплоноситель одновременно выполняет роль смазочного материала (СМ). Повышение температуры в зоне контакта трущихся поверхностей может приводить к изменению свойств СМ и даже к осушению трущихся поверхностей и образования на них парового слоя. Температурный режим трущихся поверхностей подшипника зависит от мощности тепловыделения и условий теплоотдачи во внешнюю среду, в роли которой могут выступать как теплоноситель, так и элементы конструкции ЭНА.

Мощность тепловыделения в подшипнике складывается в основном из потерь на трение, возникающих вследствие проскальзывания в местах контакта тел качения с внутренним и внешним кольцами и сепаратором, несовершенной упругости материала тел качения и колец и механических потерь в СМ. Переходя в теплоту, эти потери вызывают повышение температуры узлов подшипника. Величина потерь определяется конструкцией подшипника, режимами его работы и смазки. Точный расчет тепловыделения и температурного режима в подшипнике с учетом явлений, возникающих в СМ и в упруго деформирующихся поверхностях, взаимодействующих в процессе трения тел, является очень сложной задачей [1–3]. Кроме того, результаты такого расчета все равно сильно бу-

дут зависеть от реальных коэффициентов трения, теплообмена и прочих величин, которые наиболее точно можно получить только в результате измерений. Поэтому для определения мощности тепловыделения были проведены эксперименты. Корпус подшипника был запрессован в алюминиевую обечайку, с внешним диаметром 37 мм, толщиной 10 мм и весом 22 г. Обечайка в данном случае выполняла роль накопителя тепловой энергии. Эксперименты проведены в подшипнике при сухом трении и при наличии СМ. Для проведения эксперимента при сухом трении подшипник был тщательно промыт в бензине и ацетоне, затем просушен. Для смазки было использовано автомобильное трансмиссионное масло ATF-Z1. Для привода использовалась электродрель с частотой вращения холостого хода 2200 об/мин. Динамика изменения температуры фиксировалась с помощью тепловизора, стоп-кадр приведен на рис. 1. Мощность тепловыделения рассчитывалась по приросту температуры на начальном этапе вращения и нагрева (первые 60 с), когда изменения температуры и отводимая во внешнюю среду тепловая мощность были сравнительно невелики. Рассчитанные значения мощности тепловыделения в подшипнике без нагрузки на внешнем кольце составили без смазки 3 Вт и со смазкой 0,7 Вт. Пересчет мощности тепловыделения для частоты 6000 об/мин, характерной для ЭНА, дает примерно втрое большие значения 9 Вт и 2 Вт.

\* 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.



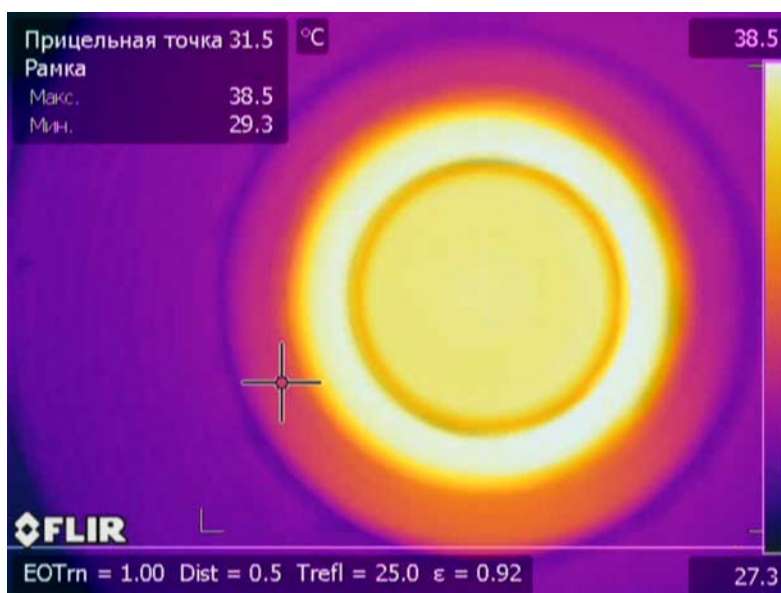


Рис. 1. Стоп-кадр из тепловизионной видеотермограммы

Эти значения могут служить только оценочным ориентиром для дальнейшего использования в математической модели, поскольку в эксперименте были другие условия нагрузки и смазки, кроме того, при работе подшипника, находящегося полностью в жидкой среде, на его движущиеся элементы действует дополнительная сила сопротивления, приводящая к некоторому повышению тепловыделения.

Температурный режим подшипника, работающего в ЭНА, рассчитывался на основе численного решения уравнения теплопроводности для объема внутреннего кольца, которое в основном контактирует с СМ. Для решения использовался метод суммарной аппроксимации с расщеплением задачи по пространственным координатам [4]. Значения теплофизических параметров материала заданы соответствующими стали 95×18, коэффициент теплопроводности  $\lambda = 24,3$  Вт/(м·К), удельная теплоемкость  $c = 483$  Дж/(кг·К), плотность  $\rho = 7750$  кг/м<sup>3</sup> [5]. Подвод теплоты задавался усредненной величиной для полосы, соответствующей месту контакта шарика с кольцом (рис. 2). Отвод теплоты во внешнюю среду задавался со значением коэффициента теплообмена  $\alpha = 800$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

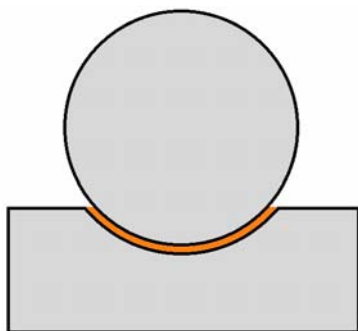


Рис. 2. Схема контакта шарика с кольцом подшипника

В результате расчета определены значения разницы температуры в объеме внутреннего кольца подшипника и внешней среды. Полученный прирост  $\Delta T$  является добавкой к значению температуры  $T_0$  окружающего подшипник СМ или корпуса ЭНА. Для мощности тепловыделения 2 Вт, соответствующей работе без нагрузки, величина  $\Delta T$  составила 11 °С в месте контакта и 9 °С на боковой поверхности кольца. При работе подшипника с нагрузкой в составе ЭНА мощность тепловыделения на трущихся поверхностях будет выше, что приведет к пропорциональному росту  $\Delta T$ .

Оценка возможности развития осушения поверхностей может быть основана на диаграмме состояний используемого в ЭНА теплоносителя, по которой переход в паровую фазу, например, при давлении 30 кПа происходит уже при 60 °С. Полученного повышения температуры для штатного режима работы недостаточно для осушения трущихся поверхностей в подшипнике и образования на них парового слоя. Однако переход к режиму сухого трения возможен при возникновении различных нештатных ситуаций: увеличении нагрузки, приводящее к росту тепловыделения; снижению давления теплоносителя в контуре; попадании парового или воздушного пузыря в подшипник. Такие даже кратковременные ситуации приведут к нагреву температуры трущихся поверхностей и к необратимому переходу к режиму сухого трения. При этом тепловыделение и прирост  $\Delta T$  будет уже существенно выше, что неизбежно приведет к преждевременному выходу подшипника и всего ЭНА из строя.

Проведенные эксперименты и расчеты позволили оценить тепловыделение и температурный режим трущихся поверхностей подшипника. Для повышения точности моделирования необходимо приблизить условия нагрузки, смазки и теплообмена подшипника к реальным условиям в ЭНА.

**Библиографические ссылки**

1. Коднир Д. С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин. М. : Машиностроение, 1976. 304 с.
2. Коднир Д. С., Жильников Е. П., Байбородов Ю. И. Эластогидродинамический расчет деталей машин. М. : Машиностроение, 1988. 166 с.
3. Нарышкин В. Н., Коросташевский Р. В. Подшипники качения : справ.-каталог. М. : Машиностроение, 1984. 280 с.
4. Самарский А. А. Теория разностных схем. М. : Наука, 1989. 616 с.
5. Григорьев И. С., Мейлихов Е. З. Физические величины : справочник. М. : Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

**References**

1. Kodnir D. S. *Kontaktная gidrodinamika smazki detalei mashin* [Contact hydrodynamics of lubrication of

machine parts]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1976. 304 p.

2. Kodnir D. S., Zhilnikov E. P., Bajborodov Y. I. *Elastogidrodinamicheskij raschyot detalej mashin* [Elastohydrodynamic calculation of machine parts]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1988. 160 p.

3. Naryshkin V. N., Korostashevskij R. V. *Podshipniki kachenija. Spravochnik-katalog*. [Rolling bearings. Reference book catalog]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1984. 280 p.

4. Samarskii A. A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 616 p.

5. Grigoriev I. S., Meilikhov E. Z. *Phizicheskie velichiny : spravochnik* [Physical data, handbook] Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 1232 p.

© Васильев Е. Н., Деревянко В. А.,  
Емельянов Д. П., 2018

УДК 537.32

## РАСЧЕТ ХОЛОДИЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ С УЧЕТОМ ТЕРМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ\*

Е. Н. Васильев

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
E-mail: ven@icm.krasn.ru

*Определено влияние термических сопротивлений на холодильный коэффициент системы термоэлектрического охлаждения теплонагруженных элементов радиоэлектронной аппаратуры.*

*Ключевые слова: холодильный коэффициент, термоэлектрическая система охлаждения, термическое сопротивление.*

## CALCULATION OF COEFFICIENT OF PERFORMANCE OF THERMOELECTRIC COOLING SYSTEM WITH THERMAL RESISTANCES ACCOUNT

E. N. Vasil'ev

Institute of Computational Modelling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
E-mail: ven@icm.krasn.ru

*Influence of thermal resistances on the coefficient of performance of the thermoelectric cooling system of heat-loaded elements of radio electronic equipment is defined.*

*Keywords: coefficient of performance, thermoelectric cooling system, thermal resistance.*

Одним из перспективных направлений для охлаждения и терморегулирования теплонагруженных элементов (ТНЭ) радиоэлектронной аппаратуры является применение термоэлектрических систем охлаждения и терморегулирования (ТЭСОТ), которые обладают рядом достоинств по сравнению с другими системами охлаждения, а именно: возможностью плавного регулирования температуры в достаточно широком диапазоне путем изменения величины и направления тока питания термоэлектрических модулей (ТЭМ), малой тепловой инерционностью, высокой надежностью, отсутствием движущихся частей, компактностью и небольшим весом, бесшумностью работы. В тоже время термоэлектрический способ охлаждения характеризуется сравнительно невысоким холодильным коэффициентом COP (coefficient of performance), что обусловлено как рабочими характеристиками ТЭМ, так и наличием потерь температурного перепада на термических сопротивлениях систем подвода и отвода теплоты.

Рассмотрим конструкцию ТЭСОТ для охлаждения ТНЭ 1, составными элементами которой являются теплораспределяющая пластина (ТРП) 2, ТЭМ 3 и кулер 4, в местах соединения элементов имеются тепловые контакты 5 (рис. 1). ТРП выравнивает распределение тепловой мощности, поступающей от ТНЭ на поверхность ТЭМ. ТЭМ выполняет функцию теплового насоса, передающего теплоту с холодной

стороны на горячую. Кулер отводит во внешнюю среду суммарную тепловую мощность, выделяемую как ТНЭ, так и ТЭМ. Эффективность ТЭСОТ зависит от рабочих характеристик и параметров всех элементов конструкции и их взаимного влияния [1–6]. В настоящей работе исследуется влияние термических сопротивлений ТРП, кулера и примыкающих к ним тепловых контактов на холодильный коэффициент ТЭСОТ.

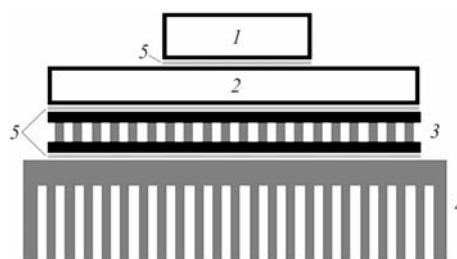


Рис. 1. Схема ТЭСОТ

При проведении расчетов в качестве исходных данных необходимо использовать рабочие характеристики ТЭМ. Такие характеристики можно получить из расчетов [7]. Для серийно выпускаемых ТЭМ наиболее доступной и достоверной информацией по их параметрам и рабочим характеристикам является сопроводительная документация производителя.

\* 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 № 18-47-242005.

В данной работе анализ проведен на примере серийного модуля «S-127-14-11» производства НПО «Кристалл». Для расчета характеристик ТЭСОТ использовалась математическая модель, позволяющая определять характеристики охлаждения в зависимости от силы тока  $I$  электропитания ТЭМ, термических сопротивлений систем теплоотвода (кулера) и теплоподвода (ТРП), мощности тепловыделения ТНЭ [4; 5].

Значение COP численно равно отношению холодопроизводительности ТЭМ к потребляемой им электрической мощности. При нулевых значениях термических сопротивлений кулера, ТРП и тепловых контактов рассчитанные графики COP соответствуют аналогичным графикам производителя. Учет значений термических сопротивлений приводит к снижению COP. На рис. 2 приведены зависимости COP от силы тока питания ТЭМ при разнице температур между посадочным местом ТНЭ и внешней средой  $\Delta T = -10$  °C для значений суммарного термического сопротивления кулера и примыкающих к нему тепловых контактов  $R_s = 0, 0,1, 0,3$  и  $0,5$  K/W. К аналогичному снижению COP приводит учет термического сопротивления ТРП. Следует отметить, что потери температурного перепада на термических сопротивлениях систем подвода и отвода теплоты влияют на величину COP неявным образом. COP при прочих неизменных условиях снижается с увеличением температурного перепада  $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$ , производимого ТЭМ. Поэтому при заданном значении  $\Delta T$  величину  $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$  необходимо увеличивать для компенсации потерь температурного перепада на термических сопротивлениях, что приводит к соответствующему снижению COP для ТЭСОТ в целом. Расчет и анализ характерных значений термических сопротивлений кулера, ТРП и тепловых контактов представлен в работах [5; 6].

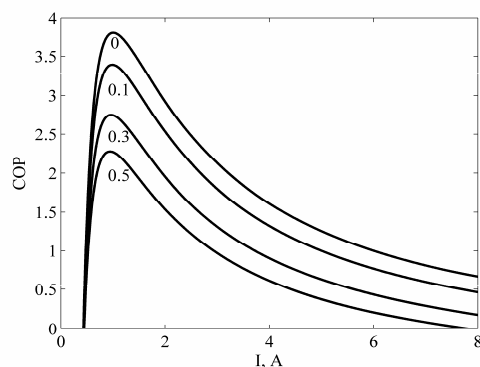


Рис. 2. Зависимость COP от силы тока при значениях  $R_s = 0, 0,1, 0,3$  и  $0,5$  K/W при значениях  $\Delta T = -10$  °C

Таким образом, проведенные расчеты показали значительное влияние термических сопротивлений систем подвода и отвода теплоты на холодильный коэффициент ТЭСОТ.

#### Библиографические ссылки

1. Васильев Е. Н. Влияние термических сопротивлений на характеристики термоэлектрического охлаждения теплонагруженных элементов радиоэлектронной аппаратуры // Решетневские чтения : материалы

XXI Междунар. науч. конф. (08–11 нояб. 2017, Красноярск). Красноярск, 2017. Ч. 1. С. 233–234.

2. Васильев Е. Н., Деревянко В. А. Анализ эффективности применения термоэлектрических модулей в системах охлаждения радиоэлементов // Вестник СибГУ. 2013. № 4 (50). С. 9–13.

3. Vasil'ev E. N. Calculation of characteristics of thermoelectric cooling system of heat-loaded elements of radio electronic equipment // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 1. С. 17–21.

4. Васильев Е. Н. Расчет и оптимизация режимов термоэлектрического охлаждения теплонагруженных элементов // Журнал технической физики. 2017. Т. 87, № 1. С. 80–86.

5. Васильев Е. Н. Оптимизация режимов термоэлектрического охлаждения теплонагруженных элементов с учетом термического сопротивления теплоотводящей системы // Журнал технической физики. 2017. Т. 87, № 9. С. 1290–1296.

6. Васильев Е. Н. Расчет термического сопротивления теплораспределителя системы охлаждения теплонагруженного элемента // Журнал технической физики. 2018. Т. 88, № 4. С. 487–491.

7. Васильев Е. Н. Математическая модель для расчета характеристик термоэлектрических модулей охлаждения // Журнал Сиб. федер. ун-та. Сер. «Техника и технология». 2015. Т. 8, № 8. С. 1017–1023.

#### References

1. Vasil'ev E. N. [Thermal resistances influence on characteristics of thermoelectric cooling of heat-loaded elements of radio electronic equipment]. *Materialy XX Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XVII Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2017, P. 233–234. (In Russ.)

2. Vasil'ev E. N., Derevyanko V. A. [Analysis of thermoelectric modules efficiency in cooling systems]. *Vestnik SibSAU*. 2013, No. 4 (50), P. 9–13. (In Russ.)

3. Vasil'ev E. N. Calculation of characteristics of thermoelectric cooling system of heat-loaded elements of radio electronic equipment // *Siberian Journal of Science and Technology*, 2018, T. 19, № 1, P. 17–21.

4. Vasil'ev E. N. Calculation and Optimization of Thermoelectric Cooling Modes of Thermally Loaded Elements // *Technical Physics*. 2017. Vol. 62, No. 1, P. 90–96.

5. Vasil'ev E. N. Optimization of Thermoelectric Cooling Regimes for Heat-Loaded Elements Taking into Account the Thermal Resistance of the Heat-Spreading System // *Technical Physics*. 2017, Vol. 62, No. 9, P. 1300–1306.

6. Vasil'ev E. N. Calculation of the Thermal Resistance of a Heat Distributer in the Cooling System of a Heat-Loaded Element // *Technical Physics*. 2018. Vol. 63, No. 4, P. 471–475.

7. Vasil'ev E. N. [Mathematical Model for the Calculation of the Characteristics of the Cooling Thermoelectric Modules]. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2015, Vol. 8, No. 8. P. 1017–1023. (In Russ.)

УДК 629.7

## ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ РАБОЧИХ КОЛЕС МИКРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

М. А. Ермаков, А. В. Тоньшина, И. Ю. 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: mark.ermakov@gmail.com

*Рассматривается возможность применения аддитивных технологий при изготовлении экспериментальных образцов рабочих колес и направляющих аппаратов микротурбинных установок. Применение аддитивных технологий позволяет создавать рабочие колеса с заданным профилем лопатки в кратчайшие сроки.*

*Ключевые слова: аддитивные технологии, FDM, SLA, 3d-печать, микротурбинные установки, физическое моделирование.*

## APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE MANUFACTURING OF MICROTURBINE WORKING WHEELS

M. A. Ermakov, A. V. Tonshina, I. Yu. Yermiyenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: mark.ermakov@gmail.com

*Present article considers possibilities of applying additive technologies in the manufacture of experimental samples of microturbine working wheels and guiding devices. Additive technologies allows the creation of working wheels with a given blade profile in the shortest possible time.*

*Keywords: additive technologies, FFF, SLA, 3d-printing, microturbine units, physical modeling.*

Физическое моделирование энергетических установок различных типов составляет существенную часть объема экспериментальных исследований. Основными задачами физического моделирования являются оценка энергетической эффективности, границ работоспособности и особенностей функционирования установок [1]. При этом возникают задачи проектирования и изготовления экспериментальных образцов, которые требуют оперативного решения. Аддитивные технологии позволяют в кратчайшие сроки решить данный вопрос.

В настоящей работе рассматривается применение аддитивных технологий для изготовления экспериментальных рабочих колес микротурбинных установок. Микротурбинные установки предназначены для выработки электрической энергии. В настоящее время это направление исследований является особенно актуальным в связи с наметившейся тенденцией модернизации энергетической отрасли как в России, так и за рубежом.

Основной элемент установки – рабочее колесо, которое преобразует кинетическую энергию потока в механическую энергию на валу. Вследствие компактности размеров микротурбинные установки не имеют ограничений в выборе мест для монтажа, мобильны и автономны [2].

Ввиду сложности протекающих в узлах микротурбин газодинамических процессов физический экспе-

римент является одним из основных способов их проектирования и исследования. Значительный объем вариантов конфигурации проточной части обуславливает необходимость задействования большого числа экспериментальных сборок [3]. В этой связи вопрос изготовления деталей экспериментальных микротурбинных узлов стоит особенно остро.

Одним из эффективных направлений реализации технологии изготовления деталей для экспериментальной микротурбинной установки является применение технологий прототипирования, таких как FDM- и SLA-печать.

FFF-технология (Fused Filament Fabricating, изготовление методом наплавления материала) набирающая все большую популярность в самых разных отраслях, таких как: прототипирование, макетирование, протезирование, машиностроение, авиастроение и др., представляет собой технологию, позволяющую с минимальными затратами и отходами изготовить деталь из большого спектра полимерных материалов, таких как: PLA (полилактид), ABS (акрилонитрилбутадиенстирол), PET(полиэтилен), SBS(сополимер бутадиенстирол), HIPS (ударопрочный полистирол) и др. [4]. На рис. 1 отображается разница между идеализированной трехмерной моделью изделия и смоделированным результатом 3d-печати. На рис. 2. представлено изготовленное методом 3d-печати рабочее колесо.

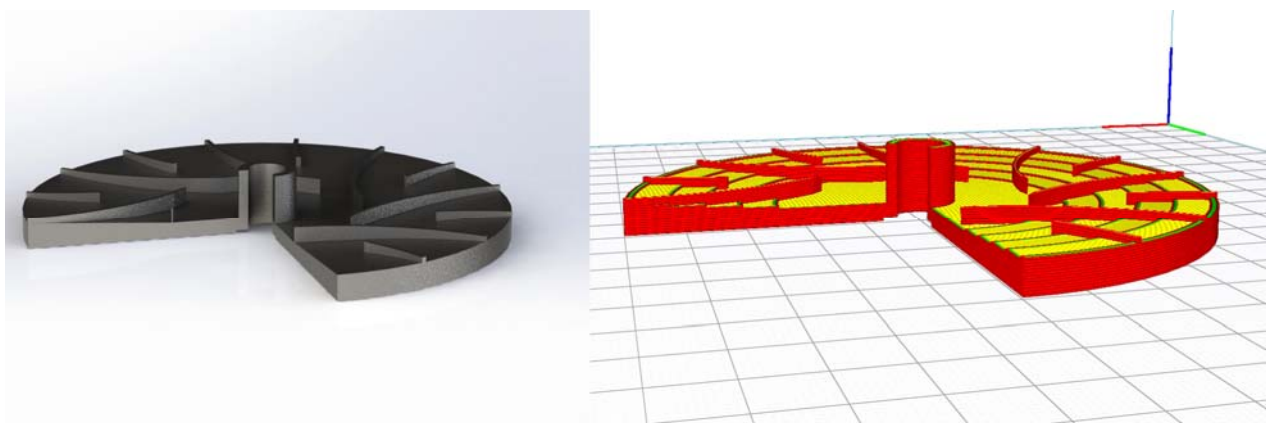


Рис. 1. Сравнение идеализированной трехмерной модели рабочего колеса микротурбинной установки с результатами компьютерного моделирования 3d-печати изделия



Рис. 2. Изготовленное методом 3D-печати колесо микротурбинной установки

Качество, шероховатость поверхностей и отклонение прототипа от чертежа – зависит от уровня и стоимости оборудования, на котором непосредственно будет происходить изготовление. Но, тем не менее, даже 3d-принтеры любительского сегмента позволяют изготавливать различные изделия с отклонениями не более чем десятые доли миллиметра. Шероховатость при этом достигается химическими или слесарными методами, которые более подробно будут описаны в материалах конференции.

SLA-технология (Stereolithography, лазерная стереолитография) в свою очередь, использует менее известные материалы – так называемые фотополимеры, имеющие свойство отвердевать под действием ультрафиолетового излучения.

Главные преимущества этой технологии, относительно FFF – наилучшее качество поверхности и точность изготовления; недостатки – дороговизна оборудо-

вания и исходного материала. Технология SLA, помимо тех отраслей, в которых применяется FFF, большую известность и применение получила в медицине и протезировании [5].

Таким образом, применение аддитивных технологий позволяет качественно и в кратчайшие сроки создавать рабочие колеса микротурбинных установок с заданным профилем лопатки.

#### Библиографические ссылки

1. Баренбойм А. Б. Малорасходные фреоновые турбокомпрессоры. М. : Машиностроение, 1974. 224 с
2. Пфлейдерер К. Л. Лопаточные машины для жидкостей и газов. М. : Гостехиздат, 1960. 684 с.
3. Теория пространственного пограничного слоя в гидродинамике турбомашин : монография / А. А. Кишкин, В. П. Назаров, Д. А. Жуйков, и др. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. 250 с.

4. Зеленко М. А., Нагайцев М. В., Добвыш В. М. Аддитивные технологии в машиностроении : пособие для инженеров. М. : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.

5. Шишковский И. В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения. СПб. : Питер, 2015. 348 с.

#### References

1. Barenbojm A. B. *Maloraskhodnye freonovye turbokompressory* [Low-Flow Freon Turbochargers]. Moscow, Mashinostroenie Publ, 1974. 224 p.

2. Pfljederer K. L. *Lopatochnye mashiny dlya zhidkostej I gazov* [Turbines For Liquids and Gases]. Moscow, Gostekhizdat Publ, 1960. 684 p.

3. Kishkin A. A., Nazarov V. P., Zhujkov D. A., Chernenko D. V. *Teoriya prostranstvennogo pograni-*

*nogo sloya v gidrodinamike turbomashin: monografiya* [Theory of the spatial boundary layer in the hydrodynamics of turbomachines: monograph]; Krasnoyarsk, SIBGAU Publ, 2013. 250 p.

4. Shishkovskij I. V. *Osnovy additivnyh tekhnologij vysokogo razresheniya*. [Basics Of Additive High-resolution Technologies] St. Petersburg, Piter Publ, 2015. 348 p.

5. Zelenko M. A., Nagajcev M. V., Dobvysh V. M. *Additivnye tekhnologii v mashinostroenii. Posobie dlya inzhenerov* [Additive Technologies In Mechanical Engineering. Manual For Engineers]. Moscow, GNC RF FGUP «NAMI» Publ, 2015. 220 p.

© Ермаков М. А., Тоньшина А. В.,  
Ермиенко И. Ю., 2018

УДК 697.94

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ФИЗИЧЕСКОГО МАКЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА МОДЕЛЬНОМ РАБОЧЕМ ТЕЛЕ

М. А. Ермаков, Ю. Н. Шевченко, А. А. Кишкин, М. М. Попугаев, А. В. Делков

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

*В настоящих материалах прорабатывается программа проведения испытаний физического макета энергетической установки. Рассматриваются основные влияющие на энергетику энергетической установки параметры. Оцениваются проблемы и перспективы физического моделирования энергетических установок.*

*Ключевые слова: испытания, энергетическая установка, микротурбина, обработка результатов эксперимента.*

## DEVELOPMENT OF THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION PROGRAM FOR PHYSICAL LAYOUT OF THE ENERGY UNIT ON THE MODEL WORKING FLUID

M. A. Ermakov, Ju. N. Shevchenko, A. A. Kishkin, M. M. Popugayev, A. V. Delkov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: mark.ermakov@gmail.com

*This article covered the program for experimental investigation of the physical model of the power unit. The main influencing parameter, that determines the energy efficiency of the power unit, are considered. Problems and prospects of physical modeling of power units are estimated.*

*Keywords: experimental investigation, power unit, microturbine, processing of experimental results.*

Основой расчета энергетических установок является исследование процессов тепло-, массо- и энергообмена в граничных условиях базовых элементов установки [1]. В общем случае цель таких расчетов – определение производительности и энергетической эффективности установки. Сложность конструкции и специфические особенности процессов теплопередачи (нестационарность процессов теплообмена, комплексный характер коэффициентов теплопередачи и т. д.) и энергообмена (зависимость удельных параметров от конструктивного исполнения, наличие значительного числа потерь в энергетическом балансе, необходимость учета изменения свойств рабочих тел) требуют сложных методов проектирования, в то время, как необходимость проведения сравнительного анализа различных конструкций установки предъявляет к таким методам требования достаточной простоты для целей оперативного анализа.

Традиционно при проектировании энергетических установок совместно используются теоретический и экспериментальный методы, с помощью которых определяются гидродинамические (распределение скоростей, давлений) и теплофизические (коэффициент теплоотдачи, количество переданного тепла, распределение температур) характеристики [2]. Несмотря на то, что эксперимент по-прежнему играет очень важную роль, особенно при исследовании сложных течений, во многих работах проявляется тенденция ис-

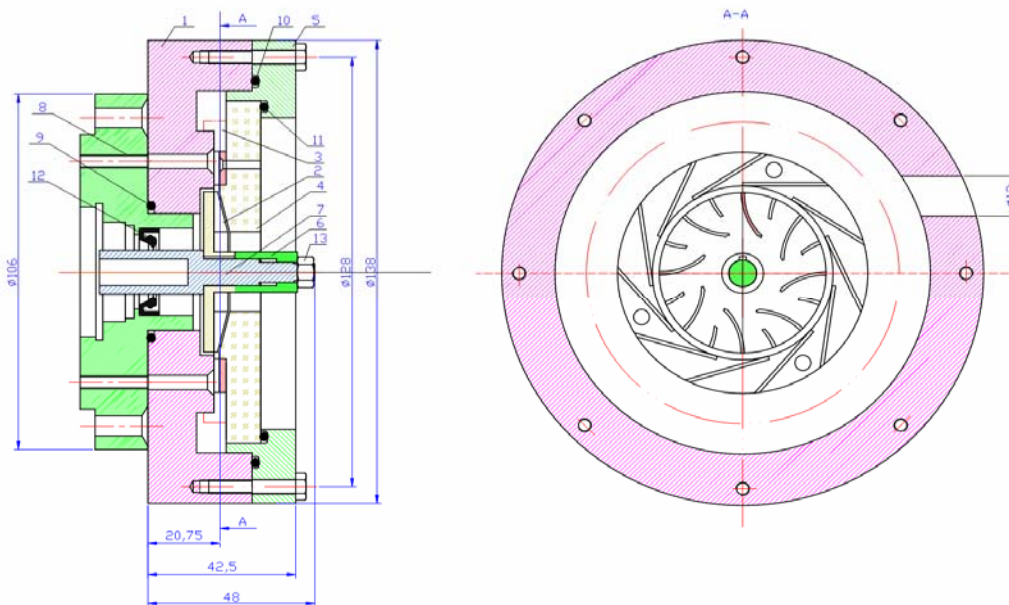
пользования теоретических моделей с использованием физических законов. Так или иначе, но и для использования таких моделей, и для построения корреляционных зависимостей необходимо их экспериментальное подтверждение.

В настоящей работе рассматриваются задачи физического моделирования макета энергетической установки, представляющей собой микротурбинный узел. Подобные установки могут работать на различных рабочих телах, однако в рамках настоящего исследования использовалось модельное рабочее тело – воздух, как наиболее доступное. Конструкция узла представлена на рисунке.

Принцип работы физического макета основан на преобразовании кинетической энергии потока в работу на валу микротурбинного узла. Основными элементами микротурбинного узла являются: рабочее колесо 2, подводящее устройство 3, вал 7. Для возможности визуализации вращения колеса использовалась крышка 4 из плексигласа.

Энергетические характеристики микротурбинного узла определяются удельными параметрами термодинамического цикла и геометрией проточной части турбины. Основным производящим процессом цикла является процесс расширения на турбине с совершением работы, который в основном определяет термический КПД установки и уровень полезной мощности [3].





Конструкция исследуемого микротурбинного узла

При составлении программы испытаний физического макета учитывались следующие влияющие параметры:

- высота лопатки на входе и выходе для рабочего колеса оказывает непосредственное влияние на уровень удельной работы;
- радиус колеса, определяющий значение окружной скорости;
- плотность рабочего тела, влияющая на величину вырабатываемой мощности;
- угловая скорость вращения рабочего колеса;
- энтальпия рабочего тела на входе в турбинный узел.

С учетом влияющих параметров экспериментальные исследования проводились в несколько серий при варьировании типов рабочих колес, направляющих аппаратов. В качестве характеризующих серию показателей использовались следующие:

- диаметр рабочего колеса (использовались колеса с диаметром 45, 48 и 100 мм);
- высота лопатки рабочего колеса на входе (использовались колеса с высотой лопатки на входе 1, 2, 3 мм);
- тип подводящего устройства (кольцевые устройства с проточной частью различной конфигурации);
- наличие или отсутствие направляющего аппарата.

Для каждой серии экспериментальных исследований проводился ряд замеров параметров для установленных режимов в зависимости от скорости вращения ротора турбины, начиная с максимальной. Для каждой серии экспериментальных исследований формировались протоколы испытаний.

Для обработки результатов экспериментальных исследований использовались основные соотношения из теории турбомашин. Обработка проходила в три стадии: обработка результатов измерений в сечении; обработка результатов на участках; вычисление энергетических характеристик ступени.

По результатам проведенной экспериментальной работы были сделаны следующие выводы:

- снижение величины высоты лопатки рабочего колеса ведет к увеличению удельной окружной работы рабочего колеса центростремительной турбины;
- при достижении предельного физико-технологического уровня уменьшения высоты лопатки рабочего колеса, следует переходить к турбинам иного типа: турбинам трения, вихревым и т. п.;
- необходимо продолжить экспериментальные исследования в области комплексных энергетических испытаний ступени турбины, с целью учета эффекта интерференции местных сопротивлений (подводящего канального аппарата и рабочего колеса), поскольку они находятся в предельной зоне длины влияния по отношению друг к другу.

#### Библиографические ссылки

1. Пфлейдерер К. Л. Лопаточные машины для жидкостей и газов. М. : Гостехиздат, 1960. 684 с.
2. Баренбойм А. Б. Малорасходные фреоновые турбокомпрессоры. М. : Машиностроение, 1974. 224 с.
3. Теория пространственного пограничного слоя в гидродинамике турбомашин : монография / А. А. Кишкин, В. П. Назаров, Д. А. Жуйков, и др. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск. 2013. 250 с.

#### References

1. Barenbojm A. B. *Maloraskhodnye freonovye turbokompressory* [Low-Flow Freon Turbochargers]. Moscow, Mashinostroenie Publ, 1974. 224 p.
2. Pfljederer K.L. *Lopatochnye mashiny dlya zhidkostej I gazov* [Turbines For Liquids and Gases]. Moscow, Gostekhizdat Publ, 1960. 684 p.
3. Kishkin A. A., Nazarov V. P., Zhujkov D. A. *Teoriya prostranstvennogo pogranichnogo sloya v gidrodinamike turbomashin: monografiya* [Theory of the spatial boundary layer in the hydrodynamics of turbomachines: monograph]; Krasnoyarsk, SIBGAU Publ, 2013. 250 p.

© Ермаков М. А., Шевченко Ю. Н., Кишкин А. А., Попугаев М. М., Делков А. В., 2018

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕГЕНЕРАЦИИ ПОТЕРЬ ЭНТАЛЬПИИ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБОМАШИН

А. А. Кишкин, Ю. Н. Шевченко, А. В. Делков, Д. В. Потес, Д. Ю. Чайкин

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 вопрос учета потерь энергии в проточной части турбомашин. Анализируется физический процесс возврата теплоты трения в рабочий цикл. Приводятся расчетные зависимости для регенерации потерь энтальпии в турбомашинах.*

*Ключевые слова: проточная часть турбомашин, регенерация потерь, коэффициент возврата потерь теплоты.*

## MATHEMATICAL MODEL OF ENTHALPIA LOSS REGENERATION IN THE FLOW PART OF TURBINE

A. A. Kishkin, Yu. N. Shevchenko, A. V. Delkov, D. V. Potes, D. Yu. Chaykin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: delkov-mx01@mail.ru

*This paper covered the problem of accounting for energy losses in the flowing part of turbines. The physical process of returning heat of friction to the working cycle is analyzed. Calculated dependences for the regeneration of enthalpy losses in turbines are given.*

*Keywords: flowing part of turbine, loss regeneration, heat loss return coefficient.*

Отличительной особенностью осуществления реальных процессов в цикле любого теплового двигателя является наличие потерь. Наличие потерь обуславливает необратимость цикла теплового двигателя [1]. Основными составляющими этих потерь являются потери на трение рабочего тела (внутренние потери) и тепловые потери в окружающую среду (внешние потери). Но если внешние потери являются полностью безвозвратными, то часть потерь энергии на трение преобразуется в теплоту трения, которая возвращается в цикл [2].

Средой, воспринимающей тепловой эквивалент работы сил трения, является сам поток. Теряя кинетическую энергию, поток воспринимает часть этой потерянной энергии в виде тепла. Возврат потерь вызывает повышение температуры потока, а значит и его энтальпии. Таким образом осуществляется регенерация части потерь на трение в цикле теплового двигателя.

В настоящей работе рассматривается вопрос учета регенерации потерь энтальпии в проточной части турбомашин в части разработки математической модели. Данный вопрос в настоящее время является актуальным, так как отсутствуют достоверные данные, позволяющие оценить величину потерь на трение в турбомашинах и процент преобразования этих потерь в теплоту трения в цикле [3].

Задача по расчетно-алгоритмическому определению политропной работы за счет дополнительной

работы объемного расширения, полученной вследствие подвода тепла от работы трения представляет отдельную научно-практическую задачу удовлетворительно нерешенную на сегодняшний день. В общем турбо-машиностроении принят подход, предполагающий действительный процесс расширения, протекающий с подводом тепла моделировать кривой политропы  $p v^n$ , где  $p$  – давление,  $v$  – удельный объем,  $n$  – показатель политропы. Политропа является более пологой кривой, чем адиабата. Коэффициент политропы часто назначается приближенно по справочным или экспериментальным данным, что снижает точность и достоверность результатов расчета [4].

Для оценки полезного использования теплоты трения в цикле работы турбомашин используется понятие коэффициента возврата потерь теплоты трения. Коэффициент возврата потерь определяется как отношение той части теплоты трения, которая используется для получения работы в цикле, к теоретической работе цикла.

Политропная работа цикла  $L_{\text{пол}}$  в этом случае может быть определена как сумма адиабатной (теоретической)  $L_{\text{ад}}$  и величины работы трения  $H_{\text{T}}$ :

$$L_{\text{пол}} = L_{\text{ад}} + H_{\text{T}}. \quad (1)$$

Тогда коэффициент возврата потерь теплоты трения  $\eta$  можно определить как

$$\eta = \frac{H_{\text{T}}}{L_{\text{ад}}} = \frac{H_{\text{T}}}{L_{\text{пол}} - H_{\text{T}}}. \quad (2)$$

Согласно экспериментальным данным, обычно возвращаемая часть работы трения  $H_T$  составляет 15...20 % от общей величины потерь на трение [5].

Используемая во многих случаях  $i$ - $s$ -диаграмма для расчета турбин существенно упрощает расчеты, хотя в них и не показаны все составляющие баланса работ: дополнительная работа, работа объемного расширения.

Интегральная модель потерь, относительно корректно моделирующая потери в проточной части турбомашин по статическому давлению, не подходит для учета влияния регенерации потерь на трение вследствие того, что возврат энергии происходит самом потоке рабочего тела.

Расчетное алгоритмическое преодоление этих сложностей возможно, если воспользоваться приемом [4] введения эквивалентной длины прямого участка на котором потеря напора на длине равна (эквивалентна) потери напора на соответствующем местном сопротивлении. Эквивалентная длина  $l_{\text{экв}}$  может быть найдена из равенства потерь напора по длине  $h_T$ , определяемой по формуле Дарси–Вейсбаха:

$$h_m = \lambda \frac{l_{\text{экв}}}{d_{\text{экв}}} \frac{v^2}{2}, \quad (3)$$

и местным сопротивлением  $h_{\text{м.п.}}$ , учитываемым формулой

$$h_{\text{м.п.}} = \xi_{\text{м.п.}} \frac{v^2}{2}, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – коэффициент потерь на трение по длине,  $d_{\text{экв}}$  – эквивалентный диаметр канала,  $v$  – скорость потока рабочего тела,  $\xi_{\text{м.п.}}$  – коэффициент местных потерь.

Тогда при условии  $h_T = h_{\text{м.п.}}$  получим

$$l_{\text{экв}} = \left( \frac{\xi_{\text{м.п.}}}{\lambda} \right) d_{\text{экв}}. \quad (5)$$

С использованием эквивалентной длины становится возможно создание математической модели и алгоритма для учета регенерации потерь энтальпии в проточной части турбомашин.

Система конечно-разностных уравнений для итераций по возвращению теплоты трения в неподвижном проточном канале запишется так:

$$\frac{P_{i+1}}{\rho_{i+1}} = \frac{P_i}{\rho_i} + \left( \frac{C_i^2}{2} - \frac{C_{i+1}^2}{2} \right) \frac{k-1}{k} - \lambda \left( \frac{\Delta l}{d_{\text{экв}}} \right) \frac{C_i^2}{2} \frac{k-1}{k},$$

$$C_p T_{i+1} = i_{i+1} = i_i + \left( \frac{C_i^2}{2} - \frac{C_{i+1}^2}{2} \right) + \lambda \left( \frac{\Delta l}{d_{\text{экв}}} \right) \frac{C_i^2}{2}, \quad (6)$$

$$P_{i+1} \frac{1}{\rho_{i+1}} = RT_{i+1},$$

где  $P$  – давление;  $T$  – температура;  $R$  – газовая постоянная;  $C$  – абсолютная скорость потока в канале;  $\rho$  – плотность.

Для подвижного канала необходимо произвести замену компонентов скорости

$$\left( \frac{C_i^2}{2} - \frac{C_{i+1}^2}{2} \right) \Rightarrow \left( \frac{U_i^2 - U_{i+1}^2}{2} - \frac{W_i^2 - W_{i+1}^2}{2} \right), \quad (7)$$

где  $U$  – окружная скорость;  $W$  – относительная скорость потока.

Таким образом, представленные выражения представляют собой математическую модель регенерации потерь энтальпии в проточной части турбомашин, и могут быть использованы для учета величины возврата потерь теплоты трения при расчете энергетической эффективности турбины.

### 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. Рабинович Е. З. Гидравлика. М. : Недра, 1980. 278 с.
5. Галеркин Ю. Б., Рекстин Ф. С. Методы исследования центробежных компрессорных машин. Л. : Машиностроение, 1969. 304 с.

### 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. Rabinovich E. Z. *Gidravlika* [Hydraulics]. Moscow, Nedra Publ., 1980. 278 p. (In Russ.)
5. Galerkin Yu. B., Rekstin F. S. *Metody issledovaniya tsentrobezhnykh kompressornykh mashin* [Methods for studying centrifugal compressor machines]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1969. 304 p. (In Russ.)

© Кишкин А. А., Шевченко Ю. Н., Делков А. В., Потес Д. В., Чайкин Д. Ю., 2018

УДК 629

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНЫХ ТУРБИН РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ РЕАКТИВНОСТИ

А. А. Кишкин, Ю. Н. Шевченко, М. М. Попугаев, А. В. Куприянов, А. В. Делков

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 вопрос реализации алгоритма расчета для проточной части центростремительных турбин различной степени реактивности. Анализируются особенности рабочего процесса центростремительных турбин. Приводится описание программы и алгоритма расчета.*

*Ключевые слова: центростремительная турбина, проточная часть, математическое моделирование, алгоритм расчета.*

## MODELING OF THE CENTRIPETAL TURBINES FLOWING PART IN CASES OF VARIOUS REACTIVITY DEGREE

A. A. Kishkin, Yu. N. Shevchenko, M. M. Popugayev, A. V. Kupriyanov, A. V. Delkov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: delkov-mx01@mail.ru

*This paper covered the question of the calculation algorithm for the flowing part of centripetal turbines in cases of varying reactivity degree. The features of the working process of centripetal turbines are analyzed. The description of the program and calculation algorithm is given.*

*Keywords: centripetal turbine, flowing part, mathematical modeling, calculation algorithm.*

Центростремительные турбины относятся к классу расширительных турбомашин и предназначены для преобразования энергии потока рабочего тела в механическую энергию на валу [1; 2]. Особенностью рабочего процесса таких турбин является радиальное движение рабочего тела при прохождении проточной части, вследствие чего относительная скорость газа изменяется не только вследствие расширения, но и под действием центробежных сил инерции. Вследствие разнонаправленности векторов силы инерции и относительной скорости последняя будет замедляться. Для преодоления этого замедления центростремительные турбины выполняют реактивными [3].

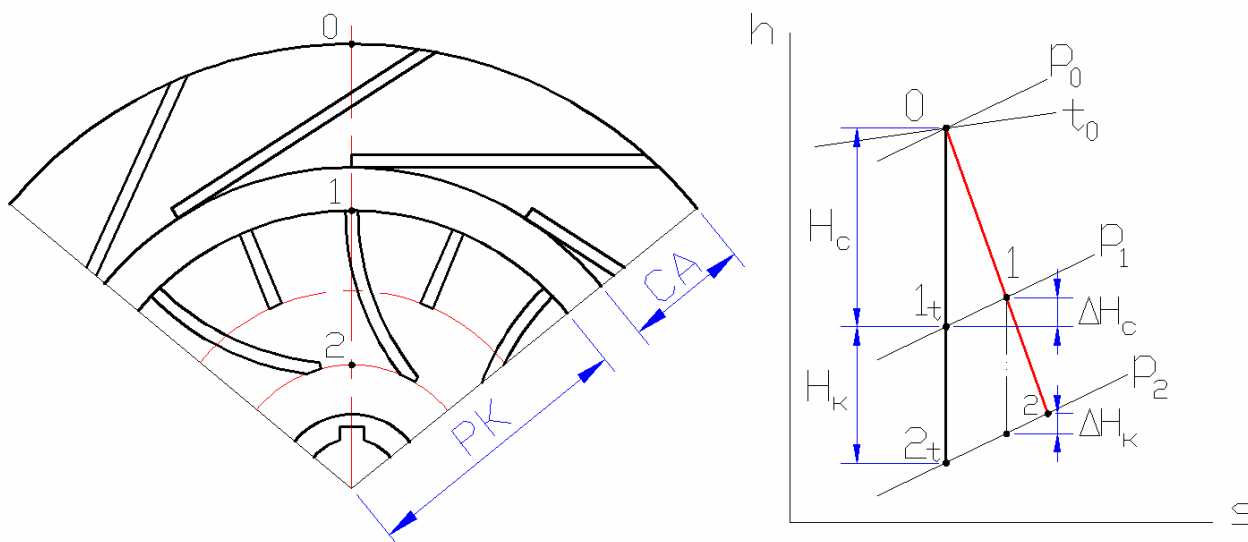
Проточная часть центростремительной турбины представлена на рисунке (слева) и состоит из соплового аппарата (СА) и рабочего колеса (РК). Характерными точками для проточной части являются: точка 0 (на входе в СА), точка 1 (на входе в РК), точка 2 (на выходе из РК). Диаграмма процесса расширения в турбинной ступени представлена на рисунке (справа). Идеальный (без потерь) процесс расширения протекает в два этапа: расширение в СА (процесс 0-1t, который характеризуется располагаемым теплоперепадом  $H_c$ ) и расширение в РК (процесс 1t-2t с теплоперепадом  $H_k$ ). Наличие безвозвратных потерь в СА ( $\Delta H_c$ ) и РК ( $\Delta H_k$ ) вызывает отклонение процесса расширения от идеальной линии вправо (линия 0-1-2). Степень реактивности турбинной ступени  $\rho$  показывает, какая часть общего теплоперепада срабатывается в СА:

$$\rho = \frac{H_c}{H_c + H_k}. \quad (1)$$

Течение газа или пара в сопловых и рабочих решетках центростремительных турбин может быть представлено как движение вязкого сжимаемого газа в криволинейном канале. Простейший метод расчета такого движения основан на замене действительного трехмерного течения его условным одномерным движением вдоль оси канала [4]. При этом параметры газа считаются изменяющимися только вдоль оси канала, а в поперечном сечении – постоянными.

Изменение параметров газа или пара при движении вдоль оси канала проточной части соответствует политропному процессу. Математически это можно формализовать как адиабатический (изэнтропный) процесс с поправкой на потери энергии, вследствие которых увеличивается энтропия. Основным типом процессов, реализуемых в проточной части центростремительной турбины, является процесс обмена теплом и энергией, протекающий в потоке рабочего тела [5].

При решении данных уравнений необходимо определить теплофизические и транспортные свойства рабочего тела (давление, плотность, внутренняя энергия). Для этого может быть использовано уравнение состояния. На практике при проектировании турбин используют диаграммы состояний теплоносителей. Наиболее универсальным подходом к расчету свойств теплоносителей является база данных состояний теплоносителей.



Ступень центробежной турбины (слева) и процесс расширения пара (справа)

В рамках настоящей работы для моделирования рабочих процессов в ступени турбины используются уравнения проточной термодинамики в форме интегралов дифференциальных уравнений:

– изменение количества движения – интеграл Бернулли:

$$\frac{k}{k-1} \frac{p}{\rho} + \frac{C^2}{2} = \text{const} + \zeta \frac{C^2}{2}; \quad (2)$$

– интеграл уравнения энергии в термодинамических параметрах

$$i + \frac{C^2}{2} = c_p T + \frac{C^2}{2}; \quad (3)$$

– уравнение неразрывности в интегральной форме:

$$C = \frac{\dot{m}}{\rho F}; \quad (4)$$

– уравнение состояния для идеального газа

$$p \frac{1}{\rho} = RT, \quad (5)$$

где  $k$  – показатель адиабаты;  $p$  – статическое давление;  $\rho$  – плотность;  $C$  – абсолютная скорость;  $\zeta$  – коэффициент потерь;  $i$  – энтальпия потока;  $c_p$  – теплоемкость;  $\dot{m}$  – массовый расход рабочего тела;  $F$  – площадь проходного сечения;  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – статическая температура.

Система уравнений (2), (5) позволяет реализовать алгоритм расчета одноступенчатой центробежной турбины с определением параметров режима работы системы для заданных граничных и начальных условий.

Алгоритм позволяет для исходных данных численно получить следующие основные результаты: характеристика рабочего процесса; величина необратимых потерь; характеристики работы и мощности энергоустановки; баланс энергетических потерь энергоустановки. Такой подход позволяет осуществить процедуру оптимизации центробежных турбин по конструктивным и режимным параметрам.

### Библиографические ссылки

1. Наталевич А. С. Воздушные микротурбины. М.: Машиностроение, 1970. 208 с.
2. Овсянников Б. В., Боровский Б. И. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1977. 540 с.
3. Митрохин В. Т. Выбор и расчет центробежной турбины на стационарных и переходных режимах М.: Машиностроение, 1974. 228 с.
4. Moore M. J. Micro-turbine Generators. Professional Engineering Publishing, 2002. 126 p.
5. Беляев Е. Н., Чванов В. К., Черваков В. В. Математическое моделирование рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей. М.: МАИ, 1999. 228 с.

### References

1. Natalevich A. S. *Vozdushnyye mikroturbiny* [Air microturbines]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1970, 208 p. (In Russ.)
2. 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, Mashinostroyeniye Publ., 1977, 540 p. (In Russ.)
3. Mitrokhin V. T. *Vybor i raschet tsentrobеzhnoy turbiny na statsionarnykh i perekhodnykh rezhimakh* [Selection and calculation of a centripetal turbine in stationary and transient modes]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1974, 228 p. (In Russ.)
4. Moore M. J. *Micro-turbine Generators*. Professional Engineering Publishing, 2002, 126 p.
5. Belyaev E. N., Chvanov V. K., Chervakov V. V. *Matematicheskoye modelirovaniye rabocheho protsessa zhidkostnykh raketnykh dvigateley*. [Mathematical modeling of the working process of liquid rocket engines]. Moscow, MAI, 1999, 228 p. (In Russ.)

© Кишкин А. А., Шевченко Ю. Н., Попугаев М. М., Куприянов А. В., Делков А. В. 2018

УДК 629

## РАЗРАБОТКА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУРБОМАШИН

М. М. Попугаев, 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: delkov-mx01@mail.ru

*Рассматривается вопрос создания испытательного стенда для физического моделирования турбомашин. Приводится описание конструкции стенда, измеряемых параметров. Оцениваются проблемы и перспективы проведения испытаний турбомашин.*

*Ключевые слова: физическое моделирование, турбомашин, испытание, испытательный стенд.*

## DEVELOPMENT OF THE EXPERIMENTAL STAND FOR PHYSICAL MODELING OF TURBOMACHINES

M. M. Popugayev, D. V. Potes

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: delkov-mx01@mail.ru

*This paper covered the question of creating experimental stand for physical modeling of turbomachines. The description of the stand construction, measured parameters are given. The problems and prospects of testing turbomachines are evaluated.*

*Keywords: physical modeling, turbomachine, experimental stand.*

Метод физического моделирования тепловых энергетических установок используется для получения их характеристик с использованием материальных физических макетов [1; 2]. В настоящей работе рассматривается вопрос разработки испытательного стенда для физического моделирования турбомашин [3].

Принципиальная схема экспериментального стенда для проведения физического моделирования турбомашин представлена на рис. 1. Стенд состоит из турбинного узла с набором сменных колес, двигателя в балансирном подвесе, пульта управления расходом рабочего тела, ресивера, компрессора, системы измерений. Турбинный узел стенда с смонтированными датчиками температуры показан на рис. 2, также показано рабочее колесо, подводящий и направляющий аппараты под крышкой из плексигласа.

Принцип работы испытательного стенда следующий: [4; 5]. Модельное рабочее тело подается в проточную часть турбины из ресивера 3 через пульт управления расходом с редуктором 4. Энергия рабочего тела приводит во вращение ротор турбины, выполненный на одном валу с ротором мотор-двигателя 2. Отработавшее рабочее тело выбрасывается из турбины в атмосферу. Расход рабочего тела задается редуктором 4 пульта.

Система измерений испытательного стенда позволяет контролировать параметры температуры, давления, расхода, крутящего момента, скорости вращения ротора. Все измеренные показатели системы измерений фиксируются измерительным комплексом 10.

Температура в системе контролируется термисторами B57861-S 103-F40, с базовым сопротивлением 10 кОм, возвращающих измеряемую величину в вольтах. Для перевода показаний термисторов B57861-S 103-F40 в формат единиц измерения температуры используются тарировочные характеристики, полученные одновременно с градацией температуры по ртутному термометру.

Расположение датчиков температуры показано на рис. 2.

Давление в системе контролируется датчиками давления ИКД-6, которые измеряемую величину возвращают в вольтах. Для перевода показаний датчиков ИКД-6 в формат единиц измерения давления используются тарировочные характеристики, полученные одновременно с градацией давления по гидравлическому столбу жидкости.

Для компенсации помех датчиков температуры и давления используются фильтры помех, реализованные на базе пленочных конденсаторов емкостью до 3,3 мкФ. Расход рабочего тела контролируется датчиком расхода SMC PF2A7.

Представленный стенд позволяет проводить энергетические испытания турбомашин на модельном рабочем теле (воздух) в широком диапазоне определяющих параметров. Стенд позволяет проводить испытания турбин различных типов при давлении на входе в турбинный узел до 3 атм и скорости вращения ротора турбины до 10000 об/мин.

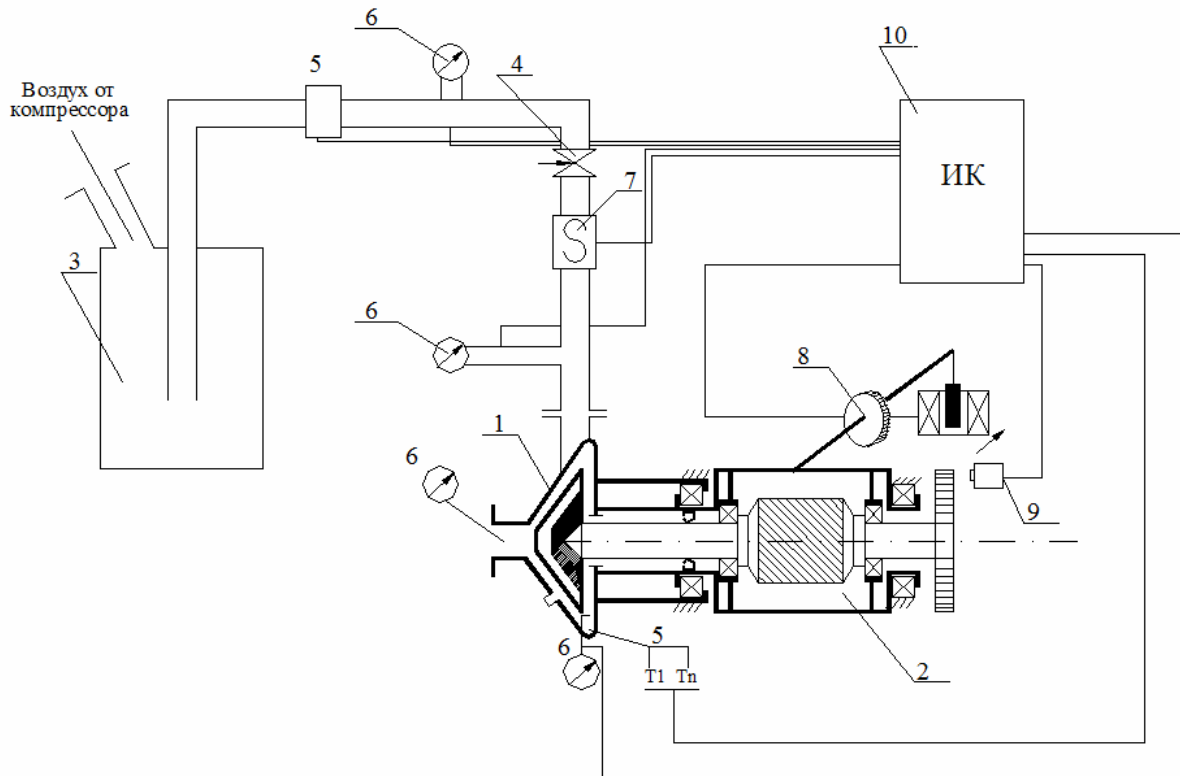


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:  
 1 – турбинный узел; 2 – двигатель в балансирующем подвесе; 3 – ресивер; 4 – редуктор управления расходом рабочего тела; 5 – датчик температуры; 6 – датчик давления; 7 – датчик расхода; 8 – датчик крутящего момента; 9 – датчик оборотов; 10 – измерительный комплекс

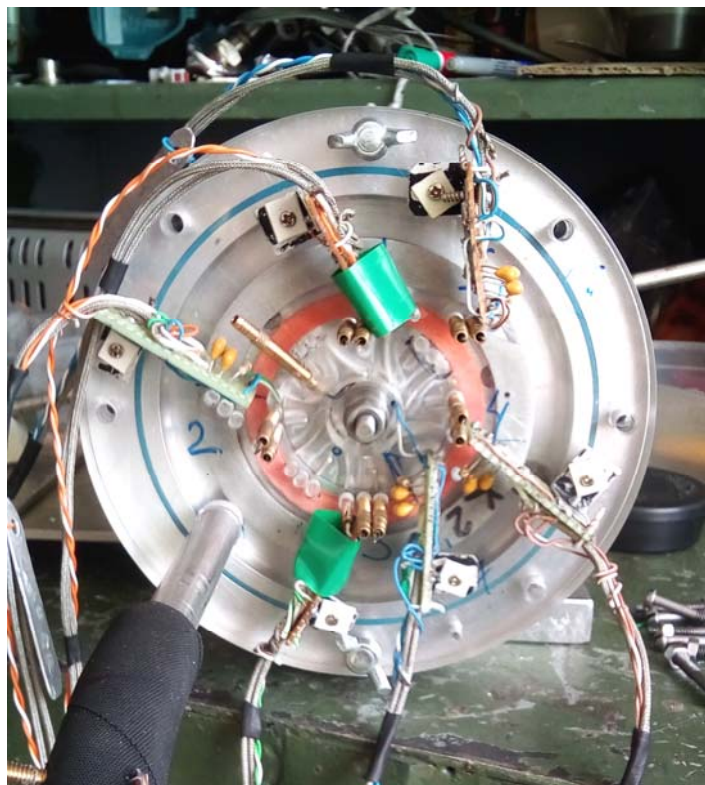


Рис. 2. Экспериментальный стенд со смонтированными датчиками температуры

### Библиографические ссылки

1. Герашенко О. А., Федоров В. Г. Техника тепло-технического эксперимента. Киев : Наукова думка, 1964. 164 с.
2. Ейдеус А. И. Основы теплотехнического эксперимента и вакуумной техники. Калининград : БГАРФ, 2011. 116 с.
3. Галеркин Ю. Б., Рекстин Ф. С. Методы исследования центробежных компрессорных машин. Л. : Машиностроение, 1969. 304 с.
4. Андриушченко А. И. Основы технической термодинамики реальных процессов. М. : Высшая школа, 1967. 267 с.
5. Овсянников Б. В., Боровский Б. И. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей. М. : Машиностроение 1977. 540 с.

### References

1. Geraschenko O. A., Fedorov V. G. *Tekhnika teplo-plotekhnicheskogo ehksperimenta* [Technique of heat en-

gineering experiment]. Kiev : Naukova dumka Publ., 1964, 164 p. (In Russ.)

2. Eideus A. I. *Osnovy teplotekhnicheskogo ehksperimenta i vakuumnoj tekhniki* [Basics of heat engineering experiment and vacuum technology]. Kaliningrad: BHARF Publ., 2011, 116 p. (In Russ.)

3. Galerkin Yu. B., Rekstin F. S. *Metody issledovaniya tsentrobezhnykh kompressornykh mashin* [Methods for studying centrifugal compressor machines]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1969, 304 p. (In Russ.)

4. Andryushchenko A. I. *Osnovy tekhnicheskoy termodinamiki real'nykh protsessov* [Fundamentals of technical thermodynamics of real processes]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1967, 267 p. (In Russ.)

5. Ovsyannikov B. V., Borovskij B. I. *Teoriya i raschet agregatov pitaniya zhidkostnykh raketnykh dvigatelej* [Theory and calculation of units of power supply of liquid rocket engines]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1977, 540 p. (In Russ.)

© Попугаев М. М., Потес Д. В., 2018



УДК 53.06

## ДВУХФАЗНАЯ СИСТЕМА ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С АКТИВНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Н. А. Тестоедов, Е. В. Кривов

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

*Предложенная система терморегулирования (СТР) космического аппарата (КА) с механическим насосом обеспечивает надёжную работу бортовой аппаратуры КА при условии снижения значения теплоподвода к теплоносителю.*

*Ключевые слова: космический аппарат, двухфазная система терморегулирования.*

## THE TWO-PHASE THERMAL CONTROL SYSTEM OF THE SPACECRAFT WITH CIRCULATION OF HEAT CARRIER

N. A. Testoedov, E. V. Krivov,

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: krivov@iss-reshetnev.ru

*This paper outlines the thermal control system of a spacecraft with a mechanical pump ensures the reliable operation of on-board equipment provided reduction of the value of the heat supply to the heat carrier.*

*Keywords: spacecraft, a two-phase thermal control system.*

Двухфазная СТР КА включает в себя контур с активной циркуляцией двухфазного теплоносителя.

Известны разработки таких СТР с механическими насосами [1; 2]. Анализ результатов наземных испытаний таких СТР показал, что они обладают недостатком: низкая надёжностью нормального функционирования на теновом участке орбиты КА, при условии снижения значения теплоподвода к теплоносителю в результате периодического изменения потребляемой электрической мощности приборов, обусловленным тем, что при переходном режиме и после в течение до получаса продолжается колебание температуры теплообменника-испарителя и, следовательно, термостабируемых приборов, с выходом за нижний допустимый предел изменения температуры.

Предлагаемая СТР с двухфазным теплоносителем содержит:

- аккумулятор, предназначенный для хранения, соответствующего режиму работы СТР объёма жидкой фазы теплоносителя;
- электропривод с механическим приводом, обеспечивающий по сигналам датчика температуры, установленного в теплообменнике-испарителе, изменение положения гибкой мембраны (сильфона) гидроаккумулятора (ГА), тем самым изменяя объём запаса теплоносителя в аккумуляторе;
- гидронасос, обеспечивающий циркуляцию теплоносителя в контуре;
- теплообменник-испаритель, где происходит кипение теплоносителя в результате подвода тепла от работающих приборов: в сеансе связи теплоноситель

на выходе теплообменника-испарителя практически полностью превращается в паровую фазу, а в переходных и дежурных режимах на выходе теплообменника-испарителя теплоноситель состоит из паровой и жидкой фаз;

– регулятор температуры пара в теплообменнике-испарителе, обеспечивающий изменение производительности гидронасоса и, следовательно, температуры пара в теплообменнике-испарителе в соответствии с изменением подводимого тепла.

В период прохождения КА тенового участка орбиты, при колебании температуры теплообменника-испарителя с выходом за нижний допустимый предел изменения температуры для обеспечения пропорциональности количества теплоносителя, подведённому теплу в теплообменнике-испарителе необходимо на вход холодильника-излучателя всегда подавать только паровую фазу теплоносителя:

– в теплообменнике-испарителе количество образующегося пара прямо пропорционально количеству подведённого тепла;

– разделитель жидкой и паровой фаз теплоносителя, например, черпаковый насос, обеспечивает, как показали результаты испытаний, гарантированное разделение фаз и подачу на вход холодильника-излучателя только паровой фазы теплоносителя

Черпаковый насос состоит из следующих основных частей: электрического привода; неподвижного корпуса; вращающегося корпуса с лопатками; отводящего жидкую фазу теплоносителя канала; отводящего паровую фазу теплоносителя канала.

В холодильнике-излучателе происходит превращение пара в жидкую фазу и отвод тепла в окружающее (космическое) пространство.

Подведённое к теплообменнику-испарителю тепло передаётся циркулирующему теплоносителю, который при этом превращается в паровую фазу частично или практически полностью в зависимости от количества подведённого тепла.

Двухфазный теплоноситель далее поступает в черпаковый насос. В черпаковом насосе двухфазный теплоноситель из его центральной части попадает на лопатки вращающегося корпуса и в результате воздействия центробежных сил теплоноситель разделяется на паровую фазу, которая сосредоточена в центральной части вращающегося корпуса, и жидкую фазу, которая сосредоточена в периферийной зоне вращающегося корпуса.

Далее пар из центральной части через специальный канал поступает к первому выходу, а жидкая фаза – ко второму выходу черпакового насоса: из первого выхода паровая фаза подаётся на вход холодильника-излучателя, где происходит превращение его в жидкую фазу теплоносителя и отдача тепла стенкам холодильника-излучателя и далее отвод этого тепла в окружающее пространство. При дальнейшем движении жидкая фаза теплоносителя, вышедшая из холодильника-излучателя, поступает в гидронасос и далее смешивается с жидкой фазой теплоносителя, вышедшей из второго выхода черпакового насоса, и жидкий теплоноситель поступает в теплообменник-испаритель.

Предложенная СТР исключает в условиях эксплуатации на теневом участке орбиты КА при переходе с сеанса связи на дежурный режим случаи выхода температуры теплообменника-испарителя за допустимые пределы, т. е. тем самым повышается

надёжность нормального функционирования СТР на теневом участке орбиты КА при переменных значениях теплоподвода к теплообменнику-испарителю [3].

### Библиографические ссылки

1. Никонов А. А., Горбенко Г. А., Блинков В. Н. Теплообменные контуры с двухфазным теплоносителем для систем терморегулирования космических аппаратов. М. : Центр научно-технической информации «Поиск», 1991. 302 с.
2. Каллимоз Б. А., Эппер Р. К. Термостатическое управление двухфазными системами терморегулирования космических аппаратов // Американский журнал астрономии и астрофизики. 1986. № 1246. С. 3–6.
3. Пат. 2384491. Российская Федерация, МПК С2 В64G 1/50. Система терморегулирования космического аппарата / Кривов Е. В., Акчурун В. П., Загар О. В. и др. № 2008102573/11 ; заявл. 22.01.2008 ; опубл. 20.03.2010, Бюл. № 8.

### References

1. Nikonov A. A., Grobenko G. A., Blinkov V. N. Heat exchange circuits with two-phase coolant for spacecraft thermal control systems. Center for Scientific and Technical Information "Poisk", Moscow, 1991. P. 302.
2. Cullimoze B. A., Epper R. C. Thermostatic Control of Two-Phase Spacecraft Thermal Management Systems. AJAA Pap. 1986. No. 1246. P. 3–6.
3. Patent 2384491. RF, Spacecraft thermal control system / Krivov E. V., Akchurin V. P., Zagar O. V. No. 2008102573/11 ; zayavl. 22.01.2008 ; opubl. 20.03.2010, Byul. № 8.

© Тестоедов Н. А., Кривов Е. В., 2018

УДК 536.2.08

**ДВУХФАЗНАЯ СИСТЕМА ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

А. А. Ходенков, М. Г. Мелкозеров, Э. В. Ходенкова, И. Ю. 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: hodenkov.aa@gmail.com

*Система терморегулирования космического аппарата – сложный комплекс, необходимый для поддержания штатной работы бортовых систем аппарата. Современные спутники все чаще переходят на двухфазные системы терморегулирования, которые эффективнее систем терморегулирования без фазового перехода. В настоящей работе рассматриваются проблемы, возникающие при проектировании двухфазных систем терморегулирования.*

*Ключевые слова: система терморегулирования, космический аппарат, двухфазный поток, коэффициент теплоотдачи.*

**SPACECRAFT TWO-PHASE THERMAL CONTROL SYSTEM**

А. А. Khodenkov, M. G. Melkozerov, E. V. Khodenkova, I. Yu. Ermienko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
 E-mail: hodenkov.aa@gmail.com

*The system of thermal control of a spacecraft is a complex, that is necessary for maintain the regular work of the onboard systems of the apparatus. Modern satellites are increasingly switching to two-phase thermal control systems, which are more effective than thermal control systems without a phase transition. This paper covered problems that arise in the design of two-phase thermal control systems.*

*Keywords: thermal control system, spacecraft, two-phase flow, heat transfer coefficient.*

Система терморегулирования (СТР) космического аппарата (КА) предназначена для создания и поддержания заданных значений температур на борту КА в условиях неравномерных по времени внешних и внутренних тепловых нагрузок. В условиях наличия солнечного теплового излучения, теплопритоков от работающего оборудования, радиационного теплового излучения КА в космическое пространство температура в различных точках поверхности космического аппарата может находиться в диапазоне  $-150...+150$  °С, в то время как для сохранения работоспособности оборудования и агрегатов космического аппарата требуется весьма узкий температурный диапазон  $0...+40$  °С [1].

Задача терморегулирования КА решается за счет сброса излишнего тепла в космическое пространство. От производительности СТР и точности регулирования во многом зависит срок службы бортового комплекса приборов и в целом выполнение миссии КА [2].

Одной из наиболее эффективных СТР является СТР на основе двухфазного контура теплопереноса, в основу рабочего процесса которой заложены теплообменные процессы при изменении фазового состояния теплоносителя. Преимуществами применения ДФК по сравнению с другими типами систем являются сокращение массы СТР и снижение ее энергопотребления, что обуславливается значительной степе-

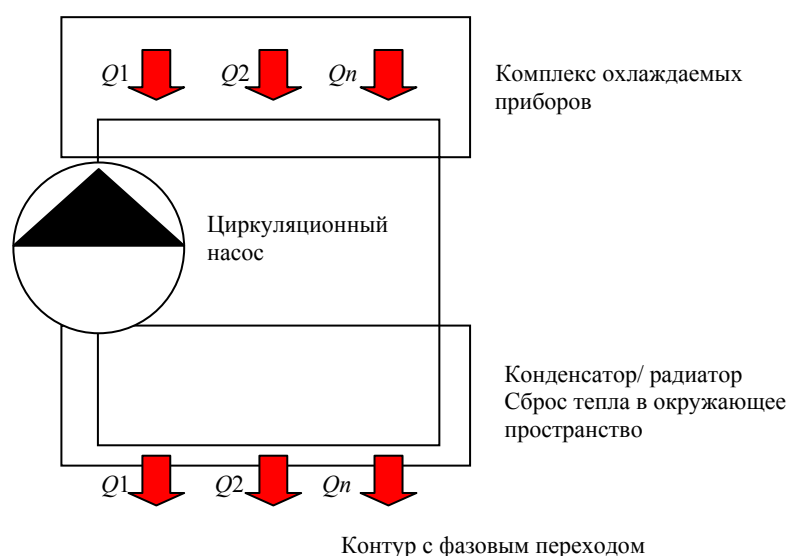
нью интенсификации теплообмена при фазовых переходах теплоносителя.

Согласно исследованию [3; 4], применение ДФК дает до 30 % сокращение в массе системы по сравнению с жидкостным контуром системы терморегулирования.

Простейшая принципиальная схема ДФК СТР представлена на рисунке. Такой контур состоит из нескольких теплообменных аппаратов – для охлаждения бортового комплекса приборов и для сброса тепла в окружающую среду. Для циркуляции теплоносителя предназначен насос. В процессе работы контура происходит два различных процесса теплообмена: подвод тепла  $Q_{\text{общ}} = \sum Q_i$  от охлаждаемых объектов (приборов) в теплоноситель и сброс тепла  $Q_{\text{общ}}$  в космическое пространство с помощью механизма излучения.

Процессы подвода и отвода тепла в данном случае протекают с изменением агрегатного состояния теплоносителя, что определяет ряд сложностей в расчете ДФК. В настоящее время теплообмен при фазовых переходах теплоносителя изучен недостаточно.

При работе контура охлаждающий теплоноситель в жидкой фазе механически закачивается в испаритель, где происходит фазовый переход с отъемом тепла у охлаждаемых приборов. В конденсаторе/радиаторе пары превращаются в жидкость, которая подается на вход насоса. Таким образом, формируется замкнутый цикл, обеспечивающий тепловой баланс.



Описание работы системы включает в себя множество параметров, таких как тепловые нагрузки, температуры поверхностей теплообменных аппаратов, температура пара, температура жидкости, температура радиатора, скорость потока, напор насоса и давление в аккумуляторе. Кроме того, структура многофазного потока существенным образом зависит от уровня и направления силы тяжести, так как сам поток представляет собой пространственное распределение фаз различной плотности [4].

Основной задачей при расчете конвективного теплообмена ДФК СТР является определение коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  [5]. Основным подходом к определению коэффициентов теплоотдачи в настоящее время является применение корреляционных зависимостей, полученных экспериментальным путем. Вследствие огромного интереса к двухфазным потокам было проведено множество экспериментальных исследований протекающих в них процессов теплообмена. К сожалению, большое количество работ не преднамеренно привело к огромной путанице.

Обзор современных расчетных методик показал, что в настоящее время недостаточно хорошо проработан вопрос определения термодинамических параметров рабочего тела на начальных этапах кипения, т. е. при малой степени сухости. Исследование расчетных и схемных построений ДФК позволило определить, что большинство времени бортовой комплекс аппаратуры работает при переменной нагрузке. Таким образом, вопрос разработки методик определения коэффициента теплоотдачи двухфазного потока в граничных условиях ДФК СТР КА представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

#### Библиографические ссылки

1. Алексеев В. А., Малоземов В. В. Обеспечение теплового режима радиоэлектронного оборудования космических аппаратов : учеб. пособие. МАИ. 2001. С. 52.
2. Система обеспечения теплового режима космического аппарата / В. Д. Атамасов, В. И. Ермолаев, И. О. Кукушкин // СПб МО. 2003. С. 71.

3. 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.

4. Расчет теплообмена космического аппарата / В. М. Залетаев, Ю. В. Капинос, О. В. Сургучев. М. : Машиностроение, 1979. С. 175.

5. Исследование процессов теплообмена в конденсаторе холодильной установки / А. А. Ходенков, А. В. Делков, А. А. Кишкин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : тезисы X Всерос. науч.-практ. конф. творческой молодежи. Красноярск, 2014. С. 80–81.

#### References

1. Alekseev V. A., Malozemov V.V. *Obespechenie teplovogo rezhima radioelektronnogo oborudovanie kosmicheskikh apparatov* [Providing the thermal regime of radio electronic equipment for space vehicles]. Uchebnoe posobie, MAI, 2001. 52 p.
2. Atamasov V. D., Ermolaev V. I., Kukushkin I. O. *Sistema obespecheniya teplovogo rezhima kosmicheskogo apparata* [The system for ensuring the thermal regime of the spacecraft] Sankt-Peterburg, MO., 2003. 71 p.
3. Kishkin A. A., Chernenko D. V., Delkov A. V. i d.r. [Development of low-potential heat recovery facilities based on the Rankine Organic Cycle] *Alternativnaya energetika i ekologiya*. 2014. № 3 (4). P. 35–36 (In Russ.).
4. Zaletaev V. M., Kapinos Yu. V., Surguchev O. V. *Raschet teploobmena kosmicheskogo apparata*. [Calculation of heat transfer of the spacecraft]. Moscow: Mashinostroenie, 1979. 175 p.
5. Khodenkov A. A., Delkov A. V., Kishkin A. A. [Investigation of heat transfer processes in the condenser of a refrigeration unit] *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики : tezisy X Vseros. nauch.-prakt. konf. tvorcheskoi molodezhi*, Krasnoyarsk, 2014. P. 80–81.

© Ходенков А. А., Мелкозеров М. Г., Ходенкова Э. В., Ермиенко И. Ю., 2018

УДК 536.2.08

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

А. А. Ходенков, А. В. Делков, М. Г. Мелкозеров, Э. В. Ходенкова, А. А. Кишкин

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.*

## AUTOMATED MEASURING COMPLEX FOR TESTING OF HEAT-POWER PLANTS

A. A. Khodenkov, A. V. Delkov, M. G. Melkozerov, E. V. Khodenkova, A. A. Kishkin

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 [1].

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 [2; 3].

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 автоматиче-

ской 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 (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 [4; 5].

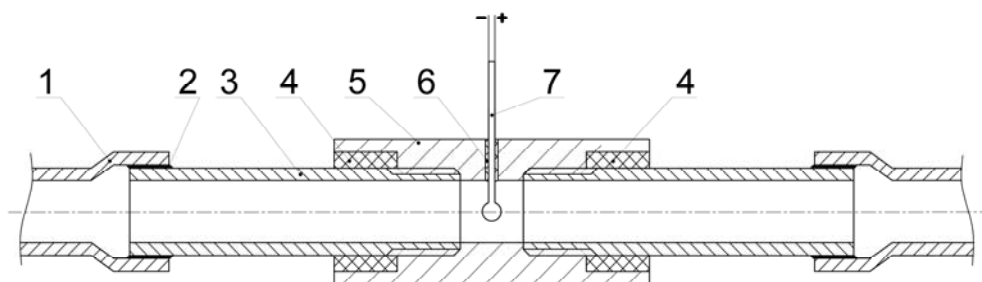


Рис. 1. Схема исполнения заделки термопары температуры потока Т1-Т12:  
1 – основной трубопровод; 2 – пайка; 3 – штуцер; 4 – уплотнительный материал; 5 – соединитель;  
6 – уплотнение термопары; 7 – термопара k-типа

Измерительная система построена на базе контролеров 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.

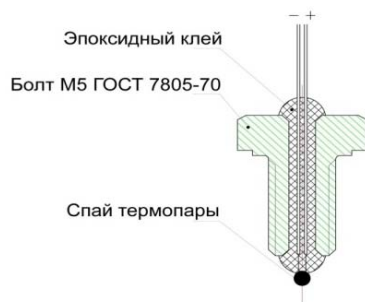


Рис. 2. Термопара температуры рабочего тела и теплоносителя в сборе

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 / Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. Кемерово, 2003. 96 с.

#### References

1. Delkov A. V., Nepomnyashchii D. A., Sitnichuk D. B., Kishkin A. A. [Problems and methods of mathematical modeling of thermal technical systems] *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. Kishkin A. A., Chernenko D. V., Delkov A. V. et al. [Development of low-potential heat recovery facilities based on the Rankine Organic Cycle] *Al'ternativnaya 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., Делков А. В., Мелкозеров М. Г., Ходенкова Э. В., Кишкин А. А., 2018

## КАНАЛЬНЫЕ ПОДВОДЯЩИЕ УСТРОЙСТВА МИКРОТУРБИН

Ю. Н. Шевченко, Е. В. Кузнецов, Д. Ю. Чайкин

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 вопрос моделирования канальных подводющих устройств микротурбин. Исследование подводющих устройств на сегодняшний день является единственным источником информации по полям скоростей, давлений и температур на входе в рабочее колесо микротурбины.*

*Ключевые слова: энергетическая установка, микротурбина, подводющее устройство, рабочее колесо, поле скоростей, вход в рабочее колесо.*

## MICROTURBINES CHANNEL FEEDING DEVICES

Yu. N. Shevchenko, E. V. Kuznetsov, D. Yu. Chaikin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
 E-mail: gift\_23j@mail.ru

*This article covered the question of simulation for microturbines channel feeders. Investigation of feeders is the only one source of information on the velocity fields, pressure and temperature at the entrance to the impeller of a microturbine.*

*Keywords: power unit; microturbine, channel feeder, impeller, field of speed, entrance to the impeller.*

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование канальных подводющих устройств микротурбин. Микротурбина представляет собой энергетическую установку для преобразования энергии потока рабочего тела в работу на валу ротора. Энергетическая эффективность микротурбины во многом определяется параметрами потока рабочего тела в различных ее частях [1]. Подводное устройство микротурбины используется для формирования потока рабочего тела, направленного на лопатки рабочего колеса. Исследование подводющих устройств на сегодняшний день является единственным источником информации по полям скоростей, давлений и температур на входе в рабочее колесо микротурбины [2; 3].

Экспериментальная продувка канальных подводющих устройств производилась в специальном приспособлении, имитирующем энергетическую установку, и позволяющем производить измерения по шести измерительным постам, согласно схеме на рисунке.

Обозначения постов (вх, 0, 1, 2, 3, 4) соответствуют следующей схеме: измерение параметров на входе в турбинный узел ( $P_{вх}$ ,  $T_{вх}$ ); измерение параметров в канале подводющего устройства ( $P_0$ ,  $T_0$ ); измерение параметров в четырех точках на радиусе рабочего колеса ( $P_1$ ,  $T_1$ ,  $P_2$ ,  $T_2$ ,  $P_3$ ,  $T_3$ ,  $P_4$ ,  $T_4$ ). На каждом посту измерялось полное давление ( $P^*$ ) приемником полного давления, статическое давление ( $P_{ст}$ ) приемником статического давления, равновесная измеренная температура ( $t$ ) – термпарой.

С использованием результатов обработки данных эксперимента в термодинамических и механических параметрах в соответствии с алгоритмом обработки результатов были определены коэффициенты потерь в канальных кольцевых и спиральных подводющих устройствах различного конструктивного исполнения. Коэффициент потерь в подводющем устройстве  $\xi_{п}$  [4; 5] рассчитывается по выражению:

$$\xi_{п} = \frac{2}{C_0} \frac{k}{(k-1)} \cdot \left( \frac{P_{вх}^*}{\rho_{вх}^*} - \frac{P_0^*}{\rho_{вх}^*} \right), \quad (1)$$

где  $C_0$  – абсолютная скорость;  $k$  – показатель адиабаты;  $P^*$  – полное давление;  $\rho$  – плотность рабочего тела.

Выражение (1) можно преобразовать для удобства компенсации погрешности измерений, в аналогичное выражение для адиабатического течения:

$$\xi_{п} = \frac{1}{C_{0(1)}^2} \cdot \frac{2k}{(k-1)} RT_0 \left[ 1 - \left( \frac{P_1^*}{P_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], \quad (2)$$

где  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура потока рабочего тела.

По результатам обработки экспериментальных данных был сделан вывод: коэффициенты потерь слабо зависят от расходной составляющей и для каждого данного канального подводющего устройства обусловлены в большей степени геометрическими параметрами.

Полученные экспериментальные данные по коэффициентам потерь в канальных подводющих устройствах позволят скорректировать алгоритм расчета микротурбинного узла, значительно повысив его точность.

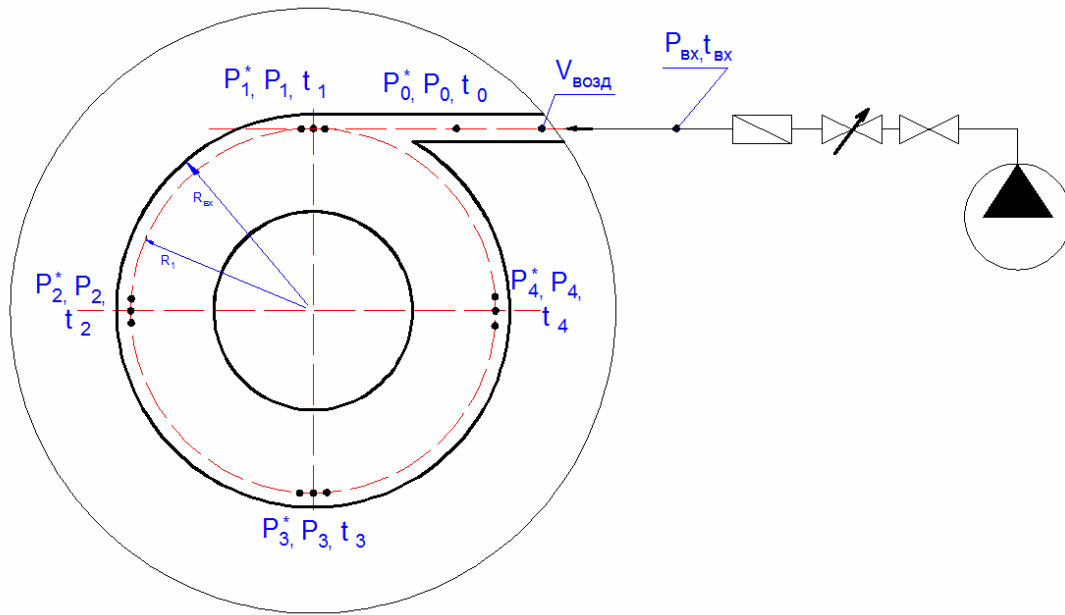


Схема расположения датчиков в испытательной системе канального подводящего устройства

Коэффициенты потерь для спиральной образующей канального подводящего устройства в среднем ниже на 10 по отношению к кольцевой образующей. Коэффициенты потерь  $\xi(C_1)$  и  $\xi(C_0)$  отличаются значительно, что однако не отражает физику процесса, поскольку одни и те же величины потерь отнесены лишь к разным скоростям, что в свою очередь определяется лишь удобством использования данных при расчете, достоверность при определении скорости  $C_0$  значительно выше, чем в случае скорости  $C_1$ .

Анализируя экспериментальные данные, можно сделать вывод, что основными факторами, определяющим величину потерь, являются степень парциальности  $\varepsilon$  и профиль канала подводящего устройства, по следующим причинам:

- значение парциальности  $\varepsilon$  (относительная величина области реального подвода расхода рабочего тела к круговому периметру рабочего колеса) в серии проведенных экспериментальных исследований достигает величины всего 0,06...0,1, что соответствует отношению площадей при внезапном расширении 16,7...10 и коэффициенту гидравлических потерь  $\xi = 245...81$ . По данным эксперимента были получены значения  $\xi_{\text{п}} = 120...20$ ;

- очевидно канальное подводящее устройство конструктивно можно выполнить предельно касательным к образующей (в этом случае средняя линия подводящего канала будет совпадать с касательной к входной кромке рабочего колеса), что не подразумевает закрутку потока вообще. Экспериментально при радиальном подводе рабочего тела были получены значения  $\xi_{\text{п}} = 20...10$ .

В целом полученные результаты позволяют сформулировать расчетные зависимости, которые могут быть использованы для оценки эффективности подводящих устройств при проектировании микротурбины узлов. Необходимо продолжить экспериментальные исследова-

ния в области комплексных энергетических испытаний ступени турбины, с целью учета эффекта интерференции местных сопротивлений (подводящего канального аппарата и рабочего колеса).

#### Библиографические ссылки

1. Андрущенко А. И. Основы технической термодинамики реальных процессов. М. : Высш. шк., 1967. 267 с.
2. Овсянников Б. В., Боровский Б. И. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей. М. : Машиностроение, 1977. 540 с.
3. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. М. : Физматлит, 1963. 583 с.
4. Фабрикант Н. Я. Аэродинамика М. : Наука, 1964. 815 с.
5. Moore M. J. Micro-turbine Generators. Professional Engineering Publishing, 2002.

#### References

1. Andryushchenko A. I. *Osnovy tekhnicheskoy termodinamiki real'nykh protsessov* [Fundamentals of technical thermodynamics of real processes]. Moscow : Vysshaya shkola Publ., 1967. 267 p.
2. Ovsyannikov B. V., Borovskij B. I. *Teoriya i raschet agregatov pitaniya zhidkostnykh raketnykh dvigatelej* [Theory and calculation of units of power supply of liquid rocket engines]. Moscow : Mashinostroyeniye Publ., 1977. 540 p.
3. Kochin N. E., Kibel I. A., Roze N. V. *Teoreticheskaya gidromekhanika* [Theoretical hydromechanics]. Moscow : Fizmatlit Publ., 1963. 583 p.
4. Fabricant N. Ya. *Aehrodinamika* [Aerodynamics]. Moscow : Nauka Publ., 1964. 815 p.
5. Moore M. J. Micro-turbine Generators. Professional Engineering Publishing, 2002.





**Секция**  
**«СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ,  
КОСМИЧЕСКАЯ НАВИГАЦИЯ И СВЯЗЬ»**

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ГРАФОВ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

И. С. Баранова, В. Р. Кусова, С. Ю. Манушичев\*, В. М. Овечко

ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»  
Российская Федерация, 141074, г. Королёв Московской области, ул. Пионерская, 4  
\*E-mail: stas@manushichev.ru

*Приводится формализация задачи распределения средств управления, в результате которой для решения задачи требуется осуществить поиск полного подграфа в графе.*

*Ключевые слова: контур управления, космический аппарат, распределение средств управления.*

## THE APPLICATION OF GRAPH THEORY TO THE SOLVE OF THE PROBLEM OF THE DISTRIBUTION OF SPACECRAFT CONTROLS

I. S. Baranova, V. R. Kusova, S. Yu. Manushichev\*, V. M. Ovechko

FSUE "Central Research Institute of Machine Building"  
4, Pioneer Str., Korolyov, Moscow region, 141074, Russian Federation  
\*E-mail: stas@manushichev.ru

*The formalization of the task of distribution of control means is resulted, as a result of which, in order to solve the problem, it is required to search for the complete subgraph in the graph.*

*Keywords: control loop, spacecraft, distribution of controls.*

Задача бесконфликтного планирования наземных средств управления космическими аппаратами (КА) в настоящее время решается на основе эвристических подходов к методу ветвей и границ. Рассмотрен один из возможных подходов к решению задачи распределения средств управления КА, позволяющий свести исходную задачу к задаче теории графов, что позволяет применить для ее решения теоретические результаты из этой области.

Независимо от способа управления космическим аппаратом, возникает задача распределения средств наземной и космической связи. Решением задачи является построение пар «космический аппарат – средство связи» и их расположение на шкале времени в заданном интервале [1–2].

Ручное построение плана задействования занимает много времени и не всегда эффективно. С ростом числа средств объектов управления процесс решения задачи будет усложняться. Требуется разработка и реализация алгоритма автоматизированного построения плана задействования средств управления.

Рассмотрим группировку из  $N$  орбитальных космических аппаратов (КА), пронумерованных от 1 до  $N$ , и  $M$  наземных контрольно-измерительных станций (КИС), пронумерованных от 1 до  $M$ . Кроме того, пусть известны все зоны радиовидимости (ЗРВ) между КА и КИС на период планирования. Каждая ЗРВ задается следующей информацией: порядковый номер  $i$ , время начала и окончания ЗРВ, номер КА ( $n$ ) и номер КИС ( $m$ )

$$\text{ЗРВ}_i = (t_{i, n}^{\text{нач}}, t_{i, m}^{\text{кон}}, n_i, m_i).$$

Пусть есть  $K$  заявок на проведение сеансов связи (СС) между КА и КИС. Будем считать, что при составлении расписания каждой заявке для проведения соответствующего СС полностью выделяется одна из ЗРВ, каждая КИС в один момент времени может осуществлять СС только с одним КА. У каждой заявки есть некоторое множество ограничений, которым должна удовлетворять выделяемая для проведения СС ЗРВ. Это могут быть, например, временные рамки проведения СС, конкретные КИС, ограничение на длительность СС и т. д.

Таким образом, каждая заявка задается следующей информацией: порядковый номер заявки  $k$ , номер КА ( $n$ ) и список ЗРВ, подходящих для выполнения данной заявки. ЗРВ называется подходящей для выполнения данной заявки (ЗВК), если она удовлетворяет заданным ограничениям.

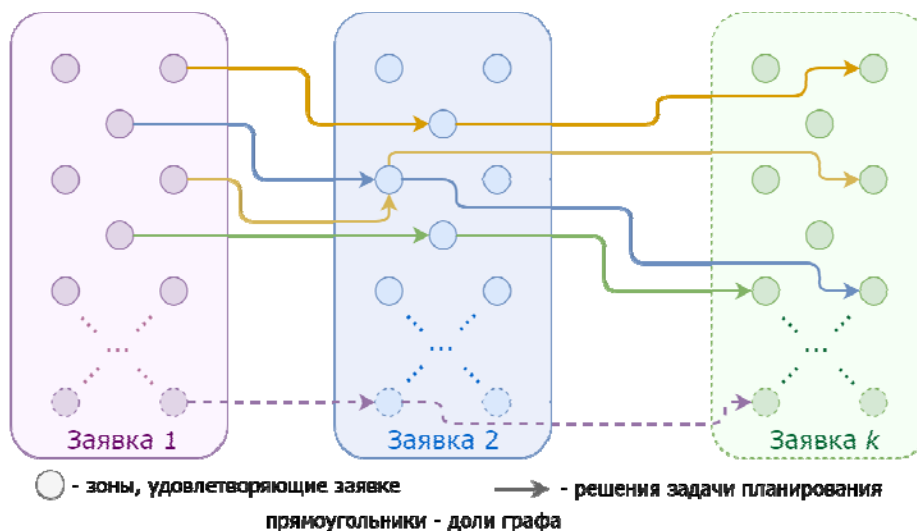
$$\text{ЗВК}_k = (n, G_k),$$

$$G_k = \{g_1^k, \dots, g_{s_k}^k\},$$

где  $s_k$  – число ЗРВ, подходящих для  $k$ -й заявки;  $g_j^k$  – ЗРВ,  $j = 1 \dots s_k$ .

Покажем, что в такой постановке задача составления расписания сеансов связи сводится к задаче выделения полного подграфа в некотором графе.

Рассмотрим множество  $G$  – дизъюнктное объединение множеств  $G_k$ . Дизъюнктность объединения означает, что даже если некоторые  $g_j^k$  и  $g_j^{k'}$ ,  $k \neq k'$ , совпадают как ЗРВ, они рассматриваются как разные элементы множества  $G$ .



K-дольный граф задачи распределения средств управления КА

Между элементами множества  $G$  можно задать двоичное отношение совместимости, означающее, что одновременный выбор этих элементов (ЗРВ) для проведения сеансов связи не приведет к конфликту:

$\delta(g_j^k, g_j^{k'}) = 1, k \neq k'$  и соответствующие ЗРВ не конфликтуют;

$\delta(g_j^k, g_j^{k'}) = 0, k = k'$  или  $k \neq k'$  и соответствующие ЗРВ конфликтуют.

При этом зоны ЗРВ<sub>*i*</sub> и ЗРВ<sub>*j*</sub> назовем конфликтующими, если выполнены условия:

$$n_i = n_j \text{ ИЛИ } m_i = m_j \\ (t_{нач_i}^{нач_i}, t_{кон_i}^{кон_i}) \cap (t_{нач_j}^{нач_j}, t_{кон_j}^{кон_j}) \neq \emptyset$$

Задача составления расписания сеансов связи, таким образом, сводится к выделению в каждом из подмножеств  $G_k$  единственного элемента  $g_0^k$ , т. е. выбору ЗРВ для удовлетворения  $k$ -й заявки на сеанс связи. Выбор должен быть осуществлен без конфликтов, т. е. для любых  $k \neq k'$ :

$$\delta(g_0^k, g_0^{k'}) = 1.$$

Заметим, что множество  $G$  с заданным на нем двоичным отношением  $\delta$  можно интерпретировать как простой неориентированный граф [3], т. е. неориентированный граф без петель и кратных ребер. Более того, граф  $G$  является  $K$ -дольным графом, т. е. может быть разбит на  $K$  непересекающихся независимых подмножеств (подграфов, внутри которых нет ни одного ребра). В такой постановке задача сводится к нахождению полного подграфа из  $K$  вершин в графе  $G$ . Иными словами, нахождение  $k$ -клик в  $K$ -дольном графе  $G$ , где  $K$  – клика, по определению, есть полный подграф (подграф, в котором каждая вершина соединена с каждой) из  $K$  вершин.

Поиск полного подграфа – NP-полная задача, поэтому помимо алгоритмов, позволяющих найти точное решение, имеет смысл рассматривать и эвристические алгоритмы [4–5], существенно ускоряющие процесс поиска ответа.

Таким образом, проведенные исследования позволяют использовать теорию графов при решении задачи распределения средств управления. Формализация задачи дает возможность учитывать любые средства управления при планировании сеансов связи. Для по-

строения плана задействования требуется только информация о совместимости и возможности проведения сеансов связи в конкретные моменты времени.

#### Библиографические ссылки

1. Макаров М., Медведев А. Наземные комплексы управления космическими аппаратами // Наука и технологии в промышленности. 2012. № 1. С. 9.
2. Мальцев Г., Стогов Г., Терехов А. Перспективы создания комплексов управления космическими аппаратами на базе ключевых технологий // Информационно-управляющие системы. 2006. № 5.
3. Харари Ф. Теория графов. М.: Мир, 1973.
4. Bron C., Kerbosch J. Algorithm 457: finding all cliques of an undirected graph // Communications of the ACM. 1973. Т. 16, № 9. С. 575–577.
5. Tomita E., Tanaka A., Takahashi H. The worst-case time complexity for generating all maximal cliques and computational experiments // Theoretical Computer Science. 2006. Т. 363, № 1. С. 28–42.

#### References

1. Makarov M., Medvedev A. *Nazemnye komplekсы upravleniya kosmicheskimi apparatami* [Ground control systems for space vehicles]. Science and Technology in Industry, 2012. № 1. P. 9.
2. Malcev G., Stogov G., Terekhov A. *Perspektivy sozdaniya komplekсов upravleniya kosmicheskimi apparatami na baze klyuchevykh tekhnologij* [Prospects for creating control systems for space vehicles based on key technologies]. Information-control systems, 2006. № 5.
3. Harari F. *Teoriya grafov* [Graph Theory]. M.: Publishing house Mir, 1973.
4. Bron C., Kerbosch J. *Algorithm 457: finding all cliques of an undirected graph*. Communications of the ACM. 1973. Т. 16, № 9. P. 575–577.
5. Tomita E., Tanaka A., Takahashi H. *The worst-case time complexity for generating all maximal cliques and computational experiments*. Theoretical Computer Science. 2006. Vol. 363, № 1. P. 28–42.

© Баранова И. С., Кусова В. Р., Манушичев С. Ю., Овечко В. М., 2018

## ОСНОВНЫЕ ПРОТОКОЛЫ КВАНТОВОЙ КРИПТОГРАФИИ

В. И. Гриц, И. Я. Шестаков, Д. О. Малышев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: botanic\_95@mail.ru

*Рассмотрены основные протоколы, используемые в квантовой криптографии. Приведены схемы работы рассматриваемых протоколов.*

*Ключевые слова: квантовый протокол, фотон, квантовое состояние, базис, поляризация*

## MAIN PROTOCOLS OF QUANTUM CRYPTOGRAPHY

V. I. Grits, I. Ya. Shestakov, D. O. Malyshev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: botanic\_95@mail.ru

*The main protocols used in quantum cryptography are considered. The schemes of operation of the protocols under consideration are given.*

*Keywords: quantum protocol, photon, quantum state, basis, polarization*

**Квантовая связь** – это совокупность методов для передачи квантовой информации, т. е. информации, закодированной в квантовых состояниях (КС), из одной пространственной точки в другую. Носителями квантовой информации являются квантовые системы, которые могут находиться в различных квантовых состояниях.

Наиболее подходящими квантовыми системами, используемыми для передачи КС на большие расстояния, являются фотоны. Они распространяются со скоростью света, позволяют кодировать информацию в частотных, фазовых, амплитудных, поляризационных и временных переменных. К тому же использование фотонов как носителей информации позволяет применять ряд технологических достижений в области классических телекоммуникаций – оптические волоконные линии связи, всевозможные модуляторы и преобразователи оптических сигналов.

Первый протокол квантового распределения ключей был создан Жилем Brassаром и Чарльзом Беннетом в 1984 году и получил название BB84. Для передачи данных используются фотоны, поляризованные в четырех разных направлениях, в двух базисах – под углом 0 и 90 градусов (обозначается знаком +) либо 45 и 135 градусов (х). Отправитель сообщения А (традиционно его называют «Алиса») поляризует каждый фотон в случайно выбранном базисе, а затем отправляет его получателю В – «Бобу». Боб измеряет каждый фотон, тоже в случайно выбранном базисе. После этого Алиса по открытому каналу сообщает Бобу последовательность своих базисов, и Боб отбрасывает неправильные (не совпавшие) базисы и сообщает Алисе, какие данные «не прошли». При этом сами значения, полученные в результате измерений, они по

открытому каналу не обсуждают. Если шпион (его обычно называют «Евой», от английского eavesdropping – подслушивание) захочет перехватить секретный ключ, он должен будет измерять поляризацию фотонов. Поскольку он не знает базиса, он должен будет определять его случайным образом. Если базис будет определен неправильно, то Ева не получит верных данных, а кроме того, изменит поляризацию фотона. Появившиеся ошибки сразу обнаружат и Алиса, и Боб. Схема работы данного протокола приведена в таблице.

Еще одним протоколом КРК является B92, запатентованный в 1992 году ученым Чарльзом Беннетом. Отсюда и название B92, под которым этот протокол известен в наше время. В качестве носителей информации в данном протоколе выступают кубиты. Основная особенность протокола, в сравнении с BB84, заключается в том, что в нем используется не 4, а 2 состояния.

Согласно фундаментальным законам физики (принцип неопределенности Гейзенберга), наблюдение за квантовой системой неизбежно изменяет ее состояние. Однако эта трудность имеет и положительный эффект, а именно сохранение секретности при передаче квантовой информации по открытому каналу.

Так как согласно принципу неопределенности Гейзенберга отличие двух неортогональных состояний друг от друга не представляется возможным, то невозможно и достоверное определение значения бита. Кроме этого попытки считать состояние бита приводят к его изменению. Это и есть основная идея протокола B92. В связи с использованием для кодирования двух состояний вместо четырех реализация данного протокола на практике оказывается проще [1; 2].

**Пример шифрования по протоколу BB84**

Последовательность фотонов Алисы		/	/	-	\			-	-
Последовательность анализаторов Боба	+	x	+	+	x	x	x	+	x
Результаты измерений Боба	0	0	1	1	1	0	1	1	0
Анализаторы выбраны верно	+	+		+	+			+	
Ключ	0	0		1	1			1	

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	○	+	○	+	+	+	+	+	○	○	+	○	○	○	+
2	↻	↑	↻	↔	↑	↑	↔	↔	↻	↻	↑	↻	↻	↻	↑
3	+	○	○	+	+	○	○	+	○	+	○	○	○	○	+
4	↑		↻	↔	↑	↻	↻	↔	↻	↑	↻	↻		↻	↑
5	+		○	+	+	○	○	+	○	+	○	○		○	+
6			✓	✓	✓			✓	✓			✓		✓	✓
7			↻	↔	↑			↔	↻			↻		↻	↑
8			1	0	1			0	1			1		0	1
9			1	0				0				1			1
10			0	1				0	1			1		0	1

Рис. 1. Пример распределения ключей

Двоичный сигнал станции Алиса	0	1	0	1	0	1	0	1
Поляризационный код станции Алиса	↔	↑	↖	↗	↔	↑	↖	↗
Детектирование станцией Боб	+	+	+	+	x	x	x	x
Двоичный сигнал станции Боб	0	?	?	1	0	?	?	1
Совпадают ли базисы	нет	да	нет	да	да	нет	да	нет

Рис. 2. Пример распределения ключей по протоколу 4 + 2

Начальное состояние фотонов определяется способом реализации протокола. Если протокол реализован на основе ЭПР-коррелированных фотонов, то Алисой создаются такие пары фотонов, в которых она может измерить их состояние, затем Бобу отправляются невозмущенные частицы. Иначе генерируются фотоны со случайной поляризацией и отправляются Бобу. На втором этапе измеряется поляризация фотонов с использованием случайно выбранного базиса. Затем Алиса и Боб сравнивают базисы, которые они использовали, и оставляют ту информацию, при декодировании которой базисы совпадали. Алиса и Боб сравнивают четность случайно выбранного подмножества бит. Затем один бит отбрасывается в связи с открытием при такой проверке одного бита. Пример распределения ключей по данному протоколу приведен на рис. 1. В данной таблице номер строки соот-

ветствует номеру шага, а данные, содержащиеся в строке – результату, полученному на данном шаге.

Квантовый протокол 4 + 2 (BB84(4 + 2)) – протокол квантового распределения ключей, который был впервые предложен Б. Хаттнером, Н. Иммото, Н. Гиссином, Т. Мором в 1995 году. Протокол использует 4 квантовых состояния, из которых формируются два сопряжённых базиса с неортогональными состояниями, причем неортогональность сохраняется, если рассматривать попарные состояния из разных базисов. В качестве носителей информации выступают кубиты.

Протокол базируется на идее, согласно которой неортогональность состояний внутри каждого базиса приводит к тому, что перехватчик не сможет получить информацию о передаваемом состоянии даже тогда, когда ему известен базис. 4 + 2 использует своеобразную комбинацию протоколов BB84 и B92,

отсюда и его название. Схема работы протокола показана на рис. 2.

#### Библиографические ссылки

1. Килин С. Я. Квантовая информация // Успехи физических наук. 1999. Т. 168. Вып. 5. Физика квантовой информации / под ред. Д. Боумейстера и др. М., 2002.

2. Нильсен М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация. М., 2006.

#### References

1. Kilin S. Ya. Kvantovaya informatsiya // Uspekhi fizicheskikh nauk. 1999. T. 168, Vyp. 5. Fizika kvantovoy informatsii / pod red. D. Boumeystera et al. M., 2002.

2. Nil'sen M., Chang I. Kvantovyye vychisleniya i kvantovaya informatsiya. M., 2006.

© Гриц В. И., Шестаков И. Я.,  
Малышев Д. О., 2018

УДК 621.3.088.7

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА МОДУЛЯ ЗАРЯДНО-РАЗРЯДНОГО УСТРОЙСТВА

Е. А. Копылов\*, Е. А. Мизрах, Д. К. Лобанов

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

\*E-mail: evgesh72@mail.ru

*Исследованы динамические характеристики модуля зарядно-разрядного устройства с нагрузочным преобразователем для ресурсных испытаний литий ионных аккумуляторов большой емкости для космических аппаратов.*

*Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, заряд-разряд, система управления, нагрузочный преобразователь, корректирующее устройство.*

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE CHARGE-DISCHARGE DEVICE MODULE PROTOTYPE

E. A. Kopylov\*, E. A. Mizrakh, D. K. Lobanov

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

\*E-mail: evgesh72@mail.ru

*The charge-discharge device intended for spacecraft high capacity li-ion battery tests. Authors investigated dynamic characteristics of the charge-discharge device module with load converter.*

*Keywords: li-ion battery, charge-discharge, control system, load converter, correction element.*

Для автоматизации электрических испытаний литий ионных аккумуляторов (ЛИА), в том числе ресурсных испытаний с динамическим стрессовым тестированием (ДСТ), авторами разработано зарядно-разрядное устройство с нагрузочным преобразователем (ЗРУ-НП) [1–6] с широтно-импульсным методом регулирования, которое благодаря оригинальной топологии НП [3–6], имеет следующие достоинства:

- возможность обеспечения требуемых значений атрибутов ДСТ ЛИА большой ёмкости;

- расширенный диапазон токов тестирования ЛИА (0,1А – 160А).

На этапе проектирования был разработан и изготовлен опытный образец для оценки технических характеристик ЗРУ-НП. В ходе испытаний опытного образца исследовались статические и динамические характеристики ЗРУ-НП для оценки работоспособности и соответствия требованиям в режимах электрических испытаний ЛИА, включая ДСТ.

В режиме стабилизации тока и мощности заряда/разряда ЛИА ЗРУ-НП [1–6] представляет собой два взаимосвязанных контура управления: контура стабилизации входного тока/мощности и контура стабилизации входного напряжения мостового трансформаторного преобразователя (МТП).

Для получения переходных процессов в этих контурах использовалась схема эксперимента, представленная на рис. 1.

При проведении испытаний за положительное направление тока принято направление тока при заряде аккумулятора. На рис. 2 представлены переходные процессы напряжения  $U_{МТП}$  в контуре стабилизации напряжения МТП (верхний график) и тока аккумулятора  $I_a$  (нижний график): на рис. 2, а – при линейном увеличении разрядного тока от величины  $I_3 = 20$  А до  $I_3 = 160$  А, на рис. 2, б – при линейном увеличении разрядной мощности аккумулятора с величины  $P_3 = 3$  Вт до  $P_3 = 640$  Вт. В этих случаях скорость нарастания тока аккумулятора  $V_I = 350$  А/с. Развёртка канала напряжения  $U_{МТП}$  соответствует 5 В/дел и 80 А/дел для канала измерения тока  $I_a$ . развертка по времени – 100 мс/дел.

Из рис. 2, а, б видно, что отклонение тока от линейного характера незначительно, перерегулирование напряжения  $U_{МТП}$  не превышает 42 %.

На рис. 2, в представлены осциллограммы переходных процессов в контуре стабилизации  $U_{МТП}$  и тока аккумулятора  $I_a$  при переключении из режима разряда током –50 А в режим заряда током 50 А с увеличенной скоростью нарастания тока до 1000 А/с. Развертка канала напряжения  $U_{МТП}$  соответствует 5 В/дел и 37 А/дел для канала измерения тока  $I_a$ . По времени развертка составляет 50 мс/дел.

Из рис. 2, в видно, что задержка при переключении из режима разряда в режим заряда не превышает 0,3 с, перерегулирование напряжения  $U_{МТП}$  не превышает 42 %.

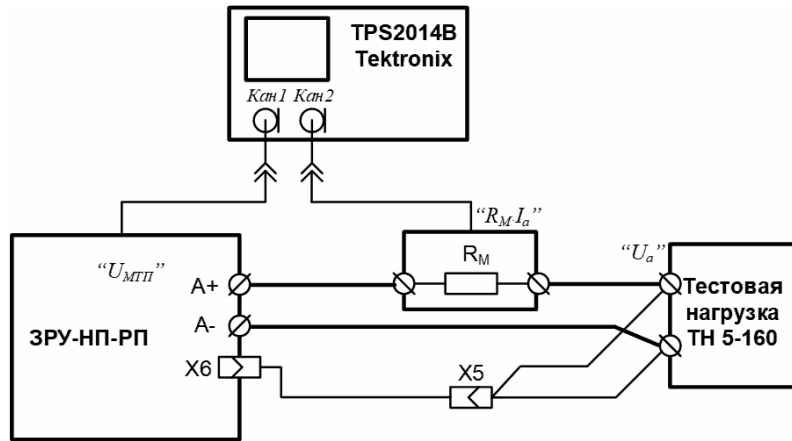


Рис. 1. Схема эксперимента для снятия переходных процессов по управлению

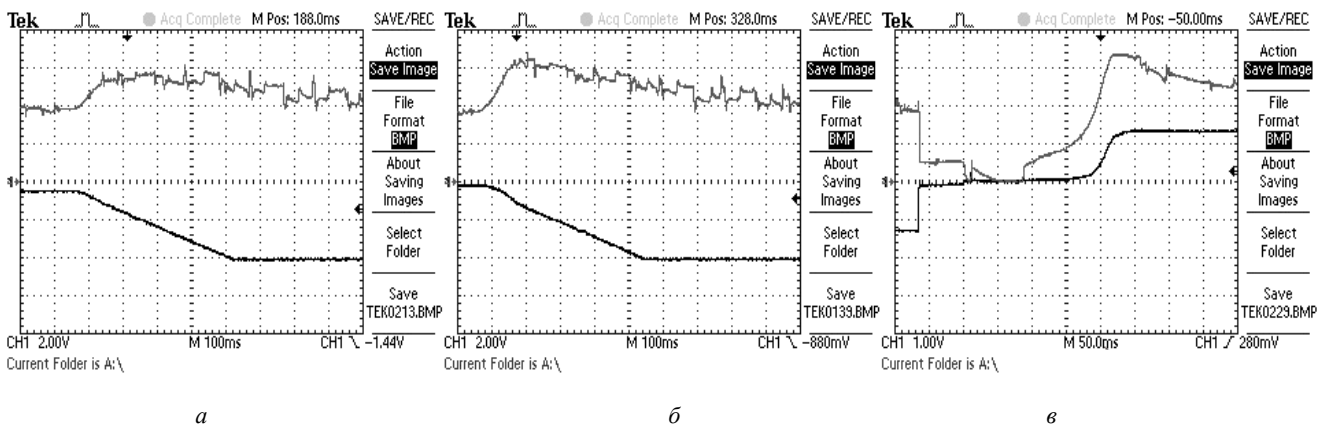


Рис. 2. Переходные процессы при линейном увеличении разрядного тока (а); переходные процессы при линейном увеличении разрядной мощности (б); переходные процессы при переключении из режима разряда в режим заряда (в)

**Заключение.**

1. Электрические характеристики опытного образца ЗРУ-НП-РП соответствуют требованиям к ЗРУ, обеспечивающим полный спектр электрических испытаний (включая ресурсные) литий-ионных аккумуляторов большой емкости;

2. Проведенные эксперименты с опытным образцом модуля ЗРУ подтвердили правильность динамического синтеза корректирующих устройств контуров стабилизации атрибутов ЛИА и контура стабилизации входного напряжения МТП.

**Библиографические ссылки**

1. Пат. 123530 РФ, МПК G01N27/416. Устройство для испытания аккумуляторного элемента / Мизрах Е. А., Копылов Е. А., Нестеришин М. В., Козлов Р. В., Лобанов Д. К.; № 2012127508 ; заявл. 02.07.12. Опубл. 27.12.12.

2. Пат. 153595 РФ, МПК H02M 3/335, H02M 3/337, H02M 3/28, H02M 3/24. Преобразователь напряжения / Мизрах Е. А., Лобанов Д. К., Федченко А. С., Копылов Е. А.; № 2014147920 ; заявл. 27.11.14. Опубл. 30.06.15.

3. Static accuracy of the automated stand for lithium batteries testing / A. S. Fedchenko, E. A. Kopylov, D. K. Lobanov et al. // 18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), 2016, April 18–20.

4. Study of a lithium-ion battery charge-discharge test unit characteristics / A. S. Fedchenko, E. A. Kopylov, D. K. Lobanov et al. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 122 (2016). 2015. Doi: 10.1088/1757- 899X/122/1/012015.

5. On the Static Accuracy of Charge-Discharge Units Intended for Electrical Tests of High Capacity Li-ion Batteries / E. A. Mizrah, D. K. Lobanov, E. A. Kopylov et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Siberian Conference Reshetnev Readings-2016. 2016. Doi: 10/1088/1757-899X/255/1/012016.

6. Fedchenko A. S., Kopylov E. A., Lobanov D. K. An automated charge-discharge unit for electrical tests of individual high capacity lithium-ion battery cells. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR.



### References

1. Mizrakh E. A., Kopylov E. A., Nesterishin M. V., Kozlov R. V., Lobanov D. K. Ustroystvo dlya ispytaniya akkumulyatornogo elementa. Patent RF, No. 123530, 2012.
2. Mizrakh E. A., Lobanov D. K., Fedchenko A. S., Kopylov E. A. Ustroystvo Preobrazovatel' napryazheniya. Patent RF, No. 153595, 2015.
3. Static accuracy of the automated stand for lithiumion batteries testing / A. S. Fedchenko, E. A. Kopylov, D. K. Lobanov et al. // 18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), 2016, April 18–20
4. Study of a lithium-ion battery charge-discharge test unit characteristics / A. S. Fedchenko, E. A. Kopylov, D. K. Lobanov et al. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 122 (2016). 2015. Doi: 10.1088/1757-899X/122/1/012015.
5. On the Static Accuracy of Charge-Discharge Units Intended for Electrical Tests of High Capacity Li-ion Batteries / E. A. Mizrah, D. K. Lobanov, E. A. Kopylov et al. // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering, International Siberian Conference Reshetnev Readings – 2016. 2016. Doi: 10/1088/1757-899X/255/1/012016.
6. Fedchenko A. S., Kopylov E. A., Lobanov D. K. An automated charge-discharge unit for electrical tests of individual high capacity lithium-ion battery cells. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. Omsk : Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR. ISBN: 978-1-4799-7102-2.

© Копылов Е. А., Мизрах Е. А., Лобанов Д. К., 2018

УДК 629.7.064.52

## ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОВОЛЬТНОГО ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ЗАРЯДНО-РАЗРЯДНОГО УСТРОЙСТВА ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Е. А. Копылов, Е. А. Мизрах, Д. К. Лобанов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: u649@yandex.ru

*Проведено исследование статических и динамических характеристик низковольтного импульсного преобразователя напряжения зарядно-разрядного устройства литий-ионных аккумуляторов космических аппаратов.*

*Ключевые слова: зарядно-разрядное устройство, аккумулятор, импульсный преобразователь.*

## LITHIUM-ION CELLS CHARGE-DISCHARGE DEVICE LOW-VOLTAGE PULSE CONVERTER INVESTIGATION

E. A. Kopylov, E. A. Mizrakh, D. K. Lobanov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: u649@yandex.ru

*Authors investigated static and dynamic characteristics of the low-voltage pulse converter for spacecraft lithium-ion cells charge-discharge device.*

*Keywords: charge-discharge device, battery cell, pulse converter.*

Для наземных испытаний литий-ионных аккумуляторов используются зарядно-разрядные устройства (ЗРУ) [1; 2], содержащие в себе: источник питания, два преобразователя, систему управления и четыре ключа, позволяющие менять направление тока через аккумуляторный элемент (АЭ), тем самым обеспечивает смену режимов заряд-разряд.

Два импульсных преобразователя были применены для обеспечения требуемых характеристик зарядно-разрядного устройства. Причем, первый преобразователь стабилизирует ток аккумулятора, а второй преобразователь стабилизирует выходное напряжение первого преобразователя, что определяет систему управления как двухконтурную. Поскольку между преобразователями существует взаимовлияние, то обеспечить устойчивость такой системы относительно сложно [3–5]. С целью упрощения в данной работе было предложено объединить два преобразователя в один и упростить систему управления до одноконтурной. При этом необходимо сохранить широкий диапазон регулирования входного тока преобразователя (от 0 до 160 А).

Для достижения поставленной цели в работе была разработана структурная схема ЗРУ (рис. 1), составлено математическое описание импульсного преобразователя напряжения (ИПН), проведен анализ его статических и динамических характеристик, разработана имитационная модель преобразователя для пакета схемотехнического моделирования Micro-CAP, проведены вычислительные эксперименты.

Для обеспечения режима стабилизации тока заряда/ разряда АЭ, основу ЗРУ (рис. 1) составляет стабилизатор входного тока, содержащий импульсный повышающий преобразователь (ИПП) и мостовой трансформаторный преобразователь (МТП), объединенные в один ИПН, датчик тока (ДТ) и систему управления (СУ). ИПП обеспечивает низкие пульсации входного тока за счет наличия входного дросселя, что позволяет поддерживать удовлетворительный режим токов входной емкости импульсного преобразователя тока. ИПП работает с постоянным коэффициентом заполнения. МТП представляет собой мостовой преобразователь с трансформаторной гальванической развязкой. За счёт использования трансформатора обеспечивается относительно большой коэффициент трансформации напряжения. Входной ток ИПН регулируется путем соответствующего изменения коэффициента заполнения сигнала управления МТП.

Для проверки принятых схемотехнических решений и исследования статических и динамических свойств была разработана имитационная модель ИПН в пакете схемотехнического моделирования Micro-CAP и проведены вычислительные эксперименты (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что ИПН обеспечивает широкий диапазон регулирования тока аккумулятора. Расхождение графиков связано с тем, что при математическом расчете не учитывалось «мёртвое» время (временная задержка коммутации ключей, необходимая для исключения возникновения сквозных токов).

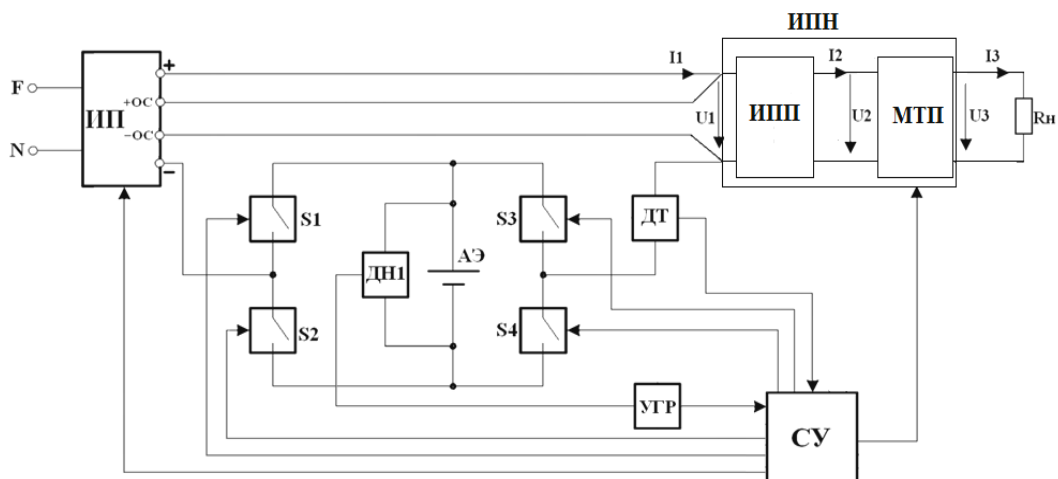


Рис. 1. Структурная схема ЗРУ:

ИП – источник питания; ОС – обратная связь; ИПП – импульсный повышающий преобразователь; МТП – мостовой трансформаторный преобразователь; ИПН – импульсный преобразователь напряжения; ДТ – датчик тока; ДН1 – датчик напряжения; УГР – устройство гальванической развязки; АЭ – аккумуляторный элемент; СУ – система управления;  $S_1$ - $S_4$  – ключи;  $R_n$  – сопротивление нагрузки;  $U_1$  – входное напряжение ИПН;  $U_2$  – входное напряжение МТП;  $U_3$  – выходное напряжение ИПН;  $I_1$  – входной ток ИПН;  $I_2$  – входной ток МТП;  $I_3$  – выходной ток ИПН

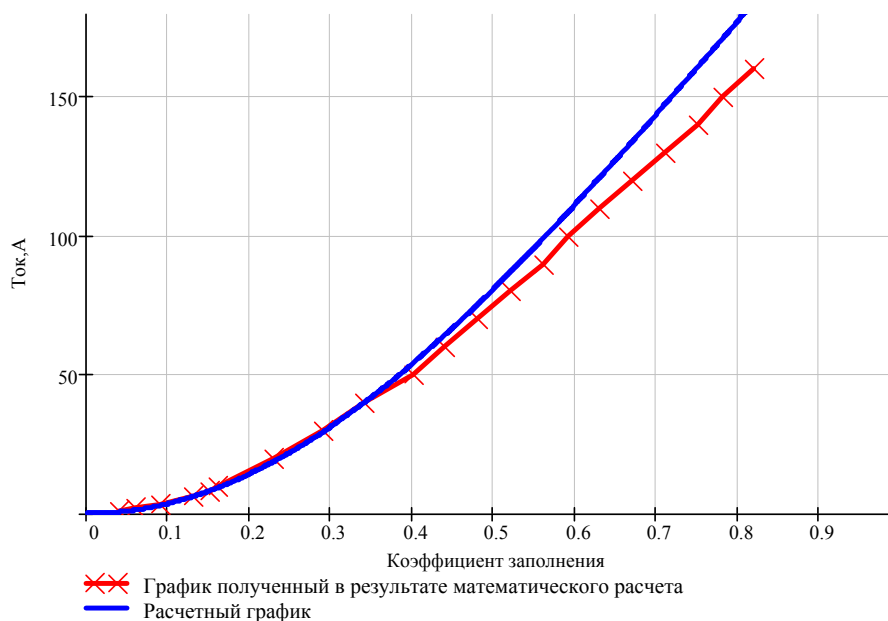


Рис. 2. Регулировочная характеристика ИПН

Таким образом, в ходе данной работы была разработана структурная схема ИПН, составлено математическое описание ИПН, были разработаны функциональные схемы, проведен анализ статической погрешности, устойчивости и коррекция, разработана методика синтеза ИПН, разработана имитационная модель для пакета Micro-CAP.

#### Библиографические ссылки

1. Патент на полезную модель 123530 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G01N 27/416. Устройство для ис-

пытания аккумуляторного элемента / Мизрах Е. А., Копылов Е. А., Нестеришин М. В., Козлов Р. В., Лобанов Д. К. № 2012127508/28 ; заявл. 02.07.2012 ; опубл. 27.12.2012, Бюл. № 36.

2. Патент на полезную модель 153595 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> H02M 3/335, H02M 3/337, H02M 3/28, H02M 3/24. Преобразователь напряжения / Мизрах Е. А., Лобанов Д. К., Федченко А. С. Копылов Е. А. № 2014147920/07 ; заявл. 27.11.2014 ; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 21.

3. Kopylov E. A., Lobanov D. K., Mizrakh E. A. Control process absolute stability analysis of charge-

discharge device with load converter in constant power mode // *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018. Vol. 19, No. 2. P. 281–292.

4. Study of a lithium-ion battery charge-discharge test unit characteristics / Fedchenko A. S., Kopylov E. A., Lobanov D. K., Mizrah E. A. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 122. P. 012015. Doi: 10.1088/1757-899X/122/1/012015.

5. Static accuracy of the automated stand for lithium-ion batteries testing. Fedchenko A. S., Kopylov E. A., Lobanov D. K., Mizrah E. A. *18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, 2016. P. 7495336. Doi: 10.1109/MELCON.2016.7495336.

#### References

1. Mizrakh E. A., Kopylov E. A., Nesterishin M. V., Kozlov R. V., Lobanov D. K. *Ustroystvo dlya ispytaniya akkumulyatornogo elementa* [Device for battery cell testing]. Patent RF, No. 123530, 2012.

2. Mizrakh E. A., Lobanov D. K., Fedchenko A. S., Kopylov E. A. *Preobrazovatel napryajeniya* [Voltage converter]. Patent RF, No. 153595, 2015.

3. Kopylov E. A., Lobanov D. K., Mizrakh E. A. Control process absolute stability analysis of charge-discharge device with load converter in constant power mode. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 2. P. 281–292.

4. Fedchenko A. S., Kopylov E. A., Lobanov D. K., Mizrah E. A. Study of a lithium-ion battery charge-discharge test unit characteristics. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 122. P. 012015. Doi: 10.1088/1757-899X/122/1/012015.

5. Fedchenko A. S., Kopylov E. A., Lobanov D. K., Mizrah E. A. Static accuracy of the automated stand for lithium-ion batteries testing. *18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, 2016. P. 7495336. Doi: 10.1109/MELCON.2016.7495336.

© Копылов Е. А., Мизрах Е. А., Лобанов Д. К., 2018

УДК 621.376.4

## МНОГОКАНАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ВЛИЯНИЯ РАССОГЛАСОВАНИЯ ИМПЕДАНСОВ ПРИ КАЛИБРОВКЕ ИМИТАТОРОВ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Н. М. Крат

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

*Описан многоканальный алгоритм для уменьшения систематической составляющей погрешности оценки внутренней задержки имитатора навигационных сигналов при калибровке последнего. Приведены результаты его моделирования, проведенного с целью оценки потенциальной точности.*

*Ключевые слова: имитатор навигационных сигналов, калибровка, задержка сигнала, многоканальный алгоритм, корреляционная обработка, систематическая ошибка, отраженный сигнал.*

## MULTICHANNEL ALGORITHM FOR IMPEDANCE MISMATCH REDUCING AT NAVIGATION SIGNAL SIMULATOR CALIBRATION

N. M. Krat

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: kratnm@iss-reshetnev.ru

*Multichannel algorithm for systematic inaccuracy of inner delay estimation reducing while navigation signal simulator calibration is described. Results of algorithm modelling for its' accuracy estimation are carried.*

*Keywords: navigation signal simulator, calibration, signal delay, multichannel algorithm, correlation processing, systematic inaccuracy, reflected signal.*

Одной из задач, решаемых в радиотехнике, является улучшение точности радиотехнических устройств и систем. В качестве примера можно привести задачу уменьшения эквивалентной погрешности псевдодальности (ЭПД) за счет космического комплекса системы ГЛОНАСС [1]. Так, к 2020 году в рамках федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 гг.» требуется довести значение ЭПД до уровня 30–50 см [2].

Проведенный анализ составляющих ЭПД показал, что одним из необходимых условий для достижения требуемого значения ЭПД является учет внутренних задержек в радиочастотных трактах навигационной аппаратуры, обеспечивающей измерение параметров навигационных сигналов в целях эфемеридно-временного обеспечения космических аппаратов ГЛОНАСС.

Для определения внутренней задержки в навигационной аппаратуре проводится её калибровка. Обычно калибровка выполняется с применением имитаторов навигационных сигналов (ИНС). Для обеспечения калибровки навигационной аппаратуры с требуемой точностью необходимо, чтобы внутренняя задержка в ИНС была известна, в связи с чем проводится калибровка ИНС. Одним из источников систематической погрешности калибровки ИНС является рассогласование волновых сопротивлений средств

измерений. Значение этой погрешности в зависимости от качества согласования и длины кабельной сборки может достигать сотни пикосекунд [3]. Данное явление эквивалентно многолучевому распространению с особенностью, что луч, соответствующий отраженному сигналу, приходит с того же направления, что и прямой сигнал, но с дополнительной задержкой. При этом параметры отраженного сигнала постоянны во времени и определяются значениями электрических параметров измерительных приборов, входящих в схему измерения. Значение амплитуды отраженного сигнала составляет сотые доли от амплитуды полезного сигнала.

Предлагаемый алгоритм калибровки ИНС подразумевает, что задержка отраженного сигнала относительно прямого известна, и имеется осциллограмма сигнала на входе устройства обработки сигналов.

Алгоритм заключается в последовательном переборе значений истинной задержки полезного сигнала и произведения модуля комплексного коэффициента отражения на косинус угла между прямым и отраженным сигналами и выборе таких значений, при которых взаимные корреляционные функции между опорным сигналом и сигналом на входе осциллографа, а также опорным сигналом и сформированным аналогом входного наиболее близки друг к другу (минимальная сумма квадратов невязок).

## СКО шумовой составляющей алгоритма

Отношение сигнал-шум по мощности, дБ	56,5	42,5	36,5	22,5	16,5
СКО оценки алгоритма, пс	0	4,5	9,3	42,2	79,7
СКО оценки корреляционным методом, пс	0,7	3,3	6,5	32,4	64,2

Математически алгоритм можно описать следующим образом:

$$\sum_{t_i=t_{\max}-\frac{T}{2}}^{t_{\max}+\frac{T}{2}} \left( K_{\text{синт}}(t_i, t_0^*, mp^*) - K_0(t_i) \right)^2 \rightarrow \min(t_0^*, mp^*),$$

где  $t_0^*$  – оценка задержки прямого сигнала;  $mp^*$  – оценка значения произведения модуля комплексного коэффициента отражения на косинус угла между полезным и отраженным сигналами;  $t_{\max}$  – оценка задержки сигнала, полученная стандартным корреляционным методом;  $T$  – длительность чипа дальномерного кода навигационного сигнала;  $K_0$  – взаимная корреляционная функция (ВКФ) между входным и опорным сигналами;  $K_{\text{синт}}$  – ВКФ между расчетным аналогом входного сигнала, учитывающего рассогласование и опорным сигналом.

ВКФ  $K_{\text{синт}}$  для момента прихода полезного сигнала  $t_0^*$  рассчитывается согласно следующему выражению:

$$K_{\text{синт}}(t_i, t_0^*, mp^*) = \sum_{t=0}^{T_{\text{ПСП}}} s_{\text{оп}}(t) \left( s_{\text{оп}}(t-t_0^*) + mp^* \cdot s_{\text{оп}}(t-t_0^* - \Delta t) \right).$$

где  $T_{\text{ПСП}}$  – период дальномерного кода навигационного сигнала;  $s_{\text{оп}}$  – опорный сигнал, соответствующий модулирующей последовательности имитируемого сигнала;  $\Delta t$  – дополнительная задержка отраженного сигнала, определяемая электрической длиной кабеля.

Значения параметров  $t_0^*$  и  $mp^*$  последовательно перебираются в диапазоне, определяемом исходя из технических характеристик применяемых средств измерения (длины и допусков на входные сопротивления разъемов кабеля и осциллографа, а также КСВ ИНС) и оценки предельного значения систематической погрешности, приведенного, например [3]. Шаг перебора следует выбирать исходя из требуемого значения остаточной погрешности.

Важнейшим свойством алгоритма является его погрешность, включающая две составляющие: случайную, обусловленную наличием во входном сигнале шума и систематическую, определяемую (предполагается) шагом перебора параметров. Для оценки случайной составляющей алгоритма было проведено компьютерное моделирование. В качестве сигнала использовался открытый сигнал ГЛОНАСС L1OF [4]. Значение  $\Delta t$  составляло 10 нс, значение  $mp$  – 0,015. Для этих условий значение систематической погрешности составляет 150 пс. Шаг перебора по  $\Delta t$  10 пс, по  $mp$  0,001. Результаты моделирования приведены в таблице.

Анализ данных, приведенных в таблице, позволяет сделать следующие выводы:

1) случайная составляющая алгоритма превышает потенциальную точность, определяемую неравенством

Крамера–Рао [5] в 1,2–1,5 раз. Это обусловлено тем, что обработка сигнала не оптимальна, так как форма сигнала точно неизвестна (неизвестно значение  $mp$ );

2) нулевое СКО при отношении сигнал–шум 56,5 дБ обусловлено тем, что задержка полезного сигнала перебиралась с шагом 10 пс, и значение погрешности (с вероятностью 0,997) не превышает 2 пс, что составляет менее половины шага перебора.

Дальнейшие исследования будут направлены на определение систематической составляющей погрешности алгоритма.

## Библиографические ссылки

1. Глобальная спутниковая навигационная система ГЛОНАСС / под ред. В. Н. Харисова, А. И. Перова, В. А. Болдина. 4-е изд., перераб. и доп. М. : ИПРЖР, 2010. 800 с.
2. Федеральная целевая программа «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы» (утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 03.03.2012 г. № 189).
3. Крат Н. М., Савин А. А. Влияние рассогласования импедансов в тракте передачи сигнала при калибровке задержек имитаторов навигационных сигналов // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 3. С. 520–524.
4. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС (Интерфейсный контрольный документ, пятая редакция) М. : Координационный научно-информационный центр РФ, 2008. 74 с.
5. Радиотехнические системы : учебник / Ю. М. Казаринов и др. ; под ред. Ю. М. Казаринова. М. : Академия, 2008. 529 с.

## References

1. Global'naya sputnikovaya navigatsionnaya sistema GLONASS / Pod red. V. N. Kharisova, A. I. Perova, V. A. Boldina. Izd 4-e, pererab. i dop. M. : IPRZhR, 2010. 800 s.
2. Federal'naya tselevaya programma "Podderzhanie, razvitie i ispol'zovanie sistemy GLONASS na 2012–2020 gody" (utverzhdena postanovleniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 03.03.2012 g. № 189).
3. Krat N. M., Savin A. A. Vliyanie rassoglasovaniya impedansov v trakte peredachi signala pri kalibrovke zaderzhok imitatorov navigatsionnykh signalov // Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii. 2017. T. 18, № 3. P. 520–524.
4. Global'naya navigatsionnaya sputnikovaya sistema GLONASS (Interfeysnyy kontrol'nyy dokument, pyataya redaktsiya) M. : Koordinatsionnyy nauchno-informatsionnyy tsentr Rossiyskoy Federatsii, 2008. 74 s.
5. Radiotekhnicheskie sistemy. Uchebnik / Yu. M. Kazarinov i dr. ; pod red. Yu. M. Kazarinova. M. : Akademiya, 2008. 529 s.

УДК 621.316.722, 621.354.342.1

## ПАССИВНАЯ СИСТЕМА ВЫРАВНИВАНИЯ ПО ЕМКОСТИ ДЛЯ ЛИТИЙ-ИОННЫХ БАТАРЕЙ

А. Т. Лелеков, В. Ф. Кадыров, С. Л. Денисов

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.t.lelekov@yandex.ru

*Исследован пассивный метод выравнивания литий-ионных аккумуляторов в батарее по ёмкости. Предложен вариант принципиальной схемы, проведены испытания разработанной системы выравнивания.*

*Ключевые слова: выравнивание, аккумуляторная батарея, заряд, литий-ионный аккумулятор.*

## PASSIVE CELL CAPACITY BALANCING SYSTEM FOR LI-ION BATTERIES

A. T. Lelekov, V. F. Kadyrov, S. L. Denisov

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

*A passive method of capacity equalizing for lithium-ion batteries has been studied. A variant of the circuit is proposed, and tests of the developed system are carried out.*

*Keywords: equalization, passive cell capacity balancing, li-ion battery, charge*

В системе электропитания большинства космических аппаратов в качестве накопителя энергии применены литий-ионные аккумуляторные батареи. Достаточно высокое напряжение внутренней сети (номинальное напряжение 100 В) требует большого количества (не менее 27) соединённых последовательно аккумуляторов, вследствие чего проблема балансировки батареи по ёмкости становится очень актуальной. Батарея разбалансирована, когда накопленный заряд отдельных аккумуляторов различается. При разряде цепочки аккумуляторов одним током, аккумулятор с меньшей ёмкостью разрядится первым, напряжение на нем упадёт, и он либо будет переразряжен (что приведёт к его повреждению), либо контроллер батареи спасая аккумулятор отключит разряд. При этом питание полезной нагрузки прекратится, хотя батарея ещё имеет в запасе энергию. Таким образом, батарея будет работать как самый «слабый» аккумулятор в ней. Вдобавок вследствие того, что характеристики аккумуляторов зависят от текущей ёмкости, они будут иметь разное тепловыделение и, следовательно, различную температуру и скорость деградации характеристик.

Для предотвращения разбаланса батареи применяют различные балансировочные устройства и процедуры [1]. У литий-ионных аккумуляторов напряжение достаточно сильно зависит от ёмкости [2] (на графике «напряжение-ёмкость» нет плоских участков), поэтому батарею обычно балансируют по напряжению, добиваясь равенства напряжений отдельных аккумуляторов. Электрохимия литий-ионных аккумуляторов допускает нахождение напряжения в пределах от 2,4–2,8 В до 4,1–4,3 В, вне этого диапа-

зона скорость деградации существенно (на порядки) выше.

Одним из наиболее простых и надёжных методов выравнивания является использование пассивных выравнивающих устройств (ВУ), типа мощного стабилитрона, настроенного на предельное максимальное напряжение заряда аккумулятора. При заряде батареи по достижении на аккумуляторе предельного напряжения стабилитрон включается и обводит зарядный ток мимо аккумулятора, стабилизируя напряжение на нём и исключая таким образом его перезаряд. При включении ВУ на нем выделяется тепловая энергия, равная  $I_{\text{зар}}U_{\text{АКК}}$ , которая иначе пошла бы на заряд аккумулятора. К окончанию заряда напряжения на аккумуляторах выравниваются. Условием окончания заряда будет превышение напряжениями всех аккумуляторов некоторого порога, близкого к максимальному напряжению заряда аккумулятора.

Для выбора оптимальной по точности, температурной стабильности и надёжности, были проанализированы несколько вариантов принципиальной схемы ВУ, для которых были подобраны электронные компоненты.

Наиболее удачная принципиальная схема приведена на рис. 2, а измеренные выходные вольт-амперные характеристики на рис. 3.

Видно, что результирующая ВАХ имеет как достаточно крутой подъём, так и приемлемый уровень тока для применения в качестве пассивного выравнивающего элемента. Разброс между образцами ВУ по напряжению стабилизации также достаточно мал, и может быть ещё уменьшен прецизионной подгонкой порога управления.

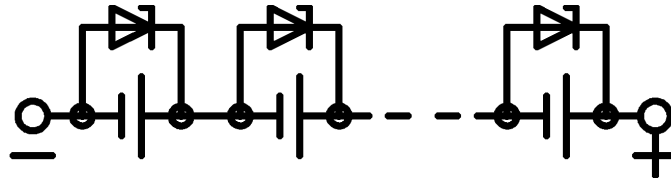


Рис. 1. Структурная схема батареи с пассивной системой выравнивания

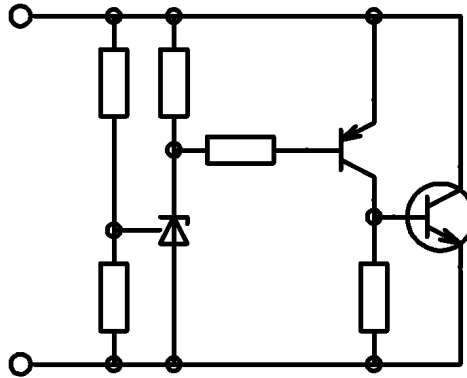


Рис. 2. Принципиальная схема ВУ

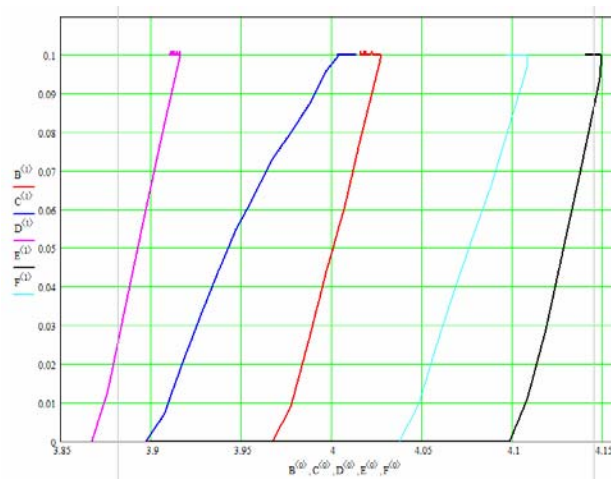


Рис. 3. ВАХ ВУ

В качестве управляемого стабилизатора применена микросхема Т1 TL431 (отечественный аналог К142ЕН19, производство ЗАО «Группа Кремний ЭЛ»). Для разработанной схемы проведены испытания на температурную стабильность характеристик.

#### Библиографические ссылки

1. Lee W. C., Drury D., Mellor P. Comparison of passive cell balancing and active cell balancing for automotive batteries // 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2011. Doi: 10.1109/VPPC.2011.6043108.

2. Таганова А. А., Бубнов Ю. И., Орлов С. Б. Герметичные химические источники тока: Элементы и аккумуляторы. Оборудование для испытаний

и эксплуатации : справочник. СПб. : Химиздат, 2005. 264 с.

#### References

1. Lee W. C., Drury D., Mellor P. Comparison of passive cell balancing and active cell balancing for automotive batteries // 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2011. Doi: 10.1109/VPPC.2011.6043108.

2. Taganova A. A., Bubnov Yu. I., Orlov S. B. Hermetic chemical sources of current: Elements and batteries. Equipment for testing and operation // Handbook. St. Petersburg: Himizdat, 2005. 264 p.

© Лелеков А. Т., Кадыров В. Ф., Денисов С. Л., 2018



УДК 621.396.946

## РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНОГО МЕТОДА ПРОВЕДЕНИЯ ПРОВЕРОК ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЯЗНЫХ ПОЛЕЗНЫХ НАГРУЗОК

Е. Б. Проценко, Л. В. Гришаева, А. В. Бычкова

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

*Важным этапом создания связных полезных нагрузок (далее – ПН) и космических аппаратов (далее – КА) в целом, является подтверждение требуемых высокочастотных характеристик. Верификация полученных высокочастотных характеристик проводится на различных этапах создания КА. Целью данной статьи является разработка нового метода проверок при проведении ВЧ испытаний для связных ПН с целью повышения конкурентоспособности создаваемых ПН и КА в целом.*

*Ключевые слова: космические аппараты, связные полезные нагрузки, наземная экспериментальная обработка.*

## THE DEVELOPMENT OF A PROMISING METHOD FOR CONDUCTING AUDITS OF HIGH-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF THE COMMUNICATION PAYLOADS

E. B. Protsenko, L. V. Grishaeva, A. V. Bychkova

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: eprotsenko@iss-reshetnev.ru

*The most important development phase of communication payloads (PL) and spacecrafts (SC) as a whole is to verify the specified RF performances. Verification of obtained RF performances is carried out at different SC development phases. The purpose of this article is to develop a new verification methods used for RF testing of the communication PL in order to enhance competitiveness of PL and SC as a whole.*

*Keywords: satellites, communication payloads, AIT.*

Расширение спектра решаемых задач и пропускной способности телекоммуникационных космических аппаратов приводит ко все большему усложнению полезных нагрузок (ПН) [1]. К настоящему моменту введены в эксплуатацию КА с ПН, обеспечивающими от шестидесяти до восьмидесяти лучей и содержащими соответствующее количество стволов в Ka-, Q-диапазонах частот.

Однако методы подтверждения заявленных производителем высокочастотных характеристик указанных ПН в большинстве случаев соответствуют методам, используемым для проверок стандартных связных ПН, работающих в более низких С- и Ku-диапазонах.

Поскольку ПН становятся все более сложными по критерию количества ВЧ трактов, применение общепринятых методов испытаний приводит к увеличению (пропорционально количеству стволов) общего времени проверок ПН. В связи с тем, что высокочастотные испытания ПН являются значительным этапом отработки КА, дополнительные проверки ВЧ характеристик могут стать одной из причин существенного увеличения сроков сдачи КА Заказчику. Следует также отметить, что проведение дополнительных испытаний влияет на общую стоимость выполнения работ. В комплексе стоимостной и временной критерии яв-

ляются ключевыми показателями, определяющими выбор поставщика КА.

Прогнозируется, что в ближайшем будущем у операторов спутниковой связи появится потребность в более сложных миссиях с сотнями лучей на каждом КА [2]. Таким образом, пересмотр имеющейся идеологии испытаний перспективных связных ПН, с целью обеспечения их соответствия быстро развивающимся технологиям и требованиям Заказчика, имеет, на сегодняшний день, первоочередную важность. Тем не менее, сокращение сроков испытаний не должно повлиять на качество выпускаемой продукции. Для этого требуется выработать критерий, позволяющий проводить полную верификацию результатов, с меньшими затратами средств и времени.

Таким образом, целью работы является разработка более эффективного метода проведения проверок высокочастотных характеристик связных полезных нагрузок, который заключается в пересмотре идеологии проведения испытаний и определении(я) критериев подтверждения полученного результата от этапа автономных испытаний ПН до сдачи КА Заказчику.

Для проверки характеристик стволов и оценки системного эксплуатационного параметра (интенсивность битовых ошибок (BER – bit error rate)) предлагается использовать модулированные сигналы. Моду-

ляция группового сигнала позволит проводить проверки сразу всех стволов, подключенных к одному порту входной/выходной антенны. Для реализации данного подхода необходима разработка достаточно представительной математической модели ПН.

Данная математическая модель может быть использована на проектных этапах для расчета ожидаемых характеристик ПН. В случае выявления отклонений оборудования от заданных требований, использование математической модели позволит выполнить оценку влияния данных отклонений на интегральные характеристики системы [3].

Разрабатываемый подход может иметь два возможных сценария применения, в зависимости от типа подтверждаемых характеристик:

а) требования к интенсивности битовых ошибок;

б) требования к высокочастотным характеристикам в классическом виде (ЭИИМ, добротность, внутриполосные характеристики стволов и т. д.).

При условии необходимости подтверждения требований к BER, проверку на этапе автономных испытаний предлагается выполнять сравнением измеренного значения с математической моделью ПН. Модель строится на основе измерений отдельных приборов, предоставленных поставщиками оборудования. Испытания в составе КА выполняются в уменьшенном объеме, и критерием успешного выполнения в данном случае выступает сходимость полученных значений с результатами автономных испытаний и математического моделирования ПН (в случае отсутствия автономных ЭТВИ ПН).

Предлагаемый план наземной экспериментальной отработки приведен на рис. 1.

При отсутствии необходимости в подтверждении требования к BER (не задано Заказчиком), автономные испытания, как менее критичный по срокам этап, предлагается проводить с применением немодулированных несущих и модулированных сигналов. Испытания с применением немодулированных несущих позволяют подтвердить заданные требования (ЭИИМ, добротность, внутриполосные характеристики ство-

лов и т. д.), а проверки с применением модулированных сигналов – сформулировать критерии для дальнейших этапов высокочастотных испытаний. Высокочастотные испытания в составе КА выполняются только с применением модулированных сигналов. Предлагаемый план НЭО при отсутствии необходимости в подтверждении требования к BER приведен на рис. 2.

В данном случае соответствие измеренного BER предсказанному (измеренному на предыдущем этапе) позволяет подтвердить интегральные характеристики ПН и точность проведенных ранее измерений в процессе имитаций условий, приближенных к условиям функционирования.

Существующее на данный момент измерительное оборудование позволяет формировать и анализировать требуемые для проверки характеристик перспективных ПН полосы частот. Применение данного метода, по предварительной оценке, позволит значительно сократить (на 30–50 %) время, требуемое для проведения проверок ПН на уровне КА.

Чтобы сохранить полученный временной выигрыш, необходимо также оптимизировать алгоритм обмена данными с Заказчиком КА, организуемый при рассмотрении и утверждении результатов испытаний.

Тенденция к созданию более сложных ПН, очевидно, затронула все телекоммуникационные диапазоны частот (С-, Ku-, Ka- и выше). Следовательно, предлагаемый метод отработки и соответствующую испытательную инфраструктуру можно использовать практически для всех связных ПН.

Суммарный эффект от внедрения описанного метода заключается в значительном сокращении трудоемкости этапа подтверждения заявленных ВЧ характеристик ПН (в зависимости от сложности ПН) и в пропорциональном сокращении общего времени изготовления изделий. Кроме того, использование предлагаемого подхода значительно повысит конкурентоспособность производственного цикла АО «ИСС» при изготовлении КА с полезными нагрузками высокой сложности.

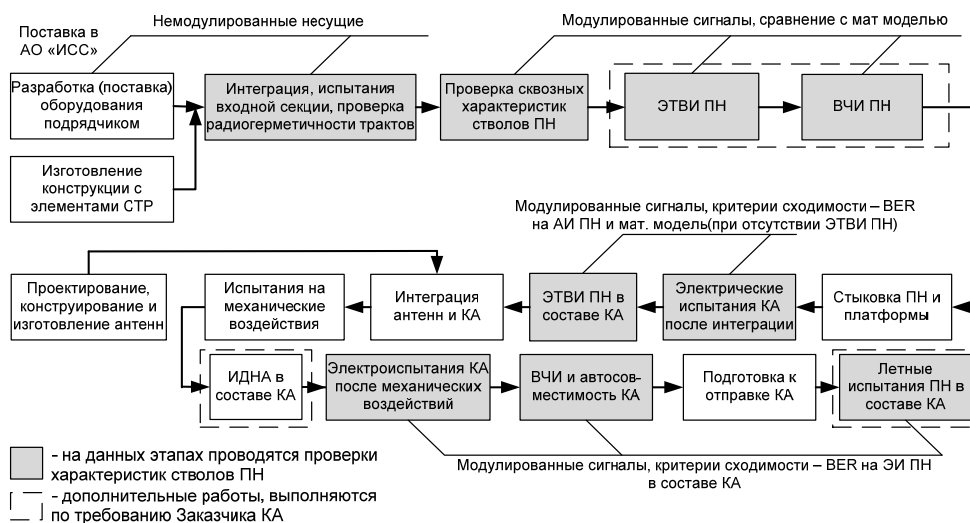


Рис. 1. План НЭО при наличии критерия по BER

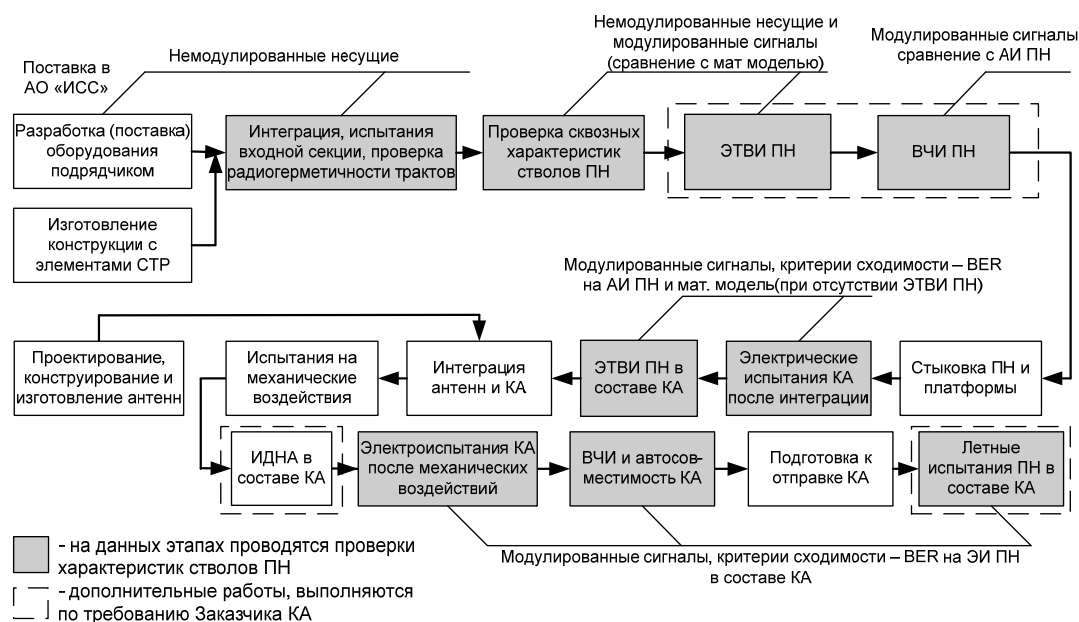


Рис. 2. План НЭО при отсутствии критерия по BER

Применение нового метода дополнительно приведет к росту экономического эффекта в следующих направлениях:

а) унификация состава контрольно-проверочной аппаратуры для проверки стволов с полной регенерацией сигналов, цифровой коммутацией и без обработки;

б) расширение спектра предоставляемых Заказчику услуг:

- формирование рекомендаций по режимам работы отдельных стволов для определенных сигнально-кодовых конструкций;

- имитация нагрузки на сети Заказчика, благодаря использованию в наземных испытаниях модулированных сигналов, а также настройка режимов работы стволов в сжатые сроки;

- оценка помеховой обстановки и моделирование прохождения сигналов (промышленные и «специальные» помехи) за счёт применения имитатора стволов ПН (математической модели);

- сокращение времени, требующегося для исследования функционирования стволов ПН при отказах и сбоях в процессе ввода в эксплуатацию и на этапе штатной работы.

К возможным недостаткам данного метода можно отнести:

- высокую трудоемкость работ по построению детально проработанного имитатора (модели, позволяющей верифицировать характеристики оборудования с учётом влияния температур и давлений, эффекта рассогласования, задержки распространения сигналов в волноводных и коаксиальных трактах, линейризации);

- возможное увеличение времени автономных испытаний ПН (при отсутствии критерия к BER в ТЗ/Контракте);

- повышение стоимости контрольно-проверочной аппаратуры для перспективных диапазонов частот (Q-, V-).

### Библиографические ссылки

1. Полезные нагрузки современных спутников ФСС/РСС и тенденции их развития / Ю. Г. Выгонский, Д. А. Мочалов, А. В. Капелько и др. // Технологии и средства связи. Спец. вып. «Спутниковая связь и вещание – 2015». Ч. 2. 2014. № 6. С. 44–53.

2. Дорит Орен. Будущее спутников с высокой пропускной способностью // Технологии и средства связи. Спец. вып. «Спутниковая связь и вещание – 2016». Ч. 2. 2015. № 6. С. 28–29.

3. Разработка высокочастотной модели связной полезной нагрузки для анализа возможностей ее использования на этапах наземной экспериментальной отработки / Е. Б. Проценко, А. С. Кислица, А. А. Шаров и др. // Метрология в радиоэлектронике : XI Всерос. науч.-технич. конф. 2018.

### References

1. Payload of current satellites BCC/PCC and tendencies of their development / Y. G. Vygodskii, D. A. Mochalov, A. V. Kapelko et al. // Technology and means of communication. Special issue “Satellite communication and broadcasting – 2015”. Part 2. 2014. № 6. P. 44–53.

2. Dorit Oren. The future of high-bandwidth satellites // Technology and communications. Special issue “Satellite communication and broadcasting – 2016”. Part 2. 2015. № 6. P. 28–29.

3. Development of high-frequency coherent model of the payload to analyze the possibilities of its use in the stages of experimental ground tests / E. B. Protsenko, A. S. Kislitsa, A. A. Sharov et al. // XI all-Russian scientific-technical conference “Metrology in radio electronics”, 2018.

© Проценко Е. Б., Гришаева Л. В., Бычкова А. В., 2018

УДК 629.78.086 517.977.5 550.388.2

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИИ ПЕРЕЛЁТА МЕЖОРБИТАЛЬНОГО БУКСИРА НА ГЕОСТАЦИОНАРНУЮ ОРБИТУ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ РАДИАЦИИ

А. Е. Старченко

ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва»  
Российская Федерация, 141070, Московская обл., г. Королёв, ул. Ленина, д. 4а  
E-mail: aleksandr.starchenko@phystech.edu

*За счёт изменения формы траектории перелёта на геостационарную орбиту многократного межорбитального буксира удалось снизить поглощённую бортовыми системами дозу радиации на 25–38 %. При этом время перелёта увеличилось не более, чем на 7 % от минимального времени выведения.*

*Ключевые слова:* многократный межорбитальный буксир, поглощённая доза радиации, орбитальные перелёты, ядерная энергетическая установка, электроракетная двигательная установка, космическая радиация, радиационные пояса Земли.

## TRAJECTORY OPTIMIZATION OF A LOW-THRUST SPACECRAFT GEOSTATIONARY ORBIT INSERTION MANEUVER FOR TOTAL IONIZING DOSE DECREASE

А. Е. Starchenko

S. P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”  
4a, Lenina Str., Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation  
E-mail: aleksandr.starchenko@phystech.edu

*Using trajectory shape variation we managed to decrease total ionizing dose by 25-38 % absorbed by a spacecraft during electric propulsion geostationary orbit insertion. Duration of the maneuver increased only by 7 % of minimal orbit insertion time.*

*Keywords:* spacecraft, total ionizing dose, orbit transfers, geostationary orbit, electric propulsion, space radiation, Van Allen radiation belts.

**Введение.** Рассматривается задача перелёта многократного межорбитального буксира [1] (ММБ) с электроракетной двигательной установкой (ЭРДУ) и ядерной энергетической установкой с круговой орбиты высотой 800 км на геостационарную. Поглощённая бортовыми системами доза радиации от заряженных частиц радиационных поясов Земли (РПЗ) в таком случае оказывается в разы большей, чем аналогичная доза для случая комбинированного выведения с помощью химического разгонного блока и ЭРДУ.

**Методика.** В работе предложен метод снижения дозовой нагрузки на бортовые системы ММБ с помощью изменения формы траектории выведения. Суть метода состоит в численном продолжении решения задачи оптимального быстрогодействия [2] по накопленной на конец перелёта дозе космической радиации. Для этого к уравнениям движения межорбитального буксира добавляется дополнительное уравнение для дозы радиации

$$\frac{dD}{dt} = N_D(r(t), i(t)),$$

и вводится краевое условие на дозу на правом конце

$$D(T) = D_f < D_{\min T},$$

где  $D(t)$  – поглощённая ММБ доза радиации с начала перелёта и до момента времени  $t$ ;  $T$  – время перелёта;  $N_D(r(t), i(t))$  – средняя мощность дозы потоков элек-

тронов и протонов РПЗ на орбите радиусом  $r = r(t)$  и наклоном  $i = i(t)$ ;  $D_f$  – требуемая доза радиации;  $D_{\min T}$  – доза радиации, полученная ММБ на траектории оптимального быстрогодействия. При расчёте дозы использовались модели потоков заряженных частиц радиационных поясов Земли AE8/AP8 MIN, AE8/AP8 MAX [3–5] и AE9/AP9 [6].

**Результаты.** Для решения краевой задачи, получающейся в результате применения принципа максимума Понтрягина к вышеуказанной задаче оптимального управления, применялся метод продолжения по параметру [7]. За счёт изменения формы траектории выведения ММБ удалось снизить дозу радиации на 25–38 % относительно траектории оптимального быстрогодействия. При этом время перелёта увеличилось не более, чем на 7 % от минимального времени выведения на геостационарную орбиту, а затраты характеристической скорости увеличились на 320–560 м/с.

### Библиографические ссылки

1. Легостаев В. П., Лопота В. А., Синявский В. В. Перспективы и эффективность применения космических ядерно-энергетических установок и ядерных электроракетных двигательных установок // Космическая техника и технологии. 2013. № 1. С. 4–15.
2. Петухов, В. Г. Оптимизация многовитковых перелётов между некомпланарными эллиптическими

орбитами // Космические исследования. 2004. Т. 42, № 3. С. 1–20.

3. Sawyer D. M., Vette J. I. AP-8 Trapped Proton Environment for Solar Maximum and Solar Minimum. NASA-TM-X-72605. NSSDC/WDC-A-R&S 76-06. 1976.

4. Vette J. I. Trapped Radiation Environment Model Program (1964–1991). NSSDC/WDC-A-R&S 91-29. November, 1991.

5. Vette J. I. The AE-8 Trapped Electron Model Environment. NSSDC/WDC-A-R&S 91-24, 1991.

6. Ginet G. P., O'Brien T. P., Huston, S.L. et al. AE9, AP9 and SPM: New Models for Specifying the Trapped Energetic Particle and Space Plasma Environment // Space Sci. Rev 2013. Vol. 179. P. 579–615

7. Петухов В. Г. Метод продолжения для оптимизации межпланетных траекторий с малой тягой // Космические исследования. 2012. Т. 50, № 3. С. 258–270.

### References

1. Legostaev V. P., Lopota V. A., Sinyavsky V. V. Prospects for and Efficiency in Application of Space Nuclear Power Plants and Nuclear Electrorocket Propulsion

Systems // Space Engineering and Technology 2013. No. 1. P. 4–15. (In Russ.)

2. Petukhov V. G. Optimization of Multi-Orbit Transfers Between Noncoplanar Elliptic Orbits // Cosmic Research. 2004. Vol. 42, No. 3. P. 250–268.

3. Sawyer D. M., Vette J. I. AP-8 Trapped Proton Environment for Solar Maximum and Solar Minimum. NASA-TM-X-72605. NSSDC/WDC-A-R&S 76-06. 1976.

4. Vette J. I. Trapped Radiation Environment Model Program (1964–1991). NSSDC/WDC-A-R&S 91-29. November, 1991.

5. Vette J. I. The AE-8 Trapped Electron Model Environment. NSSDC/WDC-A-R&S 91-24, 1991.

6. Ginet G. P., O'Brien T. P., Huston, S.L. et al. AE9, AP9 and SPM: New Models for Specifying the Trapped Energetic Particle and Space Plasma Environment. // Space Sci. Rev 2013. Vol. 179. P. 579–615

7. Petukhov V. G. Method of continuation for optimization of interplanetary low-thrust trajectories // Cosmic Research. 2012. Vol. 50, No. 3. P. 249–261.

© Старченко А. Е., 2018

УДК 629.78.051.062.2

## ЛОГИКА РАБОТЫ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «ГЛОНАСС» ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ОСОБЫХ УЧАСТКОВ ТЕНЕВЫХ ОРБИТ

А. В. Фатеев, А. И. Хохлов, Ю. А. Тентилов, А. А. Васильев

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

*Разработана методика управления ориентацией навигационного космического аппарата при прохождении особых участков теневых орбит, реализующая режимы программных симметричных упреждающих разворотов. Разработана методика использования измерений звездного прибора при проведении космическим аппаратом программных симметричных упреждающих разворотов, позволяющая уменьшить погрешность ориентации космического аппарата при прохождении особых участков теневых орбит. Разработана методика учета положения фазового центра антенны навигационного космического аппарата при прохождении особых участков теневых орбиты в алгоритмах решения навигационной задачи потребителя. Разработана методика учета сил солнечного давления, обусловленных изменением ориентации навигационного космического аппарата при прохождении особых участков теневых орбит, в алгоритмах расчета эфемерид.*

*Ключевые слова:* навигационный космический аппарат (КА) системы ГЛОНАСС.

## LOGIC OF WORK OF NAVIGATING SYSTEM "GLONASS" AT PASSAGE OF SPECIAL SITES OF SHADOW ORBITS

A. V. Fateev, A. I. Khokhlov, U. A. Tentilov, A. A. Vasilev

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

*The technique of management is developed by orientation of a navigating space vehicle at passage of special sites of the shadow orbits, realising modes of program symmetric anticipatory turns. The technique of use of measurements of the star device is developed at carrying out by a space vehicle of the program symmetric anticipatory turns, allowing to reduce an error of orientation of a space vehicle at passage of special sites of shadow orbits. The technique of the account of position of the phase centre of the aerial of a navigating space vehicle is developed at passage of special sites shadow orbits in algorithms of the decision of a navigating problem of the consumer. The technique of the account of forces of the solar pressure caused by change of orientation of a navigating space vehicle at passage of special sites of shadow orbits, in algorithms of calculation ephemeris is developed.*

*Keywords:* navigation spacecraft (SC) GLONASS.

Навигационный космический аппарат (КА) системы ГЛОНАСС эксплуатируется на наклонной круговой орбите и ориентируется в солнечно-земной системе координат. При такой ориентации ось минус ОХ КА ориентируется на центр Земли, ось минус ОУ КА направлена в сторону Солнца, панели солнечных батарей ориентируются на Солнце путем совмещения плоскости ХОУ КА с направлением на Солнце и нормаль к панели солнечных батарей разворачиваются в плоскости ХОУ [1].

Теневые орбиты навигационных космических аппаратов системы ГЛОНАСС имеет особые участки, характеризующиеся наличием больших (близких к  $180^\circ$ ) и малых (близких к  $0^\circ$ ) углов Солнце – космический аппарат – Земля, при прохождении которых космический аппарат совершает развороты вокруг оси, ориентируемой на Землю. Необходимость разворота обусловлена тем, что при прохождении особых участков орбиты при переходе к ориентации в орбитальной системе координат поверхности корпуса КА

со стороны оси плюс ОУ и со сторон осей  $\pm OZ$  будут засвечиваться, что приведет к непрогнозируемому движению центра масс КА под действием сил солнечного давления. Это обусловлено тем, что у незащитаемых поверхностей оптические коэффициенты отличаются от соответствующих коэффициентов поверхностей, засвечиваемых при ориентации в солнечно-земной системе координат. Это является неприемлемым для навигационных космических аппаратов [2].

Разработана методика управления ориентацией навигационного КА при прохождении особых участков теневых орбит, реализующая режимы программных симметричных упреждающих разворотов, позволяющая минимизировать погрешности навигационных определений [3; 4].

Разработана методика использования измерений звездного прибора при проведении КА программных симметричных упреждающих разворотов, позволяющая уменьшить погрешность системы ориентации

при прохождении особых участков теневых орбит и, как следствие, минимизировать погрешности навигационных определений.

Так как движение космического аппарата при упреждающем развороте происходит относительно центра масс, то при несовпадении фазового центра антенны с центром масс космического аппарата, происходит изменение координат фазового центра антенны в солнечно-земной системе координат.

Потребитель проводит измерения положения фазового центра антенны, не учитывая положение антенны относительно центра масс космического аппарата. В связи с этим при прохождении особых точек орбиты в аппаратуре потребителя необходимо вычислять поправки на положение фазового центра антенны относительно центра масс.

Разработана методика учета положения фазового центра антенны навигационного КА при прохождении особых участков теневых орбиты в алгоритмах решения навигационной задачи потребителя, позволяющая минимизировать погрешность определения координат потребителя

Разработана методика учета сил солнечного давления, обусловленных изменением ориентации навигационного КА при прохождении особых участков теневых орбит, в алгоритмах расчета эфемерид, позволяющая минимизировать погрешности навигационных определений путем уменьшения погрешности знания сил от солнечного давления. Суть данной методики заключается в моделировании симметричного упреждающего разворота в баллистическом центре. Модель данного разворота соответствует эталонной модели движения КА, заложенной на борту КА. Для работы эталонной модели разработан алгоритм вычисления в баллистическом центре данных, необходимых для моделирования упреждающего разворота. Таким образом, моделирование движение КА относительно центра масс позволяет при прохождении особых участков теневых орбит прогнозировать силы от солнечного давления, действующие на КА, что в свою очередь позволяет уменьшить погрешность навигационных определений.

Внедрение разработанных алгоритмов на борт КА, в аппаратуру потребителя и в баллистическом центре позволит уменьшить погрешность навигационных определений.

Методика управления ориентацией навигационного КА при прохождении особых участков теневых орбит, реализующая режимы программных симмет-

ричных упреждающих разворотов проходит летные испытания на космических аппаратах «ГЛОНАСС-М» и защищен патентом № 2569999 от 05.11.2015 г. Также разработанные методики внедрены на КА «ГЛОНАСС-К» и «ГЛОНАСС-К2».

#### Библиографические ссылки

1. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения. Красноярск, 2011. С. 119–147.
2. Дилснер Ф. Спутник Глонасс-М, модель ориентации по рысканию. *Advances in Space Research*. Available at: <http://www.sciencedirect.com> 2010.
3. Фатеев А. В., Емельянов Д. В., Тентилов Ю. А. Алгоритмы определения курсового угла для вычисления фазового центра антенны космического аппарата «ГЛОНАСС» на участках упреждающего разворота // *Вестник СибГАУ*. 2013. № 4 (50). С. 198–202.
4. Фатеев А. В., Емельянов Д. В., Тентилов Ю. А. Прохождение особых участков орбиты навигационным космическим аппаратом системы ГЛОНАСС // *Вестник СибГАУ*. 2014. № 4 (56). С. 126–131.
5. Патент РФ № 2569999. Способ ориентации навигационного спутника / Тентилов Ю. А., Фатеев А. В., Емельянов Д. В. 2015.

#### References

1. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Bases of designing of space vehicles of a supply with information*. Krasnoyarsk, 2011. P. 119–147.
2. Dilsner F. *Satellite Glonass-M, Orientation model on yaw*. *Advances in Space Research*. Available at: <http://www.sciencedirect.com> 2010.
3. Fateev A. V., Emelianov D. V., Tentilov U. A. *Algorithms of definition of a course angle for calculation of the phase centre of the aerial of a space vehicle "GLONASS" on sites of an anticipatory turn*. *Vestnik SibSAU*, 2013. № 4 (50). P. 198–202.
4. Fateev A.V., Emelianov D.V., Tentilov U.A. *Passage of special sites of an orbit by a navigating space vehicle of system GLONASS*. *Vestnik SibSAU*. 2014. № 4 (56). P. 126–131.
5. Tentilov U. A., Fateev A. V., Emelianov D. V. *Orientation method of the navigating satellite*. The patent RU № 2569999, 2015.

© Фатеев А. В., Хохлов А. И.,  
Тентилов Ю. А., Васильев А. А., 2018

УДК 621.311.69

## ВЫБОР ДАТЧИКОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В УСТРОЙСТВАХ ЗАЩИТНОЙ АВТОМАТИКИ

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 сформулированы требования к датчикам малых постоянных токов, применяемых в устройствах защитной автоматики при испытаниях системы электропитания космического аппарата, проведен анализ серийно выпускаемых датчиков, предложена схема датчика тока, удовлетворяющая требованиям.*

*Ключевые слова: защитная автоматика, ток утечки, сопротивление изоляции, датчик тока, система электропитания, разностный ток, феррозонд.*

## SELECTION OF DIRECT CURRENT SENSORS FOR AUTOMATIC PROTECTION DEVICES

N. V. Shtabel, L. A. Samotik, E. A. Mizrakh

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

*Authors proposed requirements for small direct current sensors used in automatic protection devices during spacecraft power system test, provide analysis of commercially available sensors, proposed schematics of current sensor which satisfies the requirements.*

*Keywords: protection devices, leakage current, insulation resistance, current sensor, power system, differential current, fluxgate.*

В настоящее время одной из важнейших задач в отрасли является повышение срока активного существования космического аппарата (КА) на орбите. Это достигается сразу несколькими методами, включая резервирование подсистем, повышение коэффициентов запаса при расчетах оборудования, повышением качества наземного тестирования подсистем КА.

Для улучшения массогабаритных характеристик КА за счет снижения массы проводников в системе электропитания (СЭП) предусматривается переход на шину питания 100 В с постепенным отказом от применявшейся ранее шины 27 В. Среди недостатков можно отметить повышенные требования к качеству изоляции токоведущих шин и необходимость контроля сопротивления изоляции на всех этапах испытаний СЭП КА.

Требования к изоляции шин обусловлены применением в платформе КА связи одной из шин питания (обычно минусовой) с корпусом, что сделано в целях исключения пробоя токоведущих шин на корпус при накоплении им потенциала. Однако, это приводит к возможности возникновения нежелательных токов утечки или короткого замыкания при контакте плюсовых шин с корпусом, что может легко произойти в случае повреждения сопротивления изоляции.

С целью контроля сопротивления изоляции авторами было разработано и испытано устройство контроля сопротивления изоляции (УКИЗ) [1], применяемое в стенде для испытаний СЭП КА.

Методика измерения сопротивления изоляции, применяемая в устройстве, основана на измерении разностных токов в каждой из токоведущих шин. При появлении любой утечки на корпус разность токов в плюсовой и минусовой шинах будет отлична от нуля, что позволяет оценить сопротивление изоляции шины и предотвратить аварийную ситуацию.

В УКИЗ в качестве датчиков дифференциального тока используются бесконтактные датчики с кольцевым магнитопроводом [2]. Это позволяет измерять разность токов в двух шинах с высокой точностью, которая достигает десятков микроампер, при этом величина токов, протекающих через шину, практически не имеет значения.

Разработанное устройство на текущий момент обеспечивает только функцию контроля, и предупреждает оператора испытаний об аномальном снижении сопротивления изоляции. Дальнейшим развитием устройства является защитное отключение линии при обнаружении тока утечки или снижения сопротивления изоляции.

Реализация функции защитного отключения требует повышенных требований к датчикам тока утечки, в частности низкого времени переходного процесса. Это связано с требованиями к временной задержке на отключение линии в случае аварии, которая может составлять десятки микросекунд для защиты оборудования от повреждения и десятки миллисекунд [3] для защиты человека при контакте с токоведущими шинами.



## Характеристики датчиков тока

Показатели	SLD1-100 mA	LEM CTSR-0.3P	LEM CT 0.1-P	CT 100 mA
Диапазон измеряемых токов I <sub>ном</sub> , mA	±100	±300	±100	±100
Минимальный измеряемый ток, мкА	10	500	100	100
Диаметр отверстия, мм	20	20	20	25
Приведенная погрешность отн. I <sub>ном</sub>	0,1 %	1,9 %	1,5 %	3 %
Время реакции, мс	500	0,05	60	400
Полоса пропускания, Гц	3	3 500	7 000	20

Авторами был проведен анализ серийно выпускаемых датчиков малых постоянных токов, датчики выбирались исходя из следующих критериев: диапазон измеряемых токов: 0...100 mA; минимальный измеряемый ток: 0...100 мкА; кольцевой магнитопровод диаметром не менее 20 мм; приведенная погрешность не более 5 %.

Для сравнения были выбраны 4 датчика: SLD1-100 mA [2], LEM CTSR-0.3P [4], LEM CT 0.1-P [5], CT 100 mA [6], характеристики датчиков приведены в таблице.

Основным требованием к датчикам является диапазон измеряемых токов, который для измерения сопротивления изоляции величиной 1...1000 кОм при напряжении линии 100В составляет 0,1...100 mA, а также время реакции, которое должно быть не более 30 мс для защиты человека.

Из данных таблицы видно, что датчики SLD1-100 mA, LEM CT 0.1-P, CT 100 mA обеспечивают достаточный диапазон измерения токов, однако их время реакции больше, чем требуется. В то же время быстродействующий датчик LEM CTSR-0.3P обеспечивает низкое время срабатывания, однако его рабочий диапазон начинается с 0,5 mA, что ограничивает верхний предел измерения сопротивления изоляции. Для более низких напряжений линии (например, для солнечной или аккумуляторной батареи) нижний рабочий диапазон по токам может быть ещё меньше.

Авторами было принято решение разработать собственный датчик тока, который будет удовлетворять всем требованиям, приведенным выше. После исследования применяемых схем датчиков тока, была выбрана схема на основе магнитной модуляции. К достоинствам схемы можно отнести большую чувствительность по сравнению с датчиками на основе элементов Холла, очень малое смещение нуля, относительную простоту реализации. В разрабатываемом датчике применяется цифровая обработка сигнала для повышения быстродействия. В настоящий момент авторами изготовлен макетный образец датчика, погрешность измерения токов составляет ±50 мкА, время реакции 15 мс, полоса пропускания 100 Гц.

## Библиографические ссылки

1. Киселев П. В., Штабель Н. В. Устройство для непрерывного контроля сопротивления изоляции в процессе испытаний системы электропитания космического аппарата // Тез. докл. XXI Науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов РКК «Энергия» имени С. П. Королёва [Электронный ресурс].

URL: <https://conf.energia.ru/images/tezis-2.pdf> (дата обращения: 01.09.2018).

2. Датчик SLD1 [Электронный ресурс]. URL: <http://ldtn.ru/system/product/168/SLD1.pdf> (дата обращения: 01.09.2018).

3. ГОСТ Р МЭК 61557-2-2005. Сети электрические распределительные низковольтные напряжением до 1000 В переменного тока и 1500 В постоянного тока. Электробезопасность. Аппаратура для испытания, измерения или контроля средств защиты. Ч. 2. Сопротивление изоляции. М.: Стандартинформ, 2006. 4 с.

4. Датчик LEM CTSR-0.3P [Электронный ресурс]. URL: <http://www.maglem.ru/pdf/CTSR%200.3-P-SP1%20Dev.pdf> (дата обращения: 01.09.2018).

5. Датчик LEM CT-0.1P [Электронный ресурс]. URL: <http://www.europowercomponents.com/media/uploads/CT0.4-P.pdf> (дата обращения: 01.09.2018).

6. Датчик CT 100 mA [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cy-sensors.com/CY-LeakageCurrent.htm> (дата обращения: 01.09.2018).

## References

1. Kiselev P. V., Shtabel' N. V. Ustrojstvo dlya nepreryvnogo kontrolya soprotivleniya izolyatsii v protsesse ispytaniy sistemy ehlektropitaniya kosmicheskogo apparata [Spacecraft power supply system continuous insulation resistance measurement system]. Tezisy dokladov XXI Nauchno-tehnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov RKK "Energiya" imeni S. P. Korolyova. Available at: <https://conf.energia.ru/images/tezis-2.pdf> (accessed: 01.09.2018).

2. SLD1 sensor. Available at: <http://ldtn.ru/system/product/168/SLD1.pdf> (accessed: 01.09.2018).

3. GOST R MEK 61557-2-2005. Seti elektricheskie raspredelitel'nye nizkovol'tnye napryazheniem do 1000 V peremennogo toka i 1500 V postoyannogo toka. Elektrobezopasnost'. Apparatura dlya ispytaniya, izmereniya ili kontrolya sredstv zashchity [Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1000 V a.c. and 1500 V d.c. Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures]. М., Standartinform Publ., 2015. 34 p.

4. LEM CTSR-0.3P sensor. Available at: <http://www.maglem.ru/pdf/CTSR%200.3-P-SP1%20Dev.pdf> (accessed: 01.09.2018).

5. LEM CT-0.1P sensor. Available at: <http://www.europowercomponents.com/media/uploads/CT0.4-P.pdf> (accessed: 01.09.2018).

6. CT 100 mA sensor. Available at: <http://www.cy-sensors.com/CY-LeakageCurrent.htm> (accessed: 01.09.2018).

© Штабель Н. В., Самотик Л. А., Мизрах Е. А., 2018

УДК 621.3

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОДДЕРЖАНИЯ ЗАДАННОГО ДАВЛЕНИЯ ЦИКЛОПЕНТАНА В ПОДАЮЩЕМ ТРУБОПРОВОДЕ

Д. А. Шуринова

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)

*При подаче циклопентана в смеситель для смешивания с полиолом давление на входе в смеситель не должно падать ниже допустимого даже при резком изменении потока жидкости. Описывается метод контроля давления в трубопроводе системы и коррекции его значения при отклонении от нормы.*

*Ключевые слова: циклопентан, трубопровод, система управления, стабилизация давления.*

## CONTROL SYSTEM OF SUPPORTED PRESSURE OF CYCLOPENTAN IN PILOT PIPELINE

D. A. Shurinova

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)

*When cyclopentane is fed to a mixer for combining with polyol, the pressure at the inlet to the mixer must not fall below the allowable value even with a sudden change in the flow of the liquid. This article describes the method of monitoring the pressure and correcting its value in the pipeline of the system in the event of a deviation from the norm.*

*Keywords: cyclopentane, pipeline, control system, pressure stabilization.*

Цель работы: обеспечить заданное значение давления в подающем трубопроводе при передаче по нему циклопентана. Данная жидкость характеризуется опасными свойствами (очень горюч, образует взрывоопасные смеси с воздухом), относится к ЛВЖ (легковоспламеняющиеся жидкости) [1–2]. Всё это делает увеличение допустимого давления в системе небезопасным. Выбран дозирующий насос во взрыво-

защищённом исполнении по причине возможности ведения контроля целостности трубопровода. Необходимость наличия системы контроля давления существует в производственной, промышленной, ракетно-космической сферах, а также в автомобилестроении.

Для визуального контроля за работой системы на выходе насоса устанавливаем манометр (рис. 1).

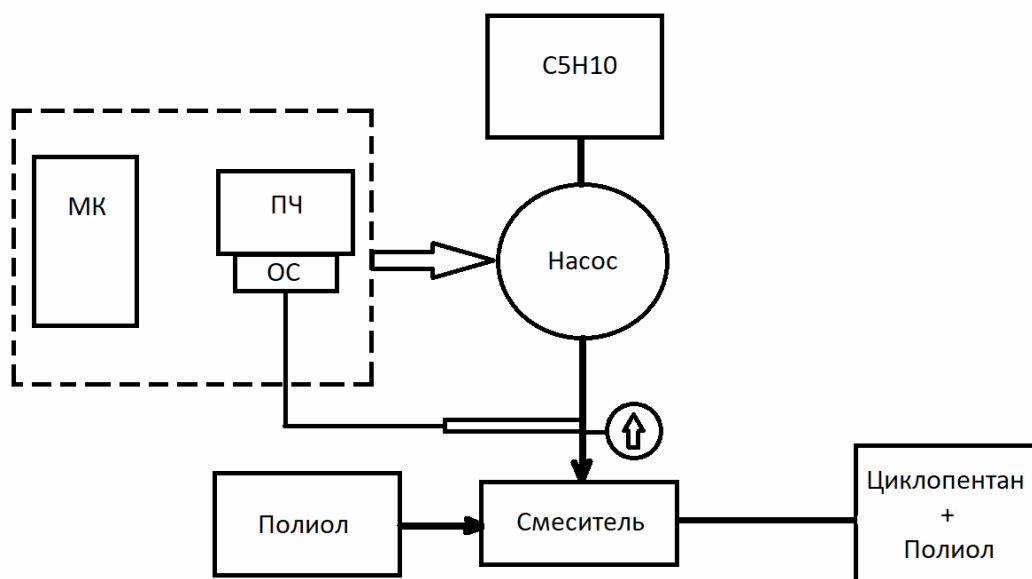


Рис. 1. Система поддержания заданного давления в трубопроводе

Нам необходимо, чтобы значения давления на выходе системы не выходили за допустимые рамки: от 2 до 3 кг/см<sup>2</sup> при шестикратном увеличении потока жидкости через насос. Поставленная задача заключалась в том, чтобы предотвратить провал давления менее чем на 1,8 кг/см<sup>2</sup> при максимально возможном изменении потока.



Рис. 2. Преобразователь частоты со встроенным микроконтроллером

ПЧ (серия VFD-E) оснащён датчиком обратной связи [3–4]. В основе ОС применяется датчик давления с токовым выходом (4–20 мА). В ПЧ так же можно вводить значения устанавливаемого давления и задавать закон регулирования его стабилизации. С помощью выбранного нами ПЧ можно устанавливать коэффициенты встроенного в него ПИД-регулятора, управляющего характеристикой изменения параметра. В нашем случае данный вариант не является приемлемым из-за невозможности быстро исключить внезапный провал в давлении при мгновенном повышении расхода до максимального значения, что в свою очередь может привести к некорректной работе смесителя.

Для улучшения характеристик переходного процесса был использован встроенный в ПЧ микроконтроллер. Для него разработана специальная программа [5].

Данный метод преобладает гораздо большим быстродействием, так как позволяет при поступлении сигнала о резком падении давления увеличить частоту

оборотов двигателя в насосе до максимально допустимой (задаётся отдельно через в параметрах ПЧ), что обеспечивает необходимое быстродействие работы системы.

### Библиографические ссылки

1. Циклопентан [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Циклопентан> (дата обращения: 16.07.2018).
2. Циклопентан [Электронный ресурс]. URL: [http://www.foamunion.ru/formula\\_i\\_harakteristiki\\_tciclopentana.html](http://www.foamunion.ru/formula_i_harakteristiki_tciclopentana.html) (дата обращения: 17.07.2018).
3. Преобразователь частоты Deltronics [Электронный ресурс]. URL: [http://www.deltronics.ru/product/converter/series\\_8.html](http://www.deltronics.ru/product/converter/series_8.html) (дата обращения: 16.07.2018).
4. Датчик давления с токовым выходом, [Электронный ресурс]. URL: <http://termokip.com.ua/datchiki-davleniya-s-tokovym-vykhodom/> (дата обращения: 17.07.2018).
5. Программируемые логические контроллеры DVP. Руководство по программированию. Стоик, 2013. 616 с.

### References

1. Cyclopentan. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Циклопентан> (accessed: 16.07.2018).
2. Cyclopentan. Available at: [http://www.foamunion.ru/formula\\_i\\_harakteristiki\\_tciclopentana.html](http://www.foamunion.ru/formula_i_harakteristiki_tciclopentana.html) (accessed: 17.07.2018).
3. Preobrazovatel chastoty Deltronics. [Frequency converter Deltronics]. Available at: [http://www.deltronics.ru/product/converter/series\\_8.html](http://www.deltronics.ru/product/converter/series_8.html) (accessed: 16.07.2018).
4. Datchik davlenya s tokovym vihomom. [Pressure transmitter with current output]. Available at: <http://termokip.com.ua/datchiki-davleniya-s-tokovym-vykhodom/> (accessed: 17.07.2018).
5. Programmiryemye logicheskyye kontrollery DVP. Rykovodstvo po programmirovaniy. [Programmable Logic Controllers DVP. Programming Guide.] Stoik, 2013. 616 с.



**Секция**

**«КОСМИЧЕСКОЕ И СПЕЦИАЛЬНОЕ  
ЭЛЕКТРОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ»**

## ТРЕХФАЗНЫЕ ДАТЧИКИ ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА

Д. С. Виноградов, А. Н. Бобриков

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

*Рассмотрены возможные конструкции трехфазных датчиков положения ротора вентильных двигателей систем ориентации космических аппаратов, а также результаты испытаний макетов данных датчиков.*

*Ключевые слова: трехфазный, датчик положения ротора, синусоидальный сигнал.*

## THREE-PHASE ROTOR POSITION DETECTOR

D. S. Vinogradov, A. N. Bobrikov

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

*The paper presents possible construction of three-phase rotor position detector of spacecrafts orientation system brushless dc motor, and also release results of three-phase rotor position detectors tests.*

*Keywords: three-phase, rotor position detector, sinusoidal signal.*

**Введение.** Для управления трехфазными вентильными двигателями требуются трехфазные датчики положения ротора, при этом для минимизации пульсаций электромагнитного момента двигателя они должны формировать синусоидальные выходные сигналы со сдвигом 120 эл. град. С целью изучения характеристик трехфазных датчиков разработаны два макетных образца на основе двухфазных аналогов, широко применяемых в вентильных двигателях: датчик положения ротора с внутренним каскадом и датчик на основе вращающегося трансформатора.

Датчик с внутренним каскадом выполнен по типу индукционной машины, имеющей обмотку возбуждения и трехфазную выходную обмотку на статоре. Обмотка ротора имеет две фазы разной полярности, которые соединяются между собой электрически, образуя внутренний каскад [1].

Датчик на основе вращающегося трансформатора имеет обмотку возбуждения на роторе и трехфазные выходные обмотки на статоре [2]. Напряжение на обмотку возбуждения подается бесконтактным способом с помощью кольцевого трансформатора [3–5], который состоит из вращающейся и неподвижной обмоток, расположенных в сердечниках с радиальным воздушным зазором.

Выходным параметром датчиков является трехфазный модулированный сигнал синусоидальной формы, изменяющийся в зависимости от взаимного углового расположения статора и ротора.

В конструкции обоих датчиков применены синусные концентрические обмотки без пропуска шага, а пакеты статора и ротора собраны из листов сплава 79НМ толщиной 0,2 мм. Для обеспечения жесткости пакетов введены крайние листы сплава 79НМ толщиной 0,5 мм.

В ходе испытаний макетных образцов датчиков проверены схемы трехфазных обмоток и измерены основные параметры при питании напряжением синусоидальной формы амплитудой 6 В, частотой 20 и 30 кГц.

Результаты измерения характеристик датчиков следующие. Амплитудная модуляция выходного сигнала датчика с внутренним каскадом находится в пределах 3,5 % при частоте 20 кГц и 5,4 % при 30 кГц. Среднее действующее значение выходного сигнала составило 1,4 В, ток потребления равен 3 мА при частоте 20 кГц и 0,3 мА при 30 кГц. Амплитудная модуляция выходного сигнала датчика на основе вращающегося трансформатора находится в пределах 0,57 % при частоте 20 кГц и 0,61 % при 30 кГц. Среднее действующее значение выходного сигнала составило 4,3 В, ток потребления равен 3 мА при частоте 20 кГц и 0,1 мА при 30 кГц.

**Заключение.** Таким образом, экспериментально проверенные характеристики макетных образцов трехфазных датчиков соответствуют основным требованиям, предъявляемым к штатным образцам. Для питания обмоток возбуждения рекомендуется использовать напряжение синусоидальной формы амплитудой 6 В, частотой 20 кГц. В этом случае амплитудная модуляция выходных сигналов несколько ниже, чем при частоте 30 кГц. Также можно использовать напряжение питания прямоугольной формы.

Датчик на основе вращающегося трансформатора обладает меньшей амплитудной модуляцией выходных сигналов, но требует наличия кольцевого трансформатора, что увеличивает его массогабаритные характеристики по сравнению с датчиком с внутренним каскадом на 40–60 % (в зависимости от компоновки в составе двигателя-маховика).

Датчик с внутренним каскадом более надежен ввиду отсутствия кольцевого трансформатора и меньшего количества электрических соединений с монтажными проводниками, но обладает меньшей точностью из-за особенностей работы внутреннего каскада.

#### Библиографические ссылки

1. Проектирование и экспериментальное исследование опытных моделей датчиков положения ротора различной полноты: отчет о НИР / Чувашский гос. ун-т им. И. Н. Ульянова ; рук. Б. П. Шорохов. № ГР 76083573 ; Инв. № Б538116. Чебоксары, 1976.

2. Разработка и исследование датчиков углового положения ротора и контроля частоты вращения вентиляльных двигателей : отчет о НИР / Чувашский гос. ун-т им. И. Н. Ульянова ; рук. Н. К. Алексеев. № ГР 80017469 ; Инв. № 02822010075. Чебоксары, 1981.

3. Бесконтактный токопровод / Ю. И. Пережиров [и др.] // Актуальные проблемы российской космонавтики : материалы XXXVII академических чтений по космонавтике. М. : Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, 2013.

4. Бальян Р. Х., Обрусник В. П. Оптимальное проектирование высокочастотных ферромагнитных устройств. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1987.

5. Гусев В. Г., Андрианова Л. П. Индуктивные и магнитомодуляционные преобразователи для передачи информации с вращающихся объектов. М. : Энергия, 1979.

#### References

1. Proektirovanie i eksperimentalnoye isledovanie opytnykh modeley datchikov polojenia rotora razlichnoy polucnosti. Otchet o NIR / Chuvashskiy gosudarstvenniy universitet im. I. N. Ulyanova ; Ruk. B. P. Shorokhov. No. GR 76083573; Inv. No. B538116. Cheboksary, 1976.

2. Razrabotka i isledovaniya datchikov uglovogo polojenia rotora i kontrolya chastoti vraschenia ventilnyh dvigateley. Otchet o NIR / Chuvashskiy gosudarstvenniy universitet im. I. N. Ulyanova ; Ruk. N. K. Alekseev. No. GR 80017469; Inv. No. 02822010075. Cheboksary, 1981.

3. Beskontaktniy tokoprovod / Y. I. Perezhirov, [et al.] // sb. Akutalnyi problemi Ruskoy kosmonavtiki. Moscva. Commissia RAN 2013.

4. Balyan R. H., Obrusnik V. P. Optimalnoye proektirovanie silovih visokochastotnih feromagnitnih ostroystv. Tomsk : Izdatelstvo Tomskogo Universiteta, 1987.

5. Gusev V. G., Andrianova L. P. Induktivnye i magnitnyj modulatsionnye preobrazovateli dlya peredachi informacii s vrashayushihsvya objektov. Moscva, Energiya, 1979.

© Виноградов Д. С., Бобриков А. Н., 2018

УДК 629.78.001.5

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ В ИСТОЧНИКЕ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ ДЛЯ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ЛУННОЙ СТАНЦИИ

К. Н. Виноградов<sup>1</sup>, С. Е. Кухтар<sup>1</sup>, И. Я. Шестаков<sup>2</sup>, А. А. Фадеев<sup>2</sup>, Ц. Г. Надараиа<sup>3</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>ООО «Конструирование, внедрение образцов новой техники»  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 75  
E-mail: V1nogradov-KN@yandex.ru

*Рассматривается вариант отведения тепла от активной части источника электроэнергии для лунных станций с помощью тепловых труб.*

*Ключевые слова: накопитель энергии, система электропитания, тепловая труба.*

## APPLICATION OF THERMAL PIPES IN THE SOURCE OF UNINTERRUPTED POWER SUPPLY FOR THE ENERGY SUPPLY OF THE LUNAR STATION

K. N. Vinogradov<sup>1</sup>, S. E. Kuhtar<sup>1</sup>, I. Ja. Shestakov<sup>2</sup>, A. A. Fadeev<sup>2</sup>, C. G. Nadaraia<sup>3</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>LLC "Design, implementation of new equipment"  
75, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
E-mail: V1nogradov-KN@yandex.ru

*The authors consider a variant of heat removal from the active part of the electric power source for lunar stations using heat pipes.*

*Keywords: energy storage device, the power supply system, heat pipe.*

На существующем этапе развития космонавтики планируется в дополнение к научным задачам промышленное освоение Луны, которое подразумевает организацию транспортных потоков «Земля–Луна–Земля», а также перемещение по поверхности Луны и вблизи ее поверхности мобильных транспортных средств.

Решение вышеперечисленных задач потребует создания на постоянной основе информационной окололунной спутниковой системы длительного функционирования, состоящей из отдельных станций, для обеспечения связью и навигацией мобильных транспортных средств на поверхности Луны и вблизи ее [1].

Основной источник (комплект солнечных и аккумуляторных батарей) обеспечивает электропитание при средней мощности, а вспомогательный (гибридный накопитель с АБ, представленный в работе [2]) – при пиковых нагрузках во время нерасчетных режимов работы станции для поддержания ее «живучести», снятия телеметрии и выдачи команд радиоуправления в случаях возможных аварийных ситуаций генератора электроэнергии.

Режимы работы источников согласуются для нормального функционирования всей энергетической установки.

При вращении маховика гибридного накопителя происходит выделение тепла в активных частях двигателя и генератора, поэтому при конструировании установки необходимо организовать принудительное охлаждение. Передача тепла из зоны вращения маховика на панель-радиатор для охлаждения установки является важным моментом. Данная задача решается с помощью тепловых труб (ТТ) [3].

На рис. 1 представлена трубчатая тепловая труба. Данный тип ТТ представляет собой герметичную закрытую полость цилиндрической формы, один конец которой герметизирован заглушкой, а другой конец снабжен заправочным штуцером. Внутренняя поверхность тепловой трубы выложена капиллярно-пористым фитилем. В качестве фитиля используется проволочная сетка материалы их спечённого металлического порошка или узкие продольные канавки в корпусе тепловой трубы. Фитиль насыщен жидкой фазой теплоносителя, а оставшийся центральный объём трубы заполнен его паровой фазой.

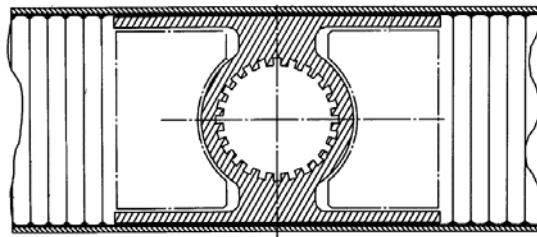


Рис. 1. Трубчатая тепловая труба

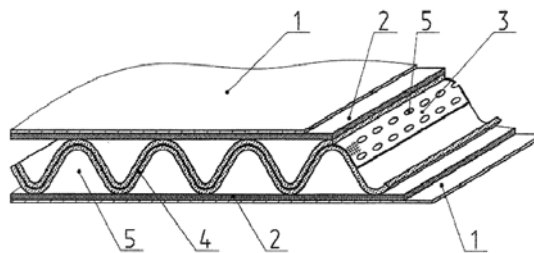


Рис. 2. Тепловая труба плоского типа



Рис. 3. Контурная тепловая труба

Тепло от внешнего источника вызывает испарение теплоносителя в зоне нагрева тепловой трубы, пар за счёт возникающей разницы давлений уходит в зону конденсации, отдавая скрытую теплоту парообразования. Восполнение теплоносителя в зоне испарения осуществляется за счёт капиллярного давления [4].

Тепловые трубы плоского типа, представленные на рис. 2, содержат множество микро-ТТ трубчатого типа, объединённых в одну общую панель. Конструктивно плоские ТТ – тонкая пластина, содержащая пористую структуру (фитиль), заполненную жидким теплоносителем в двухфазном состоянии: газообразном (пар) и жидком. Фитиль обеспечивает распределение теплоносителя по всей поверхности гипертеплопроводящей пластины и создает изотермическую поверхность (панель) с малым перепадом температур по толщине. В этом случае тепло может передаваться как вдоль одного из направлений в плоскости панели, так и поперек [5].

Контурные тепловые трубы (КТТ) (рис. 3) состоят из испарителя и конденсатора, соединённых отдельными гидравлическими трактами для транспортиро-

вания жидкого и парообразного теплоносителя от зоны испарения к зоне конденсации, что позволяет увеличить длину гидротракта [3; 6].

Тепло от прибора подводится к испарителю, который одновременно является и капиллярным насосом. Внутри испарителя имеется капиллярная структура, гидравлически связанная с гидроаккумулятором. Внутри гидроаккумулятора всегда имеется теплоноситель в жидкой фазе, поэтому капиллярная структура испарителя заполнена жидкостью. При испарении в капиллярном насосе теплоноситель в виде пара вытесняется в ведущий к конденсатору паропровод за счёт капиллярных сил. После конденсации теплоноситель возвращается в гидроаккумулятор, внутри которого теплоноситель находится как в жидкой, так и в газообразной фазе.

Использование КТТ имеет ряд плюсов:

- обладают низким термическим сопротивлением;
- сохраняют высокую теплопередающую способность при любых положениях в пространстве;
- способны работать в широком диапазоне температур;



– легко конфигурируются и допускают разнообразные конструктивные воплощения;

– хорошо адаптируются к различным стокам тепла.

КТТ могут успешно использоваться в системах терморегулирования космических аппаратов, для охлаждения теплонапряженных компонентов и РЭА.

**Заключение.** В статье рассмотрен один из вариантов отведения тепла от активной части источника электроэнергии для лунных станций. Предполагается использование контурных тепловых труб в связи с их вариативностью геометрии и способностью работать в широком диапазоне температур.

Рациональный выбор основных элементов системы электропитания для решения конкретных задач позволяет оптимизировать технические, массогабаритные и стоимостные характеристики лунной станции в целом.

### Библиографические ссылки

1. Концепция построения триангуляционной селенодезической сети / В. Е. Чеботарев, В. Д. Звонарь, О. Б. Грицан, А. А. Внуков // Исследования Наукограда. 2014. № 2 (8). С. 4–9.
2. Повышение энергетической эффективности системы электропитания перспективных космических аппаратов / Ц. Г. Надараиа [и др.] // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 4. С. 983–988.
3. Система терморегулирования для твердотельных лазеров на основе контурной тепловой трубы / Ю. Ф. Майданик [и др.] // Тепловые процессы в технике. 2013. Т. 5, № 2. С. 85–92.
4. Плоские тепловые трубы для отвода тепла от электронной аппаратуры в космическом аппарате / В. А. Деревянко [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. № 6 (52). С. 111–116.
5. Герасимов Ю. Ф., Долгирев Ю. Г., Гадельшин М. Ш. Крупногабаритные плоские тепловые трубы // II Минский международный форум «Тепломассообмен ММФ-1992». Минск : Академия наук Беларуси «АНК Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова», 1992. Т. VII Тепломассообмен в капиллярно-пористых средах. С. 108–114.
6. Ферштатер Ю. Г. Аналитическое исследование и основы инженерного расчета КТТ // Тепловые трубы: теория и практика / Материалы международной школы-семинара. Минск, 1990. Ч. 1. С. 87–94.

### References

1. Kontseptsiya postroeniya triangulyatsionnoy selenodezicheskoy seti [The concept of constructing a triangular selenide network] / V. E. Chebotarev, V. D. Zvonar', O. B. Gritsan, A. A. Vnuikov // Issledovaniya Naukograda, 2014. № 2 (8). P. 4–9.
2. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti sistemy elektropitaniya perspektivnykh kosmicheskikh apparatov [Increasing the energy efficiency of the power supply system of advanced space vehicles] / Ts. G. Nadaraia [et al.] // Vestnik SibSAU. 2016. T. 17, № 4. P. 983–988.
3. Sistema termoregulirovaniya dlya tverdotel'nykh lazerov na osnove konturnoy teplovoy truby [Thermal control system for solid-state lasers based on a contour heat pipe] / Yu. F. Maydanik [et al.] // Teplovye protsessy v tekhnike. 2013. T. 5, № 2. P. 85–92.
4. Ploskie teplovye truby dlya otvoda tepla ot elektronnoy apparatury v kosmicheskom apparate [Flat heat pipes for removing heat from electronic equipment in the spacecraft] / V. A. Derevyanko [et al.] // Vestnik SibSAU. 2013. № 6 (52). P. 111–116.
5. Gerasimov, Yu. F., Dolgirev Yu. G., Gadel'shin M. Sh. Krupnogabaritnye ploskie teplovye truby [Large-sized flat heat pipes] // II Minskiy mezhdunarodnyy forum "Tepломассообмен ММФ-1992". Minsk: Akademiya nauk Belarusi "ANK Institut teplo- i massоobmena im. A. V. Lykova", 1992. T. VII Tepломассообмен v kapillyarno-poristykh sredakh. P. 108–114.
6. Fershtater Yu. G. Analiticheskoe issledovanie i osnovy inzhenernogo rascheta KTT [Analytical study and basis of engineering calculation of contour heat pipe] // Teplovye truby: teoriya i praktika / Materialy mezhdunarodnoy shkoly-seminara, Minsk, 1990. Ch. 1. P. 87–94.

© Виноградов К. Н., Кухтарь С. Е., Шестаков И. Я.,  
Фадеев А. А., Надараиа Ц. Г., 2018

УДК 662.629.05

## ТЕСТИРОВАНИЕ РЕКОНФИГУРИРУЕМОГО БОРТОВОГО КОМПЬЮТЕРА С СЕТЬЮ SPACEWIRE

Е. Н. Голубев, К. Е. Зырянова

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

*Рассматриваются вопросы тестирования реконфигурируемого бортового компьютера с сетью Space Wire на примере вычислительного комплекса, планируемого к применению в системах управления перспективных КА разработки АО «ИСС».*

*Ключевые слова: бортовая цифровая вычислительная машина, система управления, верификация алгоритмов управления, отработка систем управления, методики испытаний.*

## TESTING OF ON-BOARD RECONFIGURABLE CONTROL COMPUTER (OCC) WITH SPACEWIRE NETWORK

E. N. Golubev, K. E. Zyryanova

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: gen@iss-reshetnev.ru

*This paper gives attention to the matter of testing On-Board Computer with reconfiguration property and built-in SpaceWire network is discussed, it is based on computer hardware that will be used in On-Board Control Systems of next generation satellites being manufactured in JSC "ISS".*

*Keywords: index terms: On-Board Computer, control system, verification of control algorithms, tests of control systems, test methods.*

Перспективным направлением развития систем управления, создаваемых в ближайшее время в АО «ИСС» космических аппаратов является построение бортовых комплексов управления (БКУ) на базе модульно-сетевой архитектуры с применением технологии распределенных и параллельных систем обработки данных SpaceWire, дающей ряд преимуществ для построения высокопроизводительных вычислительных систем.

Для практической реализации возможностей применения сетей SpaceWire важное значение имеет решение задачи проверки работы узлов и линий этой сети для выполнения алгоритмов ее реконфигурации с целью обеспечения живучести аппаратуры, построенной на базе такой сети.

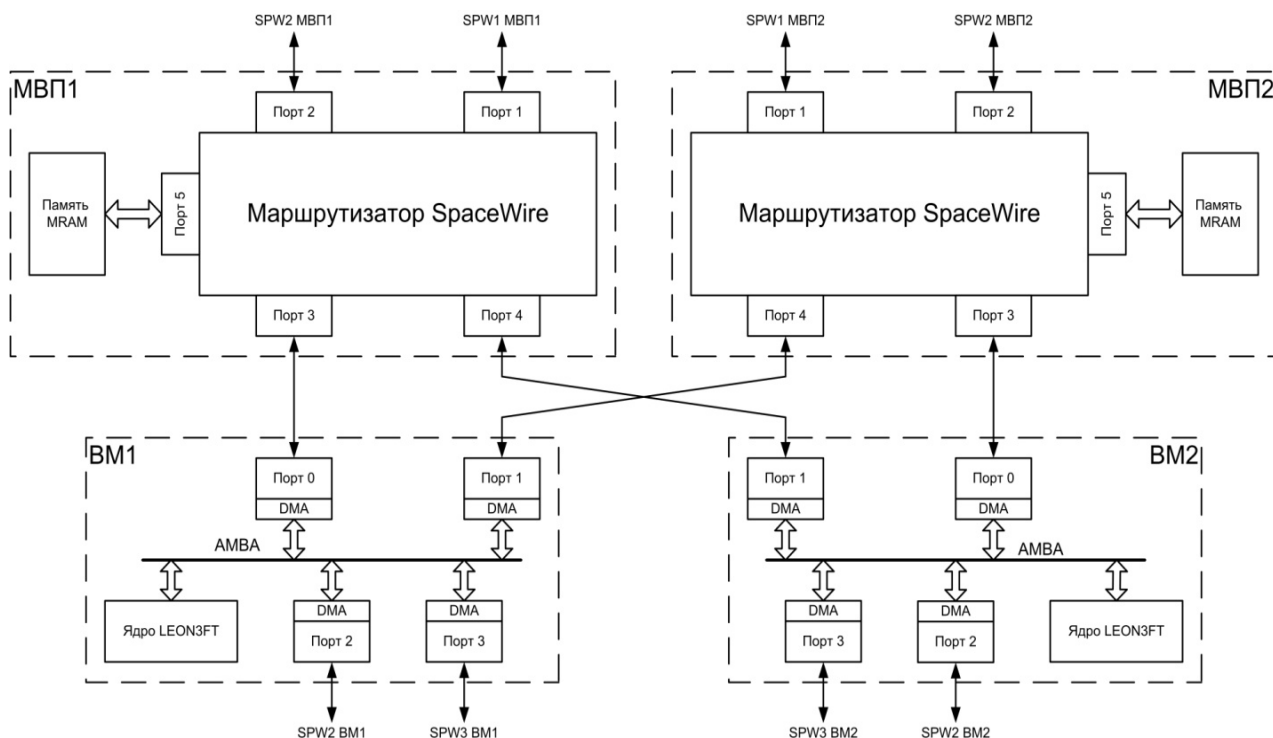
Для решения этой задачи должны использоваться как заложенные в стандарты SpaceWire и реализованные в аппаратуре возможности подтверждения работоспособности элементов сети, так и алгоритмические методы тестирования оборудования и каналов передачи данных.

В данной статье рассматривается решение упомянутых вопросов на базе конкретной реализации аппаратуры бортового компьютера с внутренней сетью обмена данными на базе интерфейса SpaceWire.

На рисунке приведена структурная схема бортового цифрового вычислительного комплекса (БЦВК) с использованием процессора LEON 3 [3], построенного на базе сети SpaceWire [1]. На рисунке показаны: модули внешней памяти МВП1 и МВП2 и вычислительные модули ВМ1 и ВМ2, связанные между собой по каналам SpaceWire. Каждый модуль МВП также содержит маршрутизатор, предназначенный для организации внутренней сети БЦВК.

Тестирование аппаратуры вычислительных комплексов с помощью алгоритмов программной верификации основных узлов аппаратуры и каналов связи всегда служило одним из основных инструментов проверки и поддержания работоспособности вычислительных систем, начиная с первых образцов бортовой вычислительной техники.

Тестовые проверки разбиваются на несколько иерархических уровней: тестирование отдельных модулей аппаратуры, тестирование собранной аппаратуры при заводских испытаниях и тестирование аппаратуры при эксплуатации. Проверки аппаратуры в процессе изготовления являются более doskonaльными для выявления и исправления дефектов, а при эксплуатации проводятся обобщенные проверки с целью выявления дефекта отдельного модуля и перехода на резерв.



Внутренняя сетевая архитектура БЦВК

При эксплуатации аппаратуры тестовые проверки выполняются на разных этапах работы аппаратуры: в момент включения для возможно подробного выявления неисправностей и в фоновом режиме для набора статистики и принятия решения о проведении реконфигурации приборов.

В рассматриваемом бортовом компьютере основные устройства, показанные на рисунке, являются взаимозаменяемыми. Также возможна подмена неисправных линий обмена данными другими исправными линиями. Для этого используются возможности реконфигурации, заложенные в сети SpaceWire.

Алгоритмы тестирования аппаратуры рассматриваемого бортового компьютера основаны на тестовой проверке отдельных устройств в части их доступности и правильного состояния, а также на выполнении пробных обменов данными по всем каналам связи в сети.

Состав тестовых проверок рассматриваемого бортового компьютера в части проверки сети SpaceWire показан в таблице.

**Состав тестовых проверок аппаратуры сети SpaceWire бортового компьютера**

Проверка контроллера узла SpW-1 BM для связи с МВП1
Проверка контроллера узла SpW-0 BM для связи с МВП2
Проверка узла SpW-3 МВП1 для связи с BM1
Проверка узла SpW-4 МВП1 для связи с BM2
Проверка узла SpW-3 МВП2 для связи с BM1
Проверка узла SpW-4 МВП2 для связи с BM2
Проверка маршрутизатора МВП1
Проверка маршрутизатора МВП2

Как видно из приведенного состава проверок, проверки узлов МВП и маршрутизаторов блоков МВП являются комплексными и дают возможность проанализировать не только состояние аппаратуры, но и правильность передачи пакетов через линии сети. При этом структура передаваемых сообщений в виде стандартных пакетов данных позволяет использовать заложенные в стандарте возможности верификации данных. В частности, это относится к используемым возможностям транспортного протокола RMAP [2].

Проведенные лабораторные исследования и практическая экспериментальная отработка макетных и штатных образцов бортового компьютера с имитацией помех и отказов в цепях каналов связи [5] подтвердили правильность выбранных методов и алгоритмов проведения тестовых проверок компьютера с сетью SpaceWire и позволили приступить к испытаниям рассматриваемого бортового компьютера в составе космического аппарата.

**Библиографические ссылки**

1. ECSS Standart ECSS-E-50-12C. SpaceWire, Links, Nodes, Routers and Networks / European Cooperation for Data Standardization, July, 2008.
2. ECSS-E-ST-50-52C SpaceWire – Remote memory access protocol. European Cooperation for Space Standardization (ECSS), 2010. 109 с.
3. The SPARC Architecture Manual. Version 8 / SPARC International, Inc., 1992.
4. Шейнин Ю., Солохина Т., Петричкович Я. Технология SpaceWire для параллельных систем и бортовых распределенных комплексов // Электроника : НТБ. 2006. № 5. С. 64–75.

5. Голубев Е. Аппаратно-программный комплекс для отработки бортового компьютера с процессором LEON-2 и сетью SpaceWire // Решетневские чтения : сб. тез. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013.

#### **References**

1. ECSS Standart ECSS-E-50-12C. SpaceWire, Links, Nodes, Routers and Networks / European Cooperation for Data Standardization, July, 2008.

2. ECSS-E-ST-50-52C SpaceWire – Remote memory access protocol. European Cooperation for Space Standardization (ECSS), 2010. 109 p.

3. The SPARC Architecture Manual. Version 8 / SPARC International, Inc. 1992.

4. Sheynin U., Solohina T., Petrichkovich Y. Tehnologiya SpaceWire dlya parallelnykh sistem i bortovykh raspredelennykh kompleksov. Elektronika : MIB, 2006. № 5. P. 64–75.

5. Golubev E. Apparatno-programmniy kompleks dlya otrabotki bortovogo kompyutera s protsessorom LEON2 i setyu SpaceWire // Reshetnevskie chtenia : Sbornik tezisov / Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2013.

© Голубев Е. Н., Зырянова К. Е., 2018

УДК 621.311.6

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ОГРАНИЧИТЕЛЯ ПУСКОВОГО ТОКА ДЛЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. А. Миронов

ООО «Александр Электрик источники электропитания»  
Российская Федерация, 129226, г. Москва, просп. Мира, 125  
E-mail: mironov@aeip.ru

*Описываются алгоритмы и особенности работы ограничителей пускового тока для систем электропитания космических аппаратов. Рассматриваются вопросы увеличения надёжности, расширения их функциональных возможностей.*

*Ключевые слова: система электропитания, пусковой ток, датчик тока, регулирующий элемент, защита от перегрева, фильтрация радиопомех.*

## SELECTION OF THE OPTIMAL STRUCTURE OF THE STARTING CURRENT LIMITER FOR POWER SUPPLY SYSTEMS OF SPACE VEHICLES

А. А. Mironov

ООО "Alexander Electric istochniki electropitaniya"  
125, Mira Av., Moscow, 129226, Russian Federation  
E-mail: mironov@aeip.ru

*The article describes the algorithms and features of the starting current limiters for power supply systems of space vehicles. The issues of increasing reliability and expanding their functionality are considered.*

*Keywords: power supply system, starting current, current sensor, control element, overheat protection, radio interference filtering.*

Ограничители пускового тока (ОПТ) широко применяются для построения систем электропитания РЭА, первичный источник электропитания которых ограничен по мощности и не допускает бросков тока. К которым относятся системы вторичного электропитания (СВЭП) космических аппаратов. Обычно ОПТ включается на входе СВЭП, ограничивая зарядный ток конденсаторов входных фильтров всей группы модулей электропитания и защищая заодно контакты силового коммутатора, ресурс которых невелик.

На рис. 1 приведена функциональная схема ОПТ с общей шиной, регулирующей элемент (РЭ) которого работает в режиме непрерывного регулирования [1]. Обозначим эту структуру как ОПТ1.

Увеличенная мощность, выделяемая на РЭ во время запуска или КЗ на его выходе, влечёт за собой перегрев регулирующего элемента и ограничивает время действия перегрузки на уровне единиц мс. Поэтому ОПТ с непрерывным режимом регулирования РЭ применяется только при малых токах нагрузки (до 1...2 А). Но даже в этом случае необходимо предусмотреть ограничение длительности перегрузки РЭ включением в схему специального таймера, выключающего РЭ по истечении указанного времени (на рис. 1 не показан).

Другой путь решения проблемы перегрева РЭ – перевод его при перегрузке в импульсный режим работы. На рис. 2 показана функциональная схема такого ОПТ [2]. Назовём эту структуру ОПТ2.

Усилитель У измеряет ток в «минусовой» шине питания с помощью резистора-датчика тока  $R_{ДТ}$  и управляет работой регулирующего элемента РЭ. Драйвер Др преобразует выходной сигнал У в управляющее напряжение  $U_{У,РЭ}$  формата, требуемого для быстрого открывания и запираания РЭ. Для устойчивой работы ОПТ в режиме переключения РЭ усилитель У охвачен положительной обратной связью на резисторах R1R2.

В установленном режиме работы ОПТ2 справедливо соотношение:  $I_{Н} = I_{L} = I_{ДТ}$ , на выходе У напряжение близко к нулю:  $U_{У,ВКЛ} \approx 0$ , на выходе драйвера Др – напряжение  $U_{РЭ,ВКЛ}$ , обеспечивающее открывание РЭ. Рабочий ток протекает от источника входного напряжения через открытый РЭ, дроссель L, нагрузку и резистор-датчик тока  $R_{ДТ}$ . На рис. 3 показаны эпюры сигналов во время включения ОПТ при запуске на ёмкостную нагрузку.

При включении ОПТ, когда происходит зарядка конденсаторов фильтров подключённых на выход ОПТ СВЭП, ток нагрузки увеличивается, и при напряжении на датчике тока  $U_{ДТ,ВЫКЛ} = U_{ОП} \cdot (1 + R1/R2)$  на выходе У скачкообразно устанавливается напряжение  $U_{У,ВЫХ}$ , на выходе драйвера Др – 0 и РЭ закрывается. Ток в дросселе L начинает уменьшаться, протекая теперь через замыкающий диод VD, нагрузку и  $R_{ДТ}$ . При напряжении на  $R_{ДТ}$   $U_{ДТ,ВКЛ} = U_{ОП} \cdot (1 + R2/R1) - U_{У,ВЫХ} \cdot R2/R1$  напряжение на вы-

ходе  $U$  вновь устанавливается на уровне 0, на выходе Др – напряжение  $U_{РЭ.ВКЛ}$ , РЭ вновь открывается и процесс повторяется. Резисторами  $R1R2$  реализован гистерезис  $\Delta U_{ДТ} = U_{ДТ.ВКЛ} - U_{ДТ.ВЫКЛ} = U_{У.ВЫХ} \cdot R2/R1$ . От выражений напряжения переключения  $U_{ДТ.ВКЛ}$ ,  $U_{ДТ.ВЫКЛ}$  через  $R_{ДТ}$  просто перейти к соответствующим значениям токов  $I_{ДТ.ВКЛ}$ ,  $I_{ДТ.ВЫКЛ}$ .

Напряжение на выходе ОПТ увеличивается до тех пор, пока на очередном периоде работы ток  $I_{ДТ}$  уже не достигает значения  $I_{ДТ.ВЫКЛ}$ . Мощность, выделяющаяся на РЭ во время запуска или перегрузки, многократно меньше аналогичного показателя структуры

ОПТ1, поэтому длительность перегрузки значения не имеет. В установившемся режиме LC-элементы устройства работают как помехоподавляющий фильтр с эффективным диапазоном фильтрации до нескольких десятков МГц.

В установившемся режиме суммарное падение напряжения на открытом РЭ, L и ДТ чуть больше аналогичного параметра ОПТ1 и составляет доли В. Нагрузка должна выбираться на максимальное значение среднего выходного тока  $I_{ВЫХ.МАКС} = (I_{ДТ.ВКЛ} + I_{ДТ.ВЫКЛ})/2$ , хотя в импульсный режим ОПТ2 переходит при значении тока  $I_{ДТ.ВЫКЛ} > I_{ВЫХ.МАКС}$ .

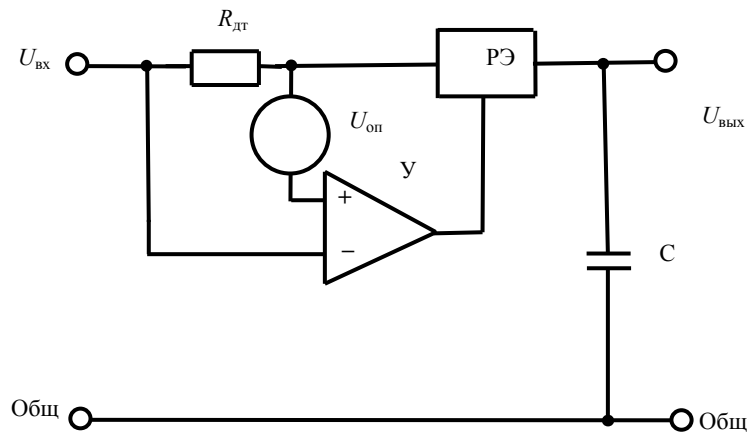


Рис. 1. Функциональная схема ОПТ1 с регулирующим элементом непрерывного регулирования.

Максимальное значение тока ОПТ1  $I_{ОПТ.МАКС}$  определяется номиналом резистора-датчика тока  $R_{ДТ}$ :

$$I_{ОПТ.МАКС} = U_{ОП} / R_{ДТ}$$

Тогда при токе регулирующего элемента РЭ  $I_{РЭ} < I_{РЭ.МАКС}$  сигнал на выходе усилителя У максимален и регулирующий элемент РЭ открыт. При увеличении тока нагрузки до значения  $I_{РЭ.МАКС}$  сигнал на выходе усилителя У уменьшается, переводя регулирующий элемент РЭ в линейный режим и ограничивая тем самым ток через него и в нагрузке значением  $I_{РЭ.МАКС}$ .

Установившееся значение выходного напряжения ОПТ при этом  $U_{ВЫХ} = R_{Н} \cdot I_{РЭ.МАКС}$ ,

где  $R_{Н}$  – эквивалентное активное сопротивление нагрузки. На РЭ в этом режиме выделяется

мощность  $P_{РЭ} = (U_{ВХ} - U_{ВЫХ}) \cdot I_{РЭ.МАКС}$ , а при коротком замыкании (КЗ) на выходе –

$$P_{РЭ.МАКС} = U_{ВХ} \cdot I_{РЭ.МАКС}$$

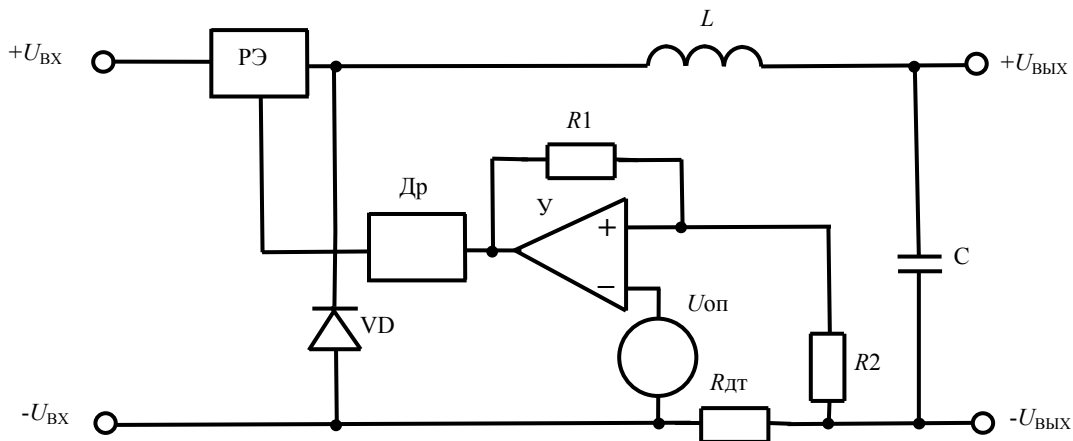


Рис. 2. Функциональная схема ОПТ2 с импульсным режимом работы РЭ при перегрузках

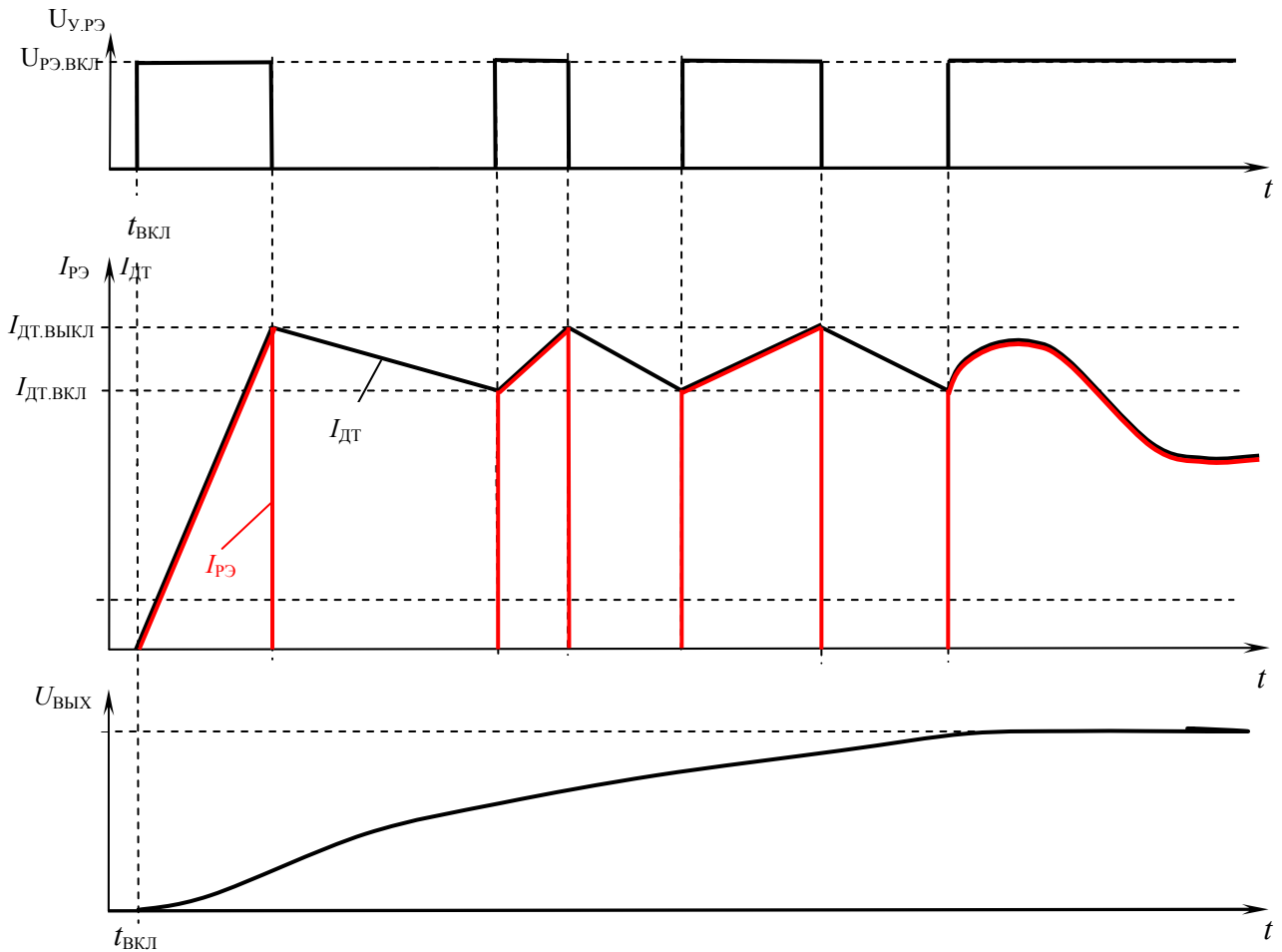


Рис. 3. Эпюры сигналов ОПТ2 при запуске на ёмкостную нагрузку

Относительно небольшая мощность рассеивания на РЭ во время запуска и перегрузки позволяет проектировать на основе этой структуры ОПТ на токи в десятки А.

#### Библиографические ссылки

1. Миронов А. А. Некоторые проблемы разработки ограничителей пускового тока. Обзор по материалам отечественной и зарубежной патентной информации за 1972–1989 гг. / Центр научно-технической информации «Поиск». 1990. Вып. 42. С. 5.
2. Миронов А. А. Структура и алгоритмы работы ограничителей пускового тока для бортовых систем

электропитания // Силовая электроника. 2017. № 1. С. 40–42.

#### References

1. Mironov A. A. Some problems of development of start-up current limiters. Review of the materials of domestic and foreign patent information for 1972–1989. Center for Scientific and Technical Information “Poisk”, 1990. No. 42. P. 5.
2. Mironov A. A. Structure and operation algorithms of start-up current limiters for on-board power supply systems // Journal of Power Electronics., 2017. No. 1. P. 40–42.

© Миронов А. А., 2018

## КОНЦЕПЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ПОРИСТЫХ СТРУКТУР В БАЗОВЫХ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ БОРТОВОЙ РЭА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. С. Никитин<sup>1,2</sup>, В. М. Карабан<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 40

<sup>2</sup>АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: xr91@mail.ru

*Предлагается концепция базовой несущей конструкции бортовой РЭА, выполненной с применением аддитивных технологий и пористого алюминия.*

*Ключевые слова: рамка, несущая конструкция, пористый алюминий, приборостроение, аддитивные технологии.*

## A CONCEPT OF POROUS STRUCTURES APPLICATION FOR SPACECRAFT ELECTRONIC MODULES' SUPPORT SYSTEMS

A. S. Nikitin<sup>1,2</sup>, V. M. Karaban<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
40, Lenina Av., Tomsk, 634050, Russian Federation

<sup>2</sup>JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: xr91@mail.ru

*Authors suggest using porous aluminum and additive technologies as a new concept for spacecrafts' electronic modules' support structures making.*

*Keywords: frame, support structure, porous aluminum, instrument making industry, additive technologies.*

Требования к массогабаритным показателям (МГП) бортовой РЭА космических аппаратов (БРЭА КА) постоянно растут. Поиск способов снижения МГП является неизменно актуальной задачей. Так, стоимость запуска «Протон-М» составляет около 70 млн долл., при этом стоимость вывода 1 кг груза на орбиту составляет около 2 800 долл. для низкой опорной орбиты и около 13 000 долл. для геопереходной орбиты. В этой связи даже небольшое снижение массы КА несет реальный экономический эффект.

Отечественные КА в своей БРЭА используют базовые несущие конструкции (БНК) в виде металлических рамок. Конструкция таких рамок обеспечивает высокие показатели механической прочности при небольшом весе [1], но при этом отличается сложностью изготовления. Фрезерование такой рамки на станке с ЧПУ занимает 80–100 часов непрерывной работы, а отходы достигают 70–90 % от веса заготовки.

Последние разработки в области 3D-печати позволяют говорить о перспективе изготовления в будущем многих деталей КА на 3D-принтере из металлических порошков [2]. В этой связи разумно поставить вопрос о максимально возможном приближении к идеальному исполнению отдельной конкретно взятой детали, в данном случае – БНК. Критерием оценки может

служить минимизация массы рамки при соответствии её механических и тепловых характеристик требуемым значениям.

Сейчас набирают обороты исследования пористого алюминия [3–5]. Экспериментальные исследования показывают, что материал обладает набором уникальных свойств: низкая плотность, высокие характеристики по поглощению ударов и вибраций, высокая прочность, возможность поглощения электромагнитных помех. Есть основания полагать, что применение данного материала в космической отрасли является перспективным [6]. Опыт его применения за рубежом уже есть [7].

В АО «ИСС» ведутся разработки по внедрению в рамках гипертеплопроводящих сред (ГТПС), представляющих собой систему теплопроводящих каналов для отведения теплового потока от теплонагруженных участков рамки. Результаты данных исследований могут быть применены при разработке новой рамки, так как при помощи 3D-печати можно выполнить теплопроводящие каналы любой формы.

Изготовление детали сложной формы, к тому же с закрытыми пустотами в объеме, является технологически очень сложной процедурой, освоение которой нецелесообразно. В то же время печать такой детали на 3D-принтере – вполне реальная задача.



Учитывая все вышесказанное, авторы предлагают следующую концепцию БНК БРЭА КА:

- БНК изготавливается путем печати из металлического порошка на 3D-принтере;
- места крепления БНК к несущим конструкциям вышестоящего уровня выполняются сплошным материалом для повышения прочности;
- в теплонагруженные участки БНК интегрируется система каналов ГТПС;
- остальные участки БНК выполняются в виде сплошной оболочки с пористой сердцевиной.

Для доказательства состоятельности концепции необходимо провести следующие исследования:

- выбрать тип полостей (шарообразные поры, поры в виде многогранных фигур, заполнение трубками (балками), случайный размер и расположение пор либо строгая повторяющаяся структура и другие варианты);
- создать трехмерную модель новой БНК;
- выполнить численное моделирование для подтверждения механических параметров;
- оценить конструкцию с точки зрения защиты от радиационного излучения, так как снижение массы влечет снижение эквивалентной толщины поглощающего слоя;
- изготовить опытный образец для проведения испытаний.

Принимая во внимание сложность моделирования пористых структур с точки зрения затрат вычислительных ресурсов, может понадобиться создание специальной математической модели для упрощения процедуры расчета. На основе математической модели возможно создание специального программного обеспечения для определения параметров моделирования в зависимости от типа, количества, формы, порядка расположения пор, а также от типа материала.

Ожидаемые преимущества новой конструкции:

- снижение массы БНК на 15–30 %. На уровне прибора возможен выигрыш 0,1–0,5 кг;
- повышение вибро- и ударостойкости благодаря свойствам пористого алюминия.

В качестве недостатков предлагаемой концепции можно выделить:

- дорогостоящее оборудование и расходные материалы;
- необходимость отработки технологии 3D-печати, обучения персонала;
- нанесение дополнительных защитных слоев для повышения радиационной стойкости.

#### Библиографические ссылки

1. Карабан В. М., Зырин И. Д. Разработка новой несущей конструкции печатных плат, а также ее механический анализ для электронных модулей в космических аппаратах // Решетневские чтения : материалы XVII Междунар. науч. конф. (10–12 ноября 2011, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Ло-

гинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. С. 225–227.

2. Аддитивные технологии в космической отрасли / А. Н. Киселева, В. В. Кудинов, Е. А. Максимов и др. Обзор АО «ИСС» по материалам НТИ, 2017 г.

3. Aluminium foam sandwich structures for space applications / Dirk Schwingela, Hans-Wolfgang Seeliger, Claude Vecchionacci и др. – *Acta Astronautica*, Vol. 61, Iss. 1–6, June–August 2007. P. 326–330. Doi: 10.1016/j.actaastro.2007.01.022.

4. Impact behaviour testing of aluminium foam / M. Peroni, G. Solomos, V. Pizzinato. – *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 53, March 2013. P. 74–83. Doi: 10.1016/j.ijimpeng.2012.07.002.

5. Eric P. Fahrenthold. Computational evaluation of metal foam orbital debris shielding // 2015 IEEE Aerospace Conference. Doi: 10.1109/AERO.2015.7119145.

6. Возможность использования пеноалюминия для изготовления элементов конструкций малых космических аппаратов / В. Я. Геча, А. А. Кирякин, В. Д. Позднякова и др. // *Известия академии наук. № 2. Энергетика*. 2018.

7. Aluminium foam sandwich structures for space applications 2007. Doi: 10.1016/j.actaastro.2007.01.022.

#### References

1. Karaban V. M., Zyrin I. D. [A new printed board support structure development and its mechanical analysis for electronic modules in spacecraft]. *Materialy XVII Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XVII Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2013. P. 225–227. (In Russ.)

2. Additivnyye tekhnologii v kosmicheskoy otrasli / A. N. Kiseleva, V. V. Kudinov, E.A. Maksimov et al. *Obzor AO "ISS" po materialam NTI*, 2017 g.

3. Aluminium foam sandwich structures for space applications / Dirk Schwingela, Hans-Wolfgang Seeliger, Claude Vecchionacci и др. *Acta Astronautica*, Vol. 61, Iss. 1–6, June–August 2007. P. 326–330. Doi: 10.1016/j.actaastro.2007.01.022.

4. Impact behaviour testing of aluminium foam / M. Peroni, G. Solomos, V. Pizzinato. – *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 53, March 2013. P. 74–83. Doi: 10.1016/j.ijimpeng.2012.07.002.

5. Eric P. Fahrenthold. Computational evaluation of metal foam orbital debris shielding // 2015 IEEE Aerospace Conference. Doi: 10.1109/AERO.2015.7119145.

6. *Vozmozhnost' ispol'zovaniya penoaluminiumiya dlya izgotovleniya elementov konstruksiy malykh kosmicheskikh apparatov* / V. Ya. Gecha, A. A. Kiryakin, V. D. Pozdnyakova et al. // *Izvestiya akademii nauk. Energetika*. 2018. № 2.

7. Aluminium foam sandwich structures for space applications 2007. Doi: 10.1016/j.actaastro.2007.01.022.

© Никитин А. С., Карабан В. М., 2018

## ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ С АКТИВНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ

А. В. Осипов<sup>1</sup>, И. М. Журавлев<sup>2</sup>, М. Е. Хлыстунов<sup>2</sup>, А. А. Лопатин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Томский университет систем управления и радиоэлектроники  
Российская Федерация, 634050, Томская область, г. Томск, просп. Ленина, 40  
<sup>2</sup>АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: zhuravlevim@iss-reshetnev.ru

*Предложен резонансный преобразователь энергии солнечной батареи для систем электропитания космических аппаратов, исследованы его характеристики в режиме стабилизации выходного напряжения. Показано, что вольтодобавочный преобразователь имеет в 2 раза меньшую габаритную мощность трансформатора и резонансного контура по отношению к классическому гальванически развязанному преобразователю.*

*Ключевые слова: система электропитания космического аппарата, вольтодобавка, инверторный преобразователь, последовательный резонансный контур.*

## RESONANT ADD-VOLTAGE CONVERTER SOLAR ENERGY WITH ACTIVE RECTIFIER

A. V. Osipov<sup>1</sup>, I. M. Zhuravlev<sup>2</sup>, M. E. Hlistunov<sup>2</sup>, A. A. Lopatin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
40, Lelina Av., Tomsk, Tomsky oblast, 634050, Russian Federation  
<sup>2</sup>JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: zhuravlevim@iss-reshetnev.ru

*A resonant add-voltage topology converter solar energy with active rectifier is proposed for spacecraft power supply systems, investigated his characteristics in output voltage stabilization mode. Shown that add-voltage topology converter has in a half overall power of the transformer and resonant circuit than classical inverter converter.*

*Keywords: spacecraft power supply system, add-voltage topology, inverter, serial resonance circuit.*

Применение резонансных преобразователей в системах электропитания (СЭП) космического аппарата (КА) для преобразования энергии солнечной батареи (БС) является перспективным направлением из-за возможности обеспечения мягкой коммутации транзисторов. Однако большая масса элементов резонансного контура и трансформатора при применении классической топологии преобразователя (рис. 1, а) является фактором, сдерживающим его широкое применение. Кроме того, применение в СЭП КА режимов, при которых эксплуатация БС происходит на токовой ветви ВАХ приводит к изменению напряжения на БС в диапазоне от 0 до  $U_{\text{вых}}$ . Это предопределяет эффективность повышающего преобразователя и затрудняет применение вольтодобавочных структур, особенно эффективных при узкодиапазонном регулировании, так как высокочастотному преобразованию подвергается только часть энергии, определяемая диапазоном регулирования [1–3]. Целью настоящей работы является исследование характеристик резонансного преобразователя вольтодобавочной топологии при питании от БС.

Классический резонансный LC преобразователь, состоящий из инвертора и выпрямителя, связанных по

переменному току резонансным контуром (рис. 1, а), неоднократно рассматривался в литературе [2; 3]. Преобразователь может работать как в режиме широтно-импульсного регулирования напряжения инвертора, что обеспечивает понижение выходного напряжения, так в режиме регулирования выпрямителем и повышения выходного напряжения, при этом ZVS переключение силовых транзисторов обеспечивается подстройкой частоты преобразования. Регулирование реализуется фазовым сдвигом регулируемой стойки транзисторов относительно нерегулируемой, что формирует интервалы закорачивания инвертора или выпрямителя, подробно регулирование резонансного преобразователя изложено в [3–5]. С учетом того, что в принятых режимах эксплуатации напряжение на БС меньше требуемого выходного, регулирования выпрямителем достаточно для стабилизации выходного напряжения.

Недостатком такого преобразователя является повышенная мощность элементов контура и трансформатора, что обусловлено преобразованием полного потока энергии. Уменьшить мощность преобразуемой энергии можно применением вольтодобавочной схемы (рис. 1, б).

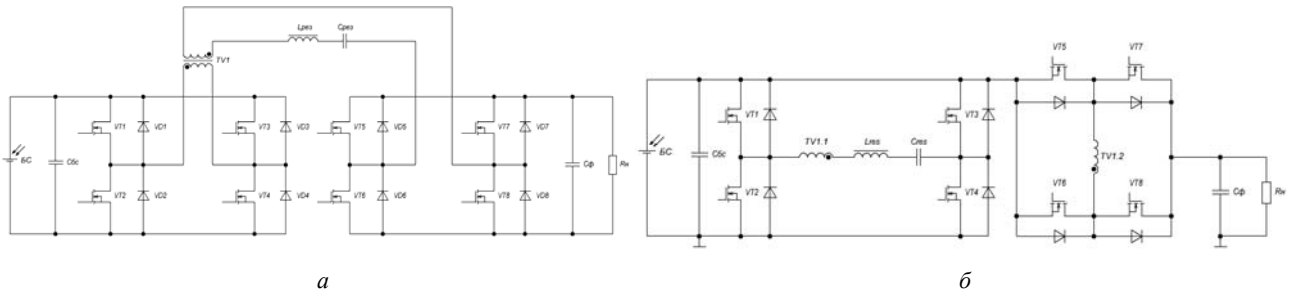


Рис. 1. Резонансные преобразователи с активным выпрямителем:  
 а – гальванически развязанный; б – вольтодобавочный

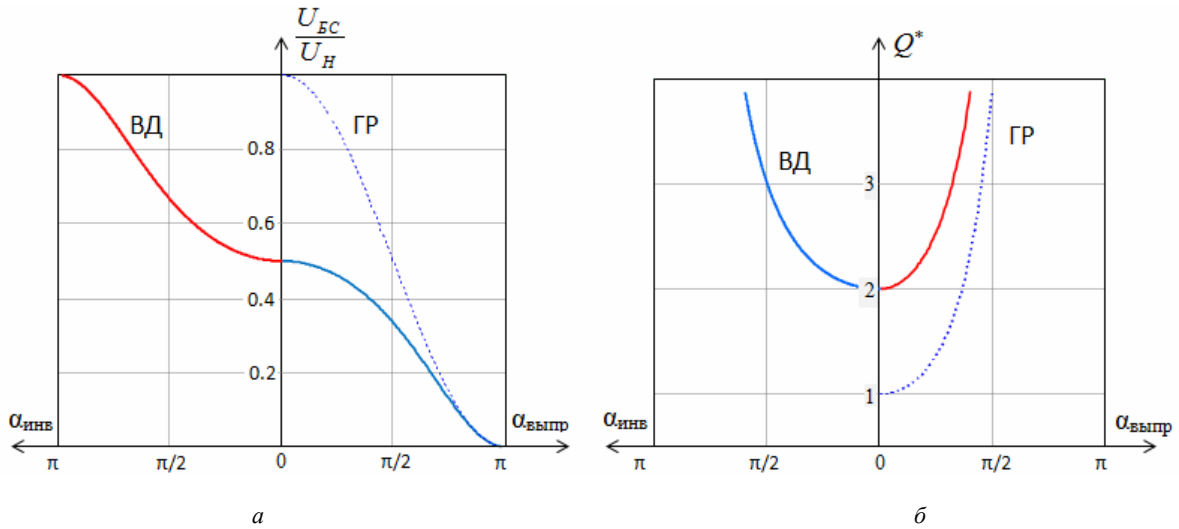


Рис. 2. Характеристики резонансных преобразователей: регулировочная характеристика (а) зависимость добротности резонансного контура от угла регулирования (б)

В этом случае ток БС распределяется между инвертором и выпрямителем  $I_{БС} = I_{инв} + I_{выпр}$ , что существенно уменьшает потери в преобразователе. Изменение выходной мощности обеспечивается регулированием входного напряжения, что описывается регулировочной характеристикой:

– для преобразователя с гальванической развязкой

$$\begin{cases} \frac{U_{БС}}{U_H} = \cos^2 \alpha_{инв}, \\ \frac{U_{БС}}{U_H} = \frac{1}{\cos^2 \alpha_{rect}}; \end{cases}$$

– для преобразователя с вольтодобавкой

$$\begin{cases} \frac{U_{БС}}{U_H} = \frac{1}{1 + \cos^2 \alpha_{инв}}, \\ \frac{U_{БС}}{U_H} = \frac{\cos^2 \alpha_{rect}}{1 + \cos^2 \alpha_{rect}}; \end{cases}$$

Таким образом, в вольтодобавочном преобразователе диапазон регулирования разбивается на два поддиапазона (рис. 2, а): регулирование выпрямителем обеспечивает стабилизацию выходного напряжения при  $U_{БС} \in [0 \dots U_{вых}/2]$ , а регулирование инвертором при  $U_{БС} \in [U_{вых}/2 \dots U_{вых}]$ . Применение вольтодобавочного преобразователя позволяет уменьшить не только потери в преобразователе, но и габаритную мощность электромагнитных элементов. При единичном коэффициенте трансформации максимальное значение амплитуды рабочей индукции трансформатора будет соответствовать точке  $\alpha_{инв} = \alpha_{выпр} = 0$ , в которой его напряжение составляет  $U_{ТН} = U_{вых}/2$ , что в 2 раза меньше чем в гальванически развязанном преобразователе.

Масса элементов резонансного контура определяется его добротностью  $Q$ , которая не является постоянной величиной и меняется в процессе регулирования, так как меняется активное сопротивление по переменному току  $R_{ac}$ . Для вольтодобавочной схемы получены характеристики добротности при условии  $\rho = R_{н\_min}$ , где  $\rho$  – волновое сопротивление,  $R_{н\_min}$  – минимальное сопротивление нагрузки, при регулировании инвертором

$$Q_{ac\_инв} = \frac{\rho}{R_{ac}} = \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{1 + K_{ТР}}{1 - U_{БС}^*}.$$

При регулировании выпрямителем

$$Q_{ac\_rect} = \frac{\rho}{R_{ac}} = \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{1}{\cos^4 \alpha_{rect}} \cdot \frac{1 + K_{ТР}}{1 - U_{БС}^*}.$$

Характеристики показаны на рис. 2, б, увеличение добротности при регулировании выпрямителем обусловлено уменьшением интервала подключения нагрузки к контуру, т. е. уменьшению  $R_{ac}$ , при регулировании инвертором добротность увеличивается ввиду уменьшения сопротивления приведенного к выпрямителю. Минимальное значение добротности соответствует  $\alpha_{инв} = \alpha_{выпр} = 0$  и при равных параметрах резонансного контура вольтодобавочный преобразователь имеет добротность в 2 раза больше, чем у гальванически развязанной схемы. Поэтому можно утверждать, что при равных значениях добротности вольтодобавочная схема будет обладать в 2 раза меньшей реактивной мощностью элементов контура.

Таким образом, применение вольтодобавочного преобразователя (рис. 1, б) позволяет существенно улучшить энергетические характеристики канала преобразования энергии БС. Применение гальваноразвязанного преобразователя (рис. 1, а) является явно избыточным и нерациональным при условии  $U_{БС} < U_{вых}$ .

#### Библиографические ссылки

1. Minimum current operation of bidirectional dual-bridge series resonant DC/DC converters / L. Corradini, D. Seltzer, D. Bloomquist et al. // IEEE Trans. Power Electron. 2012. Vol. 27, № 7. P. 3266–3276.
2. Arthur G. Birchenough. The Series Connected Buck Boost Regulator Concept for High Efficiency Light Weight DC Voltage Regulation.
3. ACC power converter with serial resonance circuit / A. V. Osipov, V. N. Shkolny, Y. A. Shinaykov et al. // Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. 2017. Т. 20, № 2. P. 103–110.
4. Spacecraft power supply systems with boost converter / Y. M. Cazantcev, K. G. Gordeev, A. F. Lekarev et al. // Question of electromechanical. 2011. Т. 125. P. 41–44.
5. Power supply systems of spacecraft based on adjustable current inverters / A. V. Osipov, Y. A. Shinaykov, A. I. Otto et al. // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2014. Т. 324, № 4. P. 102–108.
4. Система электроснабжения космического аппарата с интегрированным повышающим преобразователем напряжения / Ю. М. Казанцев, К. Г. Гордеев, А. Ф. Лекарев и др. // Вопросы электромеханики. 2011. Т. 125. С. 41–44.
5. Системы электропитания космических аппаратов на основе регулируемых инверторов тока / А. В. Осипов, Ю. А. Шиняков, А. И. Отто и др. // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 324, № 4. С. 102–108.

#### References

© Осипов А. В., Журавлев И. М., Хлыстунов М. Е., Лопатин А. А., 2018

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА КОММУТАЦИИ ФАЗ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА ПУЛЬСАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА

Н. И. Пономарева, П. А. Алексанов

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

*Проведен анализ влияния способа коммутации фаз на пульсации электромагнитного момента управляющего электродвигателя-маховика в составе космического аппарата. Рассмотрены способы уменьшения пульсаций электромагнитного момента.*

*Ключевые слова: коммутация, пульсации электромагнитного момента, бесконтактный двигатель постоянного тока, управляющий двигатель-маховик.*

## ANALYSIS OF INFLUENCE OF A WAY OF SWITCHING OF PHASES OF THE ELECTRIC MOTOR ON PULSATIONS OF THE ELECTROMAGNETIC MOMENT

N. I. Ponomareva, P. A. Aleksanov

JSC "Scientific & Industrial Centre "Polyus"  
56v, Kirov Av., Tomsk, 634050, Russian Federation  
E-mail: info@polus-tomsk.ru

*An analysis is made of the influence of the phase switching on the pulsations of the electromagnetic moment on the reaction wheel as part of the spacecraft. The methods for reducing the pulsations of the electromagnetic moment.*

*Keywords: switching, pulsations of the electromagnetic moment, contactless engine of a direct current, reaction wheel.*

В настоящее время высокоточные системы ориентации и стабилизации космических аппаратов (СОС КА) критичны к так называемым помеховым моментам, которые возникают в процессе функционирования двигателей-маховиков. Рассмотрим метод снижения составляющей помехового момента, создаваемой неравномерностью вращающего момента бесконтактного двигателя постоянного тока (БДПТ).

Момент электродвигателя меняется периодически в зависимости от положения ротора во время его движения. Наличие пульсаций электромагнитного момента объясняется протекающими во времени процессами коммутации токов в статорных обмотках.

Регулируется БДПТ с помощью схемы управления. Транзисторные ключи, входящие в широтно-импульсный модулятор, подают напряжение на каждую фазу обмотки электродвигателя [1]. Включение и отключение транзисторов осуществляются с помощью системы управления по сигналам от датчика положения ротора (ДПР). В зависимости от типа ДПР и способа коммутации питание фаз электродвигателя может быть дискретным (импульсным) или гармоническим.

Если используется ДПР дискретного типа, при очередной коммутации токов в секциях обмотки происходит скачкообразное перемещение магнитного поля в зазоре БДПТ.

Используя вращающуюся систему координат ( $d, q$ ), можно выразить момент трехфазного электродвигателя через поток ротора  $\Phi$  и поперечную составляющую тока статора  $i_q$  [2]:

$$M = \frac{3}{2} \Phi i_q. \quad (1)$$

Поперечная  $i_q$  и продольная  $i_d$  составляющие тока статора определяются через соответствующие напряжения  $U_q$  и  $U_d$ , которые связаны с исходными фазными напряжениями преобразованием Парка–Горва [3]:

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ 0 \end{bmatrix} = \quad (2)$$

$$= \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\Theta + \Theta_0) & \cos(\Theta + \Theta_0 - 120^\circ) & \cos(\Theta + \Theta_0 + 120^\circ) \\ \sin(\Theta + \Theta_0) & \sin(\Theta + \Theta_0 - 120^\circ) & \sin(\Theta + \Theta_0 + 120^\circ) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix}.$$

Здесь  $\Theta_0$  – начальный угол смещения результирующего вектора напряжения  $U$  относительно магнитной оси ротора. Этот вектор вращается в плоскости, которая рассматривается как плоскость комплексного переменного, скачкообразно со средней скоростью  $\omega$ . За время фиксированного состояния вектора напряжения ротор поворачивается на некоторый угол, который зависит от интервала переключения коммутатора. С учетом этого из уравнения (2) получены выражения для составляющих  $U_d$  и  $U_q$  (см. таблицу) при наиболее распространенных схемах включения обмоток трехфазного двигателя.

Схема соединения обмоток

Тип коммутации	Выражения $U_d, U_q$	Электромагнитный момент
Лучевая. Коммутация однополярная, трехфазная	$U_d = \frac{2}{3}U_0 \cos\left(\omega t + \Theta_0 + \frac{\pi}{6}\right)$ $U_q = -\frac{2}{3}U_0 \sin\left(\omega t + \Theta_0 + \frac{\pi}{6}\right)$	$\mu = \sin\left(\omega t + \Theta_0 + \frac{\pi}{6}\right)$
Лучевая. Коммутация двуполярная, трехфазная	$U_d = \frac{2\sqrt{3}}{3}U_0 \sin\left(\omega t + \Theta_0 - \frac{\pi}{6}\right)$ $U_q = -\frac{2\sqrt{3}}{3}U_0 \cos\left(\omega t + \Theta_0 - \frac{\pi}{6}\right)$	$\mu = \sqrt{3} \cos\left(\omega t + \Theta_0 - \frac{\pi}{6}\right)$
Замкнутая. Коммутация двуполярная, трехфазная	$U_d = \frac{2\sqrt{3}}{3}U_0 \sin\left(\omega t + \Theta_0 - \frac{\pi}{6}\right)$ $U_q = -\frac{2\sqrt{3}}{3}U_0 \cos\left(\omega t + \Theta_0 - \frac{\pi}{6}\right)$	$\mu = \sqrt{3} \cos\left(\omega t + \Theta_0 - \frac{\pi}{6}\right)$
Лучевая. Индивидуальная коммутация обмоток	$U_d = \frac{4}{3}U_0 \cos\left(\omega t + \Theta_0 + \frac{\pi}{3}\right)$ $U_q = -\frac{4}{3}U_0 \sin\left(\omega t + \Theta_0 + \frac{\pi}{3}\right)$	$\mu = 2 \sin\left(\omega t + \Theta_0 + \frac{\pi}{3}\right)$

При идеальной стабилизации фазного тока его форма повторяет форму напряжений. Поэтому выражения для составляющих  $i_q$  и  $i_d$  получаются из формул таблицы, путем замены  $U_d$  и  $U_q$  соответственно на  $i_d$  и  $i_q$ . Далее определяется зависимость  $M(\omega t)$  путем подстановки  $i_q$  в выражение (1).

Выразим электромагнитный момент в относительных единицах [3]:

$$\mu = M/\Phi I_\Phi. \quad (3)$$

Неравномерность электромагнитного момента обычно оценивается коэффициентом пульсации, равным отношению амплитуды переменной составляющей момента к его среднему значению. Среднее значение электромагнитного момента, выраженное в относительных единицах, имеет следующую форму:

– при одно- и двуполярной коммутации обмоток

$$\mu_{cp} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cos \Theta_0; \quad (4)$$

– при индивидуальной коммутации обмоток

$$\mu_{cp} = \frac{6}{\pi} \cos \Theta_0. \quad (5)$$

Относительное значение пульсаций момента составляет 0,5 при однополярной коммутации и 0,134 при двуполярной и индивидуальной коммутации.

Во всех рассмотренных схемах пульсации момента минимальны при нейтральной коммутации. Для их уменьшения рекомендуется увеличить число фаз. Однако увеличение фаз приведет к усложнению схемы коммутации и, соответственно, к увеличению объема и массы системы управления, что в ряде случаев недопустимо.

Таким образом, БДПТ, использующие дискретный способ коммутации фаз электродвигателя, не позволяют обеспечить высокую стабильность мгновенной частоты вращения. При этом пульсации электромагнитного момента БДПТ могут достигать 15–20 %.

Снизить пульсации электромагнитного момента можно с помощью схемы управления с гармоническим питанием обмоток электродвигателя (непрерывная коммутация), при этом требуется применение ДПР, который формирует модулированные сигналы гармонической формы [4; 5].

В двухфазном БДПТ при гармоническом питании фаз обмоток электродвигателя электромагнитный момент определяется выражением

$$M_{эм} = c_m(I_{\Phi 1} \sin \omega t \Phi_1 \sin \omega t + I_{\Phi 2} \cos \omega t \Phi_2 \cos \omega t), \quad (6)$$

где  $c_m$  – коэффициент пропорциональности;  $I_{\Phi 1}$ ,  $I_{\Phi 2}$  – амплитуды токов соответственно первой и второй фаз двигателя;  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  – амплитуды магнитных потоков.

При равенстве амплитуд фазных токов и амплитуд магнитных потоков, а также при условии совпадения фаз гармонических сигналов выражение для электромагнитного момента будет следующим:

$$M_{эм} = c_m I_\Phi \Phi (\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t) = c_m I_\Phi \Phi, \quad (7)$$

т. е. электромагнитный момент БДПТ с гармоническим питанием (непрерывной коммутацией) фаз в идеальных условиях должен иметь линейную зависимость, без каких-либо пульсаций. Наличие идеального синусоидального сигнала ДПР, а также магнитного потока в зазоре (ЭДС вращения) электродвигателя во многом зависит от точности изготовления элементов БДПТ, которая ограничена технологическими возможностями производства.

В частности, влияние оказывают:

- допуски на угловые размеры между зубцами пакетов статора и ротора ДПР;
- биения радиальных поверхностей статора и ротора, приводящие к изменению воздушного зазора ДПР;
- допуски на угловые размеры между полюсами индуктора электродвигателя;
- разброс значений магнитного потока магнитов индуктора в зазоре электродвигателя;

– неравномерность распределения магнитной индукции по поверхности магнита по причине его неоднородной структуры;

– точность совмещения фаз выходных сигналов ДПР и электродвигателя.

Однако, несмотря на приведенные ограничения, использование БДПТ с непрерывной коммутацией фаз электродвигателя позволяет достигнуть уровня пульсаций электромагнитного момента, не превышающего 5 %. В свою очередь, БДПТ с дискретной коммутацией фаз электродвигателя имеет преимущество в простоте схемы управления, при этом пульсации электромагнитного момента составляют около 15–20 %.

Таким образом, выбор схемы управления должен осуществляться исходя из совокупности таких предъявляемых к БДПТ требований, как пульсации электромагнитного момента, простота схемы управления, масса, габаритные размеры.

#### Библиографические ссылки

1. Бут Д. А. Бесконтактные электрические машины. М. : Высш. шк., 1990.
2. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М. : Академия, 2006.
3. Лянзбург В. П., Зенков А. К., Булдаков В. Н. Вентильный электропривод с автомодуляцией напряжения питания двигателя // Электрические машины

малой мощности устройств автоматики и электрооборудования : сб. статей / под общ. ред. П. В. Голубева. М. : Энергия, 1978. С. 108–115.

4. Овчинников И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе : курс лекций. СПб. : КОРОНА-Век, 2007.

5. Овчинников И. Е., Лебедев Н. И. Бесконтактные двигатели постоянного тока. Л. : Наука, 1979.

#### References

1. But D. A. *Beskontaktnie elektricheskie mashini*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990.
2. Sokolovskii G. G. *Electroprivod peremennogo toka s chastotnim regulirovaniem*. Moscow: Akademya, 2006.
3. Ljanzburg V. P., Zenkov A. K., Buldakov V. N. *Ventilnyy elektroprivod s avtomoduljaciey naprjagenia pitaniya dvigatelja* // *Electrichekie mashini maloy moschnosti ystroistv avtomatiki i elektrosnabgeniy* : sbornik statey / pod obsch. red. P. V. Golubeva. Moscow.: Energia, 1978. P. 108–115.
4. Ovchinnikov I. E. *Ventilnye elektricheskie dvigateli I privod na ich osnove* : kurs lekciy. SPb. KORONA-Vek, 2007.
5. Ovchinnikov I. E., Lebedev N. I. *Beskontaktnie dvigateli postoyannogo toka*. L. : Izdatelstvo Nauka, 1979.

© Пономарева Н. И., Алексанов П. А., 2018

УДК 621.311.6

## АППАРАТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ПИЛОТИРУЕМОГО ТРАНСПОРТНОГО КОРАБЛЯ

В. В. Савенков, А. К. Тищенко, В. Н. Волокитин

ЗАО «Орбита»  
Российская Федерация, 394038, г. Воронеж, ул. Пеше-Стрелецкая, 88  
E-mail: v.savenkov@orbitaenvo.ru

*Рассмотрен пример построения аппаратуры регулирования и контроля системы электропитания перспективного пилотируемого транспортного корабля (АРК ППТК) нового поколения. Представлены анализ и пути реализации технических требований к АРК ППТК, а также способы решения проблем проектирования.*

*Ключевые слова: перспективный транспортный корабль, аппаратура регулирования и контроля, система электропитания.*

## CONTROL AND REGULATION EQUIPMENT FOR POWER SUPPLY SYSTEM OF THE PERSPECTIVE MANNED TRANSPORT SPACECRAFT

V. V. Savenkov, A. K. Tishchenko, V. N. Volokitin

CJSC "Orbita"  
88, Peshe-Streletskaia Str., Voronezh, 394038, Russian Federation  
E-mail: v.savenkov@orbitaenvo.ru

*The paper considers the design example of the control and regulation equipment for power supply system of the new generation perspective manned transport spacecraft (CRE PMTS). Analysis and technical requirements implementation for CRE PMTS as well as ways to solve design problems are shown in this article.*

*Keywords: perspective transport spacecraft, control and regulation equipment, power supply system.*

Аппаратура регулирования и контроля является основным звеном системы электропитания (СЭП) перспективного многоразового пилотируемого транспортного космического корабля, который должен прийти на смену пилотируемым кораблям серии «Союз» и автоматическим грузовым кораблям серии «Прогресс».

Совместно с аккумуляторными батареями (АБ), солнечными батареями (СБ), бортовой кабельной сетью система должна обеспечивать:

- совместную работу СБ и АБ на общую нагрузку;
- электропитание бортовой аппаратуры ППТК постоянным напряжением требуемого качества;
- автономный заряд каждой АБ зарядным током величиной, соответствующей уровням уставок тока заряда, формируемым по командам бортовых вычислительных систем (БВС) ППТК;
- выравнивание токов разряда на общую нагрузку параллельно работающих АБ, с ограничением уровня тока разряда;
- обмен информацией с БВС в части приема и обработки команд и передачи телеметрической информации по магистральному последовательному интерфейсу (МПИ) ГОСТ Р 52070;
- обмен информацией по SAN-интерфейсу с модулем контроля АБ в части приема команд включения/отключения заряда АБ и передачи телеметрической информации от АБ в АРК.

Срок активного существования ППТК находится в пределах 1–1,5 года, при этом ресурс ППТК дол-

жен предусматривать эксплуатацию его как на околоземной орбите, так и в составе окололунной инфраструктуры.

В связи с этим, особенности эксплуатации ППТК обуславливают достаточно жесткие технические требования к подсистемам ППТК, в том числе к АРК:

- по массогабаритным показателям;
- надежности;
- радиационной стойкости;
- эффективности;
- энергетической плотности.

Как правило, для реализации высоких технических требований к АРК, разработчику аппаратуры приходится решать множество противоречивых задач. Например, увеличение надежности АРК путем снижения коэффициента загрузки ЭРИ и резервирования узлов приводит к увеличению массы, а повышение эффективности и радиационной стойкости снижает энергетическую плотность и, как следствие, ухудшает массогабаритные показатели АРК.

Электропитание бортовой аппаратуры в ППТК должно обеспечиваться низковольтной СЭП с напряжением в диапазоне от 28 В до 32,5 В и суммарной мощностью до 4000 Вт.

Отличительными особенностями АРК ППТК являются: блочно-модульный способ построения, резервирование силовых элементов и узлов, микроконтроллеров, цифровой логики, а также использование радиационно-стойкой элементной базы отечественного производства.



Для обеспечения высоких требований энергетической эффективности в качестве первичного источника энергии применена арсенид-галлиевая солнечная батарея с основными характеристиками: мощность одной СБ в начале полета – 1 800 Вт, напряжение холостого хода – 100 В, ток короткого замыкания – 37 А.

Для регулирования тока солнечной батареи применен регулятор параллельного типа, при этом, поскольку особенностью выбранного типа солнечной батареи по сравнению с батареями на основе кремния является повышенная электрическая емкость (до 1 мкФ), в силовом ключе применены токоограничивающие цепи, обеспечивающие плавную траекторию нарастания тока.

Конструктивно регуляторы объединены по 2 шт. в 2-х силовых модулях мощностью по 1800 Вт каждый, при этом все модули имеют резервное включение. Удельная мощность каждого модуля составляет 703 Вт/кг. В каждом модуле содержится регулятор, способный коммутировать энергию СБ на две независимые шины электропитания.

Мощность, отдаваемая в нагрузку каждым регулятором тока СБ составляет 900 Вт.

В подсистеме хранения энергии применена литий-ионная аккумуляторная батарея, имеющая параметры: диапазон рабочих напряжений – (16,2...29,5) В; максимальный разрядный ток – 45 А; ток заряда ступенчатый, снижаемый в процессе заряда, шесть уровней (20,0; 10,0; 5,0; 2,5; 1,0; 0 А).

Регулятор тока АБ представляет собой зарядно-разрядное устройство на основе непосредственных преобразователей повышающего и понижающего типов с ШИМ-регулированием. Конструкция содержит 4 шт. зарядно-разрядных силовых модуля, по 2 шт. зарядно-разрядных устройств в каждом. Модуль обеспечивает мощность 700 Вт, при этом в каждом модуле одно устройство является резервным. Удельная мощность каждого модуля составляет 284 Вт/кг.

Управление силовыми преобразователями тока СБ и АБ осуществляется автоматически в зависимости от баланса энергии на борту ППТК.

Для увеличения надежности СЭП ППТК в АРК предусмотрены две независимые шины электропитания. При отказе одной шины (например, в результате короткого замыкания), вторая шина остается работоспособной, обеспечивая электропитание бортовых критичных нагрузок мощностью до 2 800 Вт, при этом часть мощности солнечной батареи, питавшей отказавшую шину, коммутируется одним из регуляторов тока на исправную шину.

Высокая надежность АРК ППТК обеспечивается также применением быстродействующих электронных средств защиты от коротких замыканий (КЗ), которые могут возникнуть в силовых шинах питания. При возникновении КЗ в шине срабатывание защиты происходит за время менее 10 мкс. При этом защита остается активной до полного устранения причины, вызвавшей КЗ.

Использование цифрового канала передачи информации на базе CAN и МПИ – протоколов для передачи телеметрической и управляющей информации значительно уменьшило количество электрических

связей между АРК и БВС с одной стороны, и АРК и модулем управления АБ – с другой.

Для увеличения энергетической плотности в АРК реализована оптимальная компоновка силовых ЭРИ на основе печатных плат с металлическим основанием и применены ЭРИ, в том числе силовые, для поверхностного монтажа.

Примененная современная электронная компонентная база, разработанные конструктивные и схемотехнические решения обеспечили оптимальные эксплуатационные, энергетические и массогабаритные характеристики АРК. Масса АРК составляет 25 кг.

В результате, для выполнения требований технического задания на разработку, опираясь на многолетний опыт по созданию аппаратуры регулирования и контроля СЭП космических аппаратов различного назначения, была разработана конструкция АРК ППТК, отличающаяся уникальными схемотехническими и конструктивными решениями, позволившими существенно улучшить массогабаритные характеристики аппаратуры, повысить энергетическую плотность и эффективность силовых преобразователей, обеспечить хороший отвод тепла одновременно с обеспечением высокой надежности.

Разработка и применение инновационных решений при построении структуры АРК ППТК, позволили обеспечить заданные требования в полном объеме.

#### Библиографические ссылки

1. ЗАО «Орбита». Научно-технический отчет о составной части ОКР «Разработка предложений по конструкции и реализации технических требований для аппаратуры регулирования и контроля (АРК) СЭС ППТК».
2. База данных по радиационной стойкости электронных компонентов зарубежного производства (РСЭК). РНИИ «Электростандарт».
3. Патент РФ № 2165669. Зарядно-разрядное устройство. Савенков В. В., Тищенко А. К., Лившин Г. Д.
4. Пилотируемый транспортный корабль нового поколения [Электронный ресурс]. URL: <http://kosmolenta.com/index.php/new-tech/ptknp> (дата обращения: 10.06.2018).

#### References

1. Orbita, CJSC. Scientific and technical report on the part of R & D "Development of proposals for the design and implementation of technical requirements for control and regulation equipment of the power supply system of PPTS".
2. Database on radiation resistance of electronic components of foreign production. RNI "Electrostandart".
3. V. V. Savenkov, A. K. Tishchenko, G. D. Livshin. Charging-discharge device. Patent № 2165669.
4. New generation perspective manned transport spacecraft. Available at: <http://kosmolenta.com/index.php/new-tech/ptknp> (accessed: 10.06.2018).



**Секция**

**«ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА  
КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ»**

УДК 621.316.722.1

## ПРОБЛЕМЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ ИВЭП ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

А. А. Афанасьев

АО «Научно-производственное предприятие «ЭлТом»  
Российская Федерация, 140070, Московская область, Люберецкий район, пгт. Томилино, ул. Гаршина, 11  
E-mail: opr5@eltom.ru

*Описаны особенности разработки современных радиационно-стойких преобразователей напряжения для систем электропитания космической аппаратуры, выявлены основные проблемы при проектировании и сформулированы предложения для их преодоления.*

*Ключевые слова: источник вторичного электропитания, электронная компонентная база, радиоэлектронная аппаратура, импортозамещение.*

## PROBLEMS IN THE DESIGN OF RADIORESISTANT SECONDARY POWER SUPPLIES FOR POWER SUPPLY SYSTEMS IN SPACECRAFT HARDWARE

A. A. Afanasyev

JSC "Scientific-production enterprise "ElTom"  
11, Garshina Str., Tomilino village, Lyuberetsky district, Moscow region, 140070, Russian Federation  
E-mail: opr5@eltom.ru

*The article describes the features of the development of modern radioresistant voltage converters for power supply systems in space equipment, identifies the main problems in their design and formulates proposals to overcome them.*

*Keywords: secondary power supply, electronic component, radio-electronic equipment, import substitution.*

В последнее время для построения систем электропитания космических летательных аппаратов используются унифицированные радиационно-стойкие модули питания, производимые иностранными компаниями Crane (торговая марка InterPoint), International Rectifier, VPT Inc [1; 2].

Предприятие АО «НПП «ЭлТом» в рамках программы импортозамещения разработало и в данный момент серийно осваивает модули питания, которые являются функциональными и конструктивными аналогами наиболее популярных серий. В табл. 1 приведена информация по соответствию сериям ИВЭП.

При проведении опытно конструкторских работ по созданию радиационно-стойких ИВЭП выявились проблемы, препятствующие в полной мере созданию полноценных иностранных аналогов.

Одной из главных проблем при создании конкурентно-способной РЭА является состояние элементной базы.

Сравнительный анализ основных электрических и масса-габаритных характеристик электронных компонентов российского производства категории качества «ВП» и элементов иностранного производства качества «military» и «space», показывает отставание по основным параметрам, в частности:

- керамические конденсаторы по удельной ёмкости;
- полупроводниковые диоды Шоттки по прямому падению напряжения;
- полевые МДП транзисторы по сопротивлению открытого канала и по полному заряду;

- микросхемы ШИМ контроллеров по номенклатуре типов управления;

- магнитопроводы по типам конструктивного исполнения.

Вторая проблема, это отсутствие SPICE-моделей отечественных электронных компонентов для проведения схемотехнического моделирования разрабатываемых изделий.

Схемы источников питания включают в себя значительное количество электронных компонентов. Ручной расчет схемы представляет собой чрезвычайно сложную задачу. На помощь разработчику приходят различные системы автоматического проектирования РЭА. Для анализа электронных схем используются программы моделирования, работающие со SPICE-моделями электронных компонентов. Основные задачи этих программ проведение анализа работы схемы во временной и частотной области, проведение параметрической оптимизации, проведению статистического анализа при определенном разбросе параметров электронных компонентов.

При помощи программы моделирования можно провести сравнительный анализ возможных топологии силовой части преобразователя по основным параметрам – мощности потерь в электронных компонентах, коэффициенту полезного действия преобразователя, оценить амплитудные и действующие значения токов и напряжения в схеме, определить пульсацию входного тока и выходного напряжения. Меняя режимы работы преобразователя, можно получить исходные данные по загрузке электронных компонен-

тов по току, напряжению и мощности. Эти данные можно использовать для проведения предварительного расчета надёжности изделия.

Для исследования динамических свойств импульсного преобразователя напряжения можно рассматривать его как непрерывную систему. Переход к непрерывной системе преобразователя основывается, во-первых, на представлении силовой части в виде непрерывного звена и, во-вторых, на представлении управляющей части, включая ШИМ, в виде непрерывных звеньев системы. Полученная линейная эквивалентная схема преобразователя легко вводится в программу моделирования SPICE [3]. Частотный анализ схемы между входом управления и выходом преобразователя позволяет определить запасы по устойчивости коэффициента усиления и фазы.

Применение в качестве аналогов модели импортных компонентов не всегда адекватны реальным компонентам. Проведение моделирования с применением моделей аналогов приводит к увеличению погрешности при оценке параметров разрабатываемых схем.

Отдельно хотелось бы отметить отсутствие моделей для исследования радиационного поведения электронных компонентов и схем, а также методических материалов по проведению моделирования воздействия ионизирующего излучения.

Третья по значимости проблема, это сроки поставки электронных компонентов. Для проведения исследования поведения РЭА, после этапа схемотехниче-

ского моделирования необходимо изготовить макеты и экспериментальные образцы. Очень часто новые разработки требуют уменьшения размера изделия, увеличения КПД, улучшения других электрических параметров. Без применения новых электронных компонентов получить результат бывает очень трудно или невозможно.

В табл. 2 приведен пример сроков поставок электронных компонентов за 2017–2018 год.

При значительных сроках поставок электронных компонентов приходится использовать ближайшие аналоги. Однако полученный таким образом макет или экспериментальный образец по своим характеристикам не отражает реальных возможностей будущего изделия.

Следующая проблема, связана с новыми требованиями по стойкости к воздействию тяжёлых заряженных частиц ТЗЧ к аппаратуре космического применения. Эти требования стали предъявляться не так давно и на большую часть электронных компонентов значений по стойкости, нет. Предприятия производители электронных компонентов, специальную работу по включению в ТУ дополнительных данных по стойкости к ТЗЧ не ведут.

АО «НПП «ЭлТом» в рамках проведения ОКР, провела испытания по определению характеристик стойкости к воздействию ТЗЧ у следующих серий модулей питания – РМП, РМПЕ, ГРМПВ, КП, СМПВ, СМПН.

Таблица 1

Таблица соответствия серий ИВЭП

Серии импортных ИВЭП	Серии ИВЭП АО НПП ЭлТом	Uвх, В	Rвых, Вт	Iвых макс, А	Количество выходных каналов	Расположение выводов
Crane (InterPoint )						
SLH28S	СМПВ1,5ОВ	28	1,5	0,06	1	Вертикальное
SLH28D	СМПВ1,5ДВ	28	1,5	0,15	2	Вертикальное
SMSA28S	СМПВ5,0ОВ	28	5	1,52	1	Вертикальное
SMSA28D	СМПВ5,0ДВ	28	5	0,5	2	Вертикальное
SMHF28S	СМПВ15ОВ	28	15	2,4	1	Вертикальное
SMHF28D	СМПВ15ДВ	28	15	1,5	2	Вертикальное
SMTR28S	СМПВ30ОВ	28	30	5,45	1	Вертикальное
SMTR28D	СМПВ30ДВ	28	30	2,5	2	Вертикальное
SMTR28T	СМПВ30ТВ	28	30	4,2 / 0,37	3	Горизонтальное
SMFL28S	СМПВ65ОВ	28	65	12,12	1	Горизонтальное
SMFL28D	СМПВ65ДВ	28	65	5,5	2	Горизонтальное
SMFLHP28S	СМПВ100ОВ	28	100	16	1	Горизонтальное
SMFLHP28D	СМПВ100ДВ	28	100	8	2	Горизонтальное
SMP120S	–	100	49	8	1	Горизонтальное
–	СМПН65ОВ	100	65	10	1	Горизонтальное
–	СМПН100ОВ	100	100	16	1	Горизонтальное
VPT Inc.						
SVSA28S	ГРМПВ05ОВ	28	6	1,21	1	Вертикальное
SVSA28D	ГРМПВ05ДВ	28	5	0,7	2	Вертикальное
SVRHF28S	КП2715С	28	15	3	1	Вертикальное
SVRHF28D	КП2715Д	28	15	2,1	2	Вертикальное
SVRTR28S	КП2730С	28	40	6,06	1	Вертикальное
SVRTR28D	КП2730Д	28	40	3,6	2	Вертикальное
International Rectifier						
S28S	ГРМПВ10ОВ	28	10	3,03	1	Горизонтальное
S28D	ГРМПВ10ДВ	28	10	1,6	2	Горизонтальное
LSO28S	ГРМПВ30ОГ	28	30	7,58	1	Горизонтальное
LSO28D	ГРМПВ30ДГ	28	30	4,8	2	Горизонтальное

Таблица с данными по срокам поставок

Наименование	Срок поставки, дней	Производитель
Резисторы		
P1-12	45	АО «Ресурс»
Конденсаторы		
K10-47Мв	90	АО «ВЗРД «Монолит»
K10-83	90	АО «НИИ «Гириконд»
K10-84в	120	АО «ВЗРД «Монолит»
K53-72	120	ОАО «Элеконд»
K53-68	90	ОАО «Элеконд»
Диоды		
2Д290х-5	90	АО «ВЗПП-С»
2Д269х-5	90	АО «ВЗПП-С»
Транзисторы		
2П7164х-5	90	АО «Ангстрем»
2ПЕ212БН	90	АО «Ангстрем»
2Т664Б-5	75	ЗАО «Группа Кремний Эл»
2Т665Б-5	75	ЗАО «Группа Кремний Эл»
Микросхемы		
1319ЕУ5У	70	ЗАО «Группа Кремний Эл»
1290ЕУ3У	–*	ЗАО «Группа Кремний Эл»
Магнитопроводы		
M1300HMC2 Ш18	90	ОАО «Завод Магнетон»
МД	50	ПАО «Мстатор»

Примечание. \* – не освоено до настоящего времени.

Также была испытана серия микросхем 1303ЕНххП непрерывного мощного стабилизатора положительной полярности с низким падением напряжения между входом и выходом. Полученные данные по стойкости этих изделий были включены в соответствующие разделы ТУ.

Для создания ИВЭП с высокой энергетической эффективностью целесообразно применять топологию однотактного преобразователя с передачей энергии в импульсе и паузе [4]. В исполнениях с низким входным напряжением эту топологию необходимо дополнять схемой синхронного выпрямления. Для управления данной топологией требуются ШИМ контроллеры с двухканальным управлением.

Для ШИМ контроллеров с двухканальным управлением для аппаратуры космического применения помимо определения области безопасной работы по эффектам SEL и катастрофическим отказам, требуется информация по одиночным эффектам SET, SEFI в частности о характеристиках сбоя выходного напряжения сигналов управления и фазы между импульсами.

Для обеспечения дальнейшего улучшения электрических характеристик радиационно-стойких ИВЭП, сокращения сроков разработки и стоимости конечного изделия необходимо:

- совершенствовать элементную базу компонентов;
- предприятиям-производителям необходимо создавать актуальные SPICE-модели выпускаемой продукции;
- сокращать сроки поставки электронных компонентов и как можно быстрее осваивать новые компоненты в серийном производстве;
- разрабатывать и осваивать новые электронные компоненты, стойкие к воздействиям ионизирующего излучения космического пространства.

#### Библиографические ссылки

1. Белоус А. И., Солодуха В. А., Шведов С. В. Космическая электроника. В 2 кн. Кн. 1 М. : Техносфера, 2015. 696 с.
2. Белоус А. И., Солодуха В. А., Шведов С. В. Космическая электроника. В 2 кн. Кн. 2 М. : Техносфера, 2015. 488 с.
3. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника. М. : Техносфера, 2005. 632 с.
4. Поликарпов А. Г., Сергиенко Е. Ф. Однотактные преобразователи напряжения в устройствах электропитания РЭА. М. : Радио и связь, 1989. 160 с.
5. RIC7113 Single Event Effects Test Report. Revision1. International Rectifier. Jan. 2000.

#### References

1. Belous A. I., Solodukha V. A., Shvedov S. V. *Kosmicheskaya elektronika* [Electronics Space]. V 2-kh knigakh. Kniga 1 M. : Tekhnosfera 2015. 696 p
2. Belous A. I., Solodukha, V. A., Shvedov S. V. *Kosmicheskaya elektronika* [Electronics Space]. V 2-kh knigakh. Kniga 2 M. : Tekhnosfera 2015. 488 p.
3. Meleshin V. I. *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika* [Transistor conversion equipment]. M. : Tekhnosfera, 2005. 632 p.
4. Polikarpov A. G., Sergienko E. F. *Odnotaktnye preobrazovateli napryazheniya v ustroystvakh elektropitaniya REA* [Single-ended voltage converters in the power supply devices of electronics] M. : Radio i svyaz', 1989. 160 p.
5. RIC7113 Single Event Effects Test Report. Revision1. International Rectifier. Jan. 2000.

УДК 621.385.632

## НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА В АО «НПП «АЛМАЗ» ЛАМП БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ ДЛЯ СПУТНИКОВ СВЯЗИ

Д. И. Кириченко, П. Д. Шалаев, В. И. Роговин

Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Алмаз»  
Российская Федерация, 410033, г. Саратов, ул. Панфилова, 1  
E-mail: kirichenkodi@almaz-rpe.ru

*Проведен обзор ЛБВ космического применения производства АО «НПП «Алмаз» с 60-х годов XX века до 2018 г. Приведены основные параметры ЛБВ и технические решения, обеспечившие рост основных характеристик ЛБВ.*

*Ключевые слова: ЛБВ, СВЧ, параметры ЛБВ, спутники связи.*

## DEVELOPMENT AND PRODUCTION IN SC “RPE “ALMAZ” TRAVEL WAVE TUBE FOR COMMUNICATION SATELLITES

D. I. Kirichenko, P. D. Shalaev, V. I. Rogovin

JSC “Research-and-Production Enterprise “Almaz”  
1, Panfilova Str., Saratov, 410033, Russian Federation  
E-mail: kirichenkodi@almaz-rpe.ru

*A review of TWT space applications of the production of SC “RPE “Almaz” from the 60s of the XX century to 2018 is given. The main parameters and growth of technical characteristics of TWT are given. The main parameters of the TWT and the technical solutions providing the growth of the main characteristics of the TWT are given.*

*Keywords: TWT, microwave, TWT parameters, communication satellites.*

В радиопередающей аппаратуре спутников связи широко применяются усилители СВЧ-мощности на лампах бегущей волны (ЛБВ) О-типа. В России ЛБВ космического применения с выходной мощностью 50–80 Вт в частотных диапазонах С и Х разрабатывает и производит АО «НПП «Алмаз». С развитием российских систем космической связи потребовались ЛБВ с выходной мощностью более 100 Вт в частотных диапазонах от С до Ка. В НПП «Алмаз» ведутся работы по созданию таких ЛБВ.

До 1985 г в АО «НПП «Алмаз» были созданы базовые конструкции и технология производства основных узлов ЛБВ космического применения, позволяющие разрабатывать приборы средней мощности с КПД до 40 % и долговечностью до 50 тыс. ч в диапазонах частот до 10 ГГц. Высокие надёжность и КПД обеспечивались металлокерамическим вакуумноплотным корпусом, металлопористым катодом, магнитной периодической фокусирующей системой (МПФС) на основе магнитов из сплава самария и кобальта и двухступенчатым коллектором.

В следующие 20 лет проведены работы по совершенствованию основных конструкций и технологии ЛБВ. Направления совершенствования ЛБВ определялись потребностями отечественных Заказчиков. Основные задачи были направлены на увеличение мощности ЛБВ с 20–40 Вт до 50–80 Вт, увеличение КПД с 30 % до 45–50 %, увеличение минимальной наработки до отказа (далее – долговечность) с 30 тыс. ч. до 75–100 тыс. ч., освоение частотных диапазонов до 15 ГГц.

Для решения поставленных задач были разработаны замедляющие системы (ЗС) с малыми потерями и коллекторы с трёхступенчатой рекуперацией энергии электронов, позволившие увеличить КПД ЛБВ до 55 %. Разработаны двухкамерные металлопористые катоды позволившие значительно увеличить долговечность ЛБВ до 100 тысяч часов, разработаны конструкции и технология производства основных узлов ЛБВ и её арматуры, обеспечившие улучшение охлаждения наиболее теплонагруженных узлов и деталей лампы и увеличение выходной мощности ЛБВ до 100 Вт в частотных диапазонах до 15 ГГц [1].

С 2010 г. по заказам Минпромторга и АО «Российские космические системы» разработки новых типов ЛБВ были направлены на увеличение выходной мощности, КПД, долговечности, улучшение линейности характеристик и освоение новых частотных диапазонов до 30 ГГц.

Для новых приборов разработаны конструкции спиральных замедляющих систем с пролётными каналами малого диаметра и медными оболочками, разработаны новые технологии термомеханического закрепления спиральных линий замедления в медных оболочках, электронные пушки с эмиссионной долговечностью более 155 тыс. ч. при высокой плотности токоотбора с катода, четырёхступенчатые коллекторы электронов с высоким КПД коллектора, магнитные периодические фокусирующие системы с амплитудой индукции магнитного поля на оси систем до 400 мТл.

## ЛБВ производства АО «НПП «Алмаз», разработанные и разрабатываемые с 2007 г.

Годы разработки	Диапазон частот, ГГц	Выходная мощность, Вт	КПД, %	Коэффициент усиления, дБ	Долговечность, час	Масса, кг
2007–2014	3,4–3,9	130	60	50	155 000	2,2
	7,45–7,55	120	55	50	100 000	1,98
	7,2–7,8	120	60	50	155 000	1,9
	18–22	75	50	45	150 000	1,8
	17,3–22,5	200	55	50	155 000	2,3
2016–2019	20,2–21,2	135	55	50	150 000	1,4
	25,3–26,7	60	50	50	150 000	1,4
	25,5–27,5	100	50	50	150 000	1,4
	15,0–15,5	150	60	50	150 000	1,1
	20,2–21,2	60	Высокая линейность		150 000	1,2



Рис. 1. Внешний вид ЛБВ 18–22 ГГц космического назначения

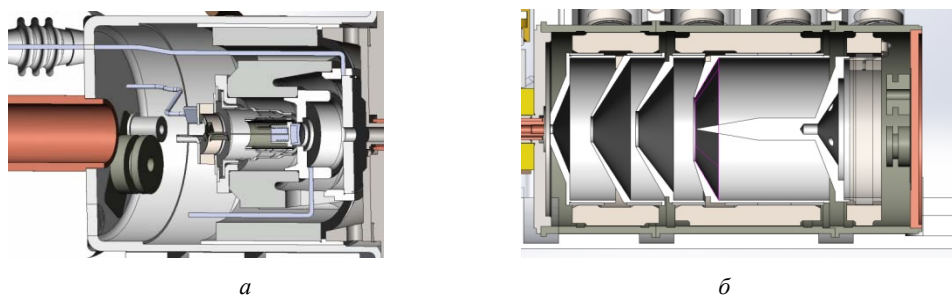


Рис. 2. 3D-модель малогабаритной электронной пушки с двухкамерным металлопористым катодом (а); 3D-модель малогабаритного электростатического коллектора с четырёхступенчатой рекуперацией энергии электронов (б)

Параметры разработанных и разрабатываемых ЛБВ, в которых используются новые узлы приведены в таблице, а также приведены минимальные значения параметров, допустимые по ТУ и ТЗ. Типичные значения параметров на 5–15 % выше приведённых в таблице.

Внешний вид ЛБВ 18–22 ГГц, как типичного представителя, показан на рис. 1.

Высоковольтные провода, по требованию Заказчика, могут быть выведены в одну сторону ЛБВ и помещены в токопроводящий экран.

В настоящее время в «НПП «Алмаз» ведутся работы следующего этапа совершенствования ЛБВ космического применения, направленные на увеличение выходной мощности до 150–200 Вт, КПД до 65–70 %, снижение нелинейных искажений сигналов в ЛБВ и снижение её массы до 0,8–1,0 кг. Для решения этих задач необходимо не только разработка новых конст-

рукций и технологий производства ЛБВ, но и разработка новых материалов в кооперации с другими предприятиями. На этом этапе разрабатываются малогабаритные: электронная пушка (показана на рис. 2, а), МПФС и коллектор (показан на рис. 2, б).

Для обеспечения потребностей отечественных предприятий, разрабатывающих и ведущих производство радиоэлектронной аппаратуры для спутников связи АО «НПП «Алмаз» приступило к разработке и освоению производства комплектующих пассивных элементов радиочастотных трактов.

Разработанные в АО «НПП «Алмаз» конструкции и технологии ЛБВ космического назначения обеспечивают возможность производства этих приборов с техническими характеристиками, соответствующими современному уровню развития техники СВЧ-приборостроения.

**Библиографическая ссылка**

1. Технология и обеспечение качества ЛБВ для бортовой аппаратуры космических платформ / Д. Д. Милютин, П. Д. Шалаев, Б. А. Горский и др. // Электронные приборы и устройства СВЧ : материалы научно-технической конференции. Саратов. ФГУП «НПП «Алмаз». Изд-во Саратовского ун-та, 2007.

**Reference**

1. Technology and quality assurance TWT for on-board equipment of space platforms / D. D. Milyutin, P. D. Shalaev, B. A. Gorsky and others. // Proceedings of the scientific and technical conference "Electronic devices and microwave devices". Saratov. FSUE "NPP "Almaz", Saratov University, August 28–30, 2007.

© Кириченко Д. И., Шалаев П. Д., Роговин В. И., 2018



УДК 629.76:629.78:621.38

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ  
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ  
ДЛЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

А. Я. Кулибаба, А. А. Сашов

АО «Российские космические системы»  
Российская Федерация, 111250, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53  
E-mail: ncseo\_1401@spacecorp.ru

*Исследуемые в данной работе вопросы являются частью работы по обеспечению однородности партий электрорадиоизделий (ЭРИ) для комплектации радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов.*

*Ключевые слова: ракетно-космическая техника, электронная компонентная база, надежность, дополнительные испытания.*

**ANALYSIS OF INFLUENCE OF ADDITIONAL TESTS ON CHARACTERISTICS  
OF RELIABILITY OF THE ELECTRICAL, ELECTRONIC  
AND ELECTROMECHANICAL (EEE) PARTS FOR ROCKET AND SPACE EQUIPMENT**

A. Ya. Kulibaba, A. A. Sashov

JSC "Russian Space Systems"  
53, Aviamotornaya Str., Moscow, 111250, Russian Federation  
E-mail: ncseo\_1401@spacecorp.ru

*Electrical, electronic and electromechanical (EEE) parts for rocket and space equipment are subjected to input control 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, reliability, additional tests.*

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 представить понижающим коэффициентом  $K_{и}$ , на который умножается справочное значение интенсивности.

Значения  $K_{и}$  можно оценить следующими путями:

- с помощью статистики отказов ЭКБ в процессе эксплуатации;
- с помощью статистики отбраковки ЭКБ в испытательных центрах;
- с помощью статистики отбраковки ЭКБ на конкретных видах испытаний;
- сравнительным анализом коэффициентов  $\pi_Q$  для различных уровней качества изделий, приведенных в справочниках по надежности ЭКБ.

После определения  $K_{и}$ , его можно использовать при проектной оценке надежности аппаратуры РКТ.

© Кулибаба А. Я., Сашов А. А., 2018

## ЛОГИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ\*

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

*Исследованы алгоритмы выявления закономерностей в данных, получаемых по результатам дополнительных отбраковочных испытаний; при условии использования совместно с результатами разрушающего физического анализа предлагаемый подход может быть применен для прогнозирования показателей безотказности электронной компонентной базы космического применения.*

*Ключевые слова: классификация, логические закономерности, электронная компонентная база.*

## LOGICAL PATTERNS FOR CLASSIFYING EEE-PARTS IN SPACE APPLICATIONS

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 algorithms for detecting patterns in the data obtained by the results of additional rejection tests. When used in conjunction with the results of destructive physical analysis, the proposed approach can be applied to predicting the reliability of the electronic component base of space applications.*

*Keywords: classification, logical patterns, electronic component base.*

Данная работа посвящена дальнейшему исследованию возможностей решения задачи прогнозирования безотказности электронной компонентной базы, подвергнутой дополнительным отбраковочным испытаниям.

Ранее разработана система, позволяющая производить выявление однородных производственных партий в сборной партии электрорадиоизделий космического применения [1]. Система основана на использовании алгоритма с жадной эвристикой. Работа системы не требует дополнительных испытаний: данные дополнительных отбраковочных испытаний и дополнительного неразрушающего контроля достаточны для выявления однородных производственных партий в сборной партии.

Благодаря применению критерия силуэта в совокупности с особым способом нормировки данных, основанном на границах дрейфа, система позволяет определять число производственных партий в сборной партии [2].

Здесь исследовалась задача повышения эффективности классификации посредством формирования информативных закономерностей, базирующихся на различных принципах построения, и разработки процедур, позволяющих улучшить интерпретируемость

классификатора, основанного на небольшом числе правил в нем.

Построение подобных классификаторов может быть основано на различных методах, среди которых наиболее перспективными для данной задачи являются методы логической классификации [3; 4], отличающиеся высокой интерпретируемостью результатов классификации.

Интерпретируемость результатов логической классификации в условиях космического производства означает возможность разработки ужесточенных норм параметров ЭРИ.

Результаты экспериментов по выявлению закономерностей и построению правил для классификации ЭРИ показывают перспективность исследуемого подхода, нацеленного на усиление поддержки принятия решений при классификации ЭРИ.

Таким образом, в результате работы исследованы алгоритмы выявления закономерностей в получаемых данных по результатам дополнительных отбраковочных испытаний; при условии использования совместно с результатами разрушающего физического анализа предлагаемый подход может быть применен для прогнозирования показателей безотказности электронной компонентной базы.

\* Работа выполнена в рамках государственного задания № 2.5527.2017/8.9 Минобрнауки России.

**Библиографические ссылки**

1. 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.
2. 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.
3. An Implementation of Logical Analysis of Data / E. Boros, P.L. Hammer, T. Ibaraki et al. // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2000. № 12 (2). P. 292–306.
4. Антамошкин А. Н., Масич И. С. Алгоритмы псевдоболевой оптимизации для выявления информативных закономерностей в данных // Системный анализ и информационные технологии : седьмая Междунар. конф. САИТ–2017 (13–18 июня 2017 г., Светлогорск) : труды конференции. Светлогорск, 2017. С. 117–124.

**References**

1. Kazakovtsev L. A., Masich I. S., Orlov V. I. et al. [Development of algorithmic support for analysis of homogeneity of electronic and radio products for the assembly of radioelectronic equipment of space vehicles]. *SibGAU. Krasnoyarsk*, 2016. 192 p.
2. Kazakovtsev L. A., Orlov V. I., Stupina A. A., Masich I. S. [The problem of classification of electronic components]. *Vestnik SibGAU*. 2014. No. 4 (56). P. 55–61.
3. An Implementation of Logical Analysis of Data / E. Boros, P. L. Hammer, T. Ibaraki et al. // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2000. № 12 (2). P. 292–306.
4. Antamoshkin A. N., Masich I. S. [Algorithms of pseudo-Boolean optimization for revealing informative patterns in data] *Sed'maya Mezhdunarodnaya konferentsiya «Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii» SAIT–2017 (Svetlogorsk, Rossiya): Trudy konferentsii. Svetlogorsk, 2017*. P. 117–124.

© Масич И. С., Федосов В. В., Краева Е. М., 2018

УДК 519.6

## АЛГОРИТМ ПОИСКА В ЧЕРЕДУЮЩИХСЯ ОКРЕСТНОСТЯХ ДЛЯ ЗАДАЧИ ВЫДЕЛЕНИЯ ОДНОРОДНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПАРТИЙ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ

В. И. Орлов, И. П. Рожнов, Л. А. Казаковцев, М. Н. Гудыма

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

*Предложен новый алгоритм для задачи выделения однородных производственных партий электрорадиоизделий космического применения по данным тестирования, позволяющий получать более точный результат в сравнении с известными алгоритмами.*

*Ключевые слова: кластерный анализ,  $k$ -средних, VNS, жадные агрегативные процедуры.*

## VARIABLE NEIGHBORHOOD SEARCH ALGORITHM FOR THE PROBLEM OF DETECTION OF HOMOGENIOUS PRODUCTION BATCHES OF SEMICONDUCTOR DEVICES

V. I. Orlov, I. P. Rozhnov, L. A. Kazakovtsev, M. N. Gudyma

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

*We propose new algorithms for solving the problem of detection of homogeneous production batches of semiconductor devices shipped for the space industry based on data of rejection tests which provide more accurate results in comparison with known algorithms.*

*Keywords: cluster analysis,  $k$ -means, VNS, greedy agglomerative procedures.*

Выделение однородных партий электрорадиоизделий по данным неразрушающего тестирования с применением методов кластерного анализа связано с обеспечением надежности электронной аппаратуры. Ионизирующие излучения как физический фактор космической среды во многом определяют срок активного существования космических аппаратов. Можно отметить общность задач кластеризации на основе модели  $k$ -средних и аналогичных (параметрами являются координаты центров кластеров) с задачами на основе модели разделения смеси распределений, в которых параметрами являются параметры распределений (в том числе математические ожидания – фактически центры кластеров), дополненные априорными вероятностями распределений.

Наиболее популярным методом решения задачи  $k$ -средних является одноименный алгоритм  $k$ -средних ( $k$ -means) [1], называемый также ALA-процедурой (Alternating Location-Allocation – чередующееся размещение-распределение). Алгоритм включает всего два чередующихся шага: разбиение на группы (кластеры) вокруг известных центров (объект относится к той группе, центр которой является к нему ближайшим) и переопределение центров групп. Алгоритм последовательно улучшает известное решение, позволяя найти локальный минимум. Это простой и быстрый алгоритм, применимый к широчайшему классу задач [2–3].

Общую схему алгоритма поиска в чередующихся окрестностях для решения задачи  $k$ -средних можно описать следующим образом [4–5].

Алгоритм ( $k$ -VNS).

1. Запустить алгоритм  $k$ -средних из случайного начального решения, получить решение  $S$ .
2. Установить  $s = s_{\text{start}}$  (номер окрестности поиска).
3. Установить  $i = 0, j = 0$ ; (количество безрезультатных итераций в конкретной окрестности и в целом по алгоритму).
4. Запустить алгоритм  $k$ -средних из случайного начального решения, получить решение  $S'$ .
5. Запустить алгоритм жадной процедуры с частичным или полным объединением [5] с начальными решениями  $S$  и  $S'$ . Таким образом, окрестность определяется способом включения центров кластеров из второго известного решения и параметром окрестности – собственно вторым известным решением.
6. Если результат по значению целевой функции лучше, чем  $S$ , то заменить  $S$  этим новым результатом, присвоить  $i = 0, j = 0$ , перейти к шагу 5.
7. Присвоить  $i = i + 1$ .
8. Если  $i < i_{\text{max}}$ , то перейти к шагу 4.
9. Присвоить  $i = 0, j = j + 1$ . Осуществить переход к новой окрестности:  $s = s + 1$ ; если  $s > 3$ , то присвоить  $s = 1$ .
10. Если  $j > j_{\text{max}}$ , или выполняются другие условия останова (максимальное время работы), то ОСТАНОВ. Иначе перейти к шагу 5.

Важными являются значения двух параметров:  $i_{\text{max}}$  – число безрезультатных поисков в окрестности и  $j_{\text{max}}$  – число безрезультатных переключений окрестностей. Мы использовали значение  $i_{\text{max}} = 2k, j_{\text{max}} = 2$ .

## Сравнительные результаты вычислительных экспериментов

Алгоритм	Достигнутое значение целевой функции	
	Среднее	СКО
Тестовые испытания партии электрорадиоизделий Н5503ЧМ1-289 (10 кластеров, 30 секунд на попытку, 30 попыток)		
<i>j</i> -Means	43 701,45	12,22
<i>k</i> -средних	43 722,19	9,87
<i>k</i> -VNS	43 689,39	4,89
Mopsi-Joensuu (20 кластеров, 2 400 секунд на попытку, 30 попыток)		
<i>j</i> -Means	36,730	0,253
<i>k</i> -средних	50,387	1,359
<i>k</i> -VNS	36,565	0,000
chess (30 кластеров, 3 600 секунд на попытку, 30 попыток)		
<i>j</i> -Means	8 014,72	10,71
<i>k</i> -средних	7 990,12	9,31
<i>k</i> -VNS	7 960,22	2,71

Также важным может быть параметр  $s_{start}$ , задающий номер окрестности, с которой начинается поиск. Данный параметр особенно важен. Мы провели вычислительные эксперименты со всеми возможными его значениями. В зависимости от этого значения алгоритмы обозначены *k*-VNS1, *k*-VNS2, *k*-VNS3. Старт алгоритма поиска может начинаться с разных окрестностей.

**Результаты вычислительных экспериментов.**

Для тестирования нашего нового алгоритма (*k*-VNS) в трёх различных его модификациях мы использовали данные тестовых испытания электрорадиоизделий и классические наборы данных из репозитория UCI. Для всех наборов данных было выполнено по 30 попыток запуска каждого алгоритма (*j*-Means, *k*-средних, новый алгоритм *k*-VNS). Фиксировались только лучшие результаты (значения целевой функции), достигнутые в каждой попытке, затем из этих результатов по каждому алгоритму были рассчитаны среднее значение и среднеквадратичное отклонение (СКО). Алгоритмы *j*-Means и *k*-средних были запущены в режиме мультистарта (см. таблицу).

Результаты наших вычислительных экспериментов показали, что новый алгоритм поиска в чередующихся окрестностях (*k*-VNS), примененный как для задачи автоматической группировки электрорадиоизделий по однородным производственным партиям, так и для задач кластеризации классических наборов данных дает более стабильные результаты (с меньшим среднеквадратичным отклонением значения целевой функции), и лучшие (по достигнутому значению целевой функции) в сравнении с классическими алгоритмами *j*-Means и *k*-средних. При этом сложно отдать однозначное предпочтение одной из версий нового алгоритма *k*-VNS. С ростом числа кластеров и объёма данных сравнительная эффективность новых алгоритмов не снижается.

Таким образом, арсенал высокоточных методов решения рассматриваемой задачи пополнен новыми алгоритмами.

**Библиографические ссылки**

1. Facility location: Concepts, models, algorithms and case studies / R. Z. Farahani and M. Hekmatfar (eds.). Berlin Heidelberg : Springer-Verlag. 2009. 549 p.
2. Steinhaus H. Sur la division des corps materiels en parties // Bull. Acad. Polon. Sci. 1956. Cl. III, Vol IV. P. 801–804.
3. Lloyd S. P. Least Squares Quantization in PCM // IEEE Transactions on Information Theory. 1982. Vol. 28. P. 129–137.
4. Алгоритм для серии задач разделения смеси распределений / Д. В. Сташков [и др.] // Решетневские чтения : материалы Междунар. науч. конф. (08–11 нояб. 2017) / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017. Т. 1, № 21. С. 327–328.
5. Дальнейшее развитие метода жадных эвристик для задач автоматической группировки объектов / Л. А. Казаковцев [и др.] // Системы управления и информационные технологии. 2017. № 4 (70). С. 34–40.

**References**

1. Facility location: Concepts, models, algorithms and case studies / R. Z. Farahani and M. Hekmatfar (eds.). Berlin Heidelberg : Springer-Verlag. 2009. 549 p.
2. Steinhaus H. Sur la division des corps materiels en parties // Bull. Acad. Polon. Sci. 1956. Cl. III, Vol IV. P. 801–804.
3. Lloyd S. P. Least Squares Quantization in PCM // IEEE Transactions on Information Theory. 1982. Vol. 28. P. 129–137.
4. Algorithm for Series of Mixture Distribution Separation Problems / D. V. Stashkov [et al.] // *Materialy Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* (2017, November 08–11, Krasnoyarsk). 2017. Vol. 1 (21). P. 327–328. (In Russ.)
5. Further Development of the Greedy Heuristic Method for Clustering Problems / L. A. Kazakovtsev, [et al.] // *Control Systems and Information Technology*. 2017. Vol. 4 (70). P. 34–40. (In Russ.)

© Орлов В. И., Рожнов И. П., Казаковцев Л. А., Гудыма М. Н., 2018

УДК 519.6

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЛЕКСНОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

В. И. Орлов, В. В. Федосов, С. А. Белов, С. М. Голованов

АО «ИТЦ – НПО ПМ»

Российская Федерация, 662970, г. Железногорск Красноярского края, ул. Молодежная, 20

E-mail: itcnpopm@atomlink.ru

*Изложен метод комплексного параметрического анализа для обработки результатов испытаний партий микросхем на стойкость к ионизирующему излучению космического пространства. Сформулированы рекомендации по доработке методик испытаний.*

*Ключевые слова: электрорадиоизделия, комплексный параметрический анализ, ионизирующее излучение космического пространства, испытания электрорадиоизделий.*

## INVESTIGATION OF INTEGRATED CIRCUITS RESISTANCE TO THE IONIZING SPACE IONIZING RADIATION WITH THE USE OF COMPLEX PARAMETRIC ANALYSIS

V. I. Orlov, V. V. Fedosov, S. A. Belov, S. M. Golovanov

JSC "TTC – NPO PM"

20, Molodezhnaya Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662970, Russian Federation

E-mail: itcnpopm@atomlink.ru

*We propose a method of complex parametric analysis for processing the test results of production batches of integrated circuits and formulate our recommendations for improvement of the program of testing.*

*Keywords: semiconductor devices, complex parametric analysis, space ionizing radiation, semiconductor devices testing.*

Современный космический аппарат (КА) это сложная электронная система, которая находится в космосе и должна функционировать в течение 10–15 лет. КА содержит от 100 до 200 тысяч электронных компонентов. Высокая ценность КА и невозможность ремонта в условиях космического полета приводит к необходимости предъявления к электронной компонентной базе (ЭКБ) исключительных требований качества [1].

В отличие от наземной аппаратуры электронное оборудование КА функционирует в условиях агрессивной внешней среды, в частности, в условиях ионизирующего излучения (ИИ) космического пространства (КП) [2].

Применение микросхем глубокой интеграции элементов на кристалле и уменьшению запасов радиационной стойкости делает актуальными исследования радиационной стойкости ЭКБ в составе КА и выработку рекомендаций по ее увеличению.

По результатам испытаний партии  $N_{mc}$  микросхем по  $N_{тест}$  тестам формируется математическая матрица результатов испытаний (МРИ) размерности  $N_{mc} \times N_{тест}$ , каждая  $i$ -я строка которой ( $i = 1, N_{mc}$ ) представляет собой вектор результатов испытаний  $i$ -й микросхемы партии по  $N_{тест}$  тестам размерности  $N_{тест}$  – ВРИ( $i$ ).

По сложившейся практике для обработки результатов испытаний используется отдельный парамет-

рический анализ, суть которого заключается в отдельной проверке принадлежности результата тестирования  $i$ -й микросхемы по  $j$ -му тесту заданному диапазону  $D(j)$ :  $|MРИ(i, j)| < D(j)$  ( $i = 1, N_{mc}$ ), ( $j = 1, N_{тест}$ ). Тем не менее, часто возникает необходимость в определении комплексных характеристик партии микросхем в целом: однородность партии микросхем, параметры плотности распределения тестовых характеристик, наличие микросхем – «выбросов» и так далее. Для решения этих задач метод отдельного параметрического анализа малоэффективен.

В этом случае применяется метод комплексного параметрического анализа. Суть метода заключается в том, чтобы результаты испытаний микросхемы воспринимать как единый объект. Это возможно, так как результат испытания  $i$ -й микросхемы – это вектор ВРИ( $i$ ) или, что то же самое, точка с координатами ВРИ( $i$ ) в  $N_{тест}$ -мерном пространстве.

При необходимости определения характеристик партии микросхем в целом используется метод комплексного параметрического анализа. Для его применения необходимо «нормирование» исходных данных, то есть преобразование тестовых замеров к общему безразмерному виду, с сохранением при этом объективной информативности результатов испытаний [3].

Опыт применения такого подхода для анализа однородности партий ЭКБ изложен в [4–5].

Параметры плотности распределения тестовых характеристик партий микросхем

№	Партия микросхем	$R_{cp}$	$D(R)$	$\sigma(R)$
1	140УД25АС1ВК – 54 шт.	0,934	1,020	1,010
2	140УД26АС1ВК – 70 шт.	0,833	0,845	0,919
3	140УД25АС1ВК – 60 шт.	0,845	0,845	0,919
4	140УД25АС1ВК – 19 шт.	0,834	0,939	0,969
5	<b>140УД25АС1ВК – 21 шт.</b>	<b>1,557</b>	<b>3,102</b>	<b>1,761</b>

Нормирование МРИ (формирование матрицы НМРИ) производится по следующему алгоритму: для каждого теста с номером  $j$  ( $j = 1, N_{\text{тест}}$ ) определяется  $T_{cp}(j) = (\sum_{i=1}^{N_{mc}} \text{МРИ}(i, j)) / N_{mc}$ ; формируются НМРИ:  $\text{НМРИ}(i, j) = (\text{МРИ}(i, j) - T_{cp}(j)) / \text{ДН}(j)$  ( $i = 1, N_{mc}$ ;  $j = 1, N_{\text{тест}}$ ), где ДН – заданный вектор размерности  $N_{\text{тест}}$  диапазонов нормирования МРИ.

Для определения параметров плотности распределения тестовых характеристик:

– определим центр партии микросхем – вектор  $R_c$ :

$R_c = (\sum_{i=1}^{N_{mc}} \text{НВРИ}(i)) / N_{mc}$ , где вектор НВРИ( $i$ ) –  $i$ -я строка матрицы НМРИ ( $i = 1, N_{mc}$ );

– рассчитаем  $R(i)$  – расстояние до центра партии  $R_c$ :  $R(i) = |\text{НВРИ}(i) - R_c|$  ( $i = 1, N_{mc}$ ), здесь  $|\cdot|$  – норма (длина) вектора, определяемая в соответствии с выбранной метрикой.

Введем параметры плотности распределения тестовых характеристик  $R_{cp} = (\sum_{i=1}^{N_{mc}} R(i)) / N_{mc}$  – среднее расстояние между микросхемой и центром партии,  $D(R) = (\sum_{i=1}^{N_{mc}} R(i)^2) / N_{mc}$  – дисперсия параметров  $R(i)$  ( $i = 1, N_{mc}$ ),  $\sigma(R) = \sqrt{D(R)}$  – среднеквадратическое (стандартное) отклонение параметров  $R(i)$  ( $i = 1, N_{mc}$ ).

Для проведения испытаний из двух партий микросхем 140УД25АС1ВК (партия А и Б) была сформирована тестовая выборка (ТВ): партия А – 11 шт., партия Б – 10 шт.

В процессе испытаний осуществлялось облучение ТВ микросхем на испытательном гамма-комплексе, временной (24 часа при +25 °С) и термический (168 часов, +100 °С) отжиг.

В процессе облучения одна часть микросхем (по 7 штук от каждой партии А и Б) находилась в «активном» режиме – была подключена к источнику питания, другая часть (по 3 микросхемы от каждой партии) – в «пассивном» режиме (не подключена к источнику питания).

На этапах временного и термического отжигов 3 микросхемы (две из партии А и одна из партии Б) из «пассивного» режима были переведены в «активный». Результаты испытаний:

1) «пассивные» микросхемы ТВ показали худшую устойчивость к воздействию ИИ КП вне зависимости от принадлежности к партии А или Б;

2) у всех трех «пассивных» микросхем ТВ, принадлежащих партии А, в процессе воздействия ИИ был зафиксирован выход тестовых параметров за границу допуска;

3) микросхемы ТВ, принадлежащие партии Б в меньшей степени подвержены воздействию ИИ КП, нежели микросхемы партии А;

4) микросхемы ТВ, находящиеся в процессе воздействия ИИ в «пассивном» режиме и на этапе отжига переключенные в «активный» режим, в отличие от оставшихся в «пассивном» режиме микросхем, продемонстрировали уверенное восстановление своих характеристик.

Выводы по результатам испытаний:

1. Наземные испытания на дозовые эффекты ИИ КП для микросхем должны проводиться для образцов как в «активном», так и в «пассивном» режиме.

2. Резервные комплекты электроники РЭА должны периодически включаться в «активный» режим с целью «разгрузки» накопленных дозовых эффектов ИИ КП.

В распоряжении авторов имелись так же результаты испытаний на дозовые эффекты ИИ КП ТВ других партий микросхем в активном режиме: двух – 140УД25АС1ВК и одной – 140УД26АС1ВК. Результаты испытаний этих ТВ положительные: все микросхемы ТВ продемонстрировали хорошую устойчивость к воздействию ИИ КП.

По имеющимся результатам испытаний ТВ пяти партий микросхем проведены исследования по определению признаков, отличающих партию А, ТВ которой испытаний на устойчивость к ИИ КП не прошли, от партий микросхем, ТВ которых успешно прошли испытания. Раздельный параметрический анализ результатов не дал: все параметры микросхем партии А по отдельности лежат внутри диапазонов разброса других партий. Результаты же комплексного параметрического анализа (см. таблицу) выявили явную закономерность: партия А имеет значительно больший разброс характеристик, нежели другие партии микросхем, что подтверждается параметрами плотности распределения характеристик  $R_{cp}$ ,  $D(R)$  и  $\sigma(R)$ .

Таким образом, можно сделать вывод о том, что плотность распределения тестовых характеристик может являться признаком определения «потенциально ненадежной», в смысле плохой устойчивости к ИИ КП, партии микросхем.

#### Библиографические ссылки

1. Орлов В. И., Федосов В. В. Качество электронной компонентной базы – залог длительной работоспособности космических аппаратов // Решетневские чтения : материалы Междунар. науч. конф. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск 2013. Т. 1, № 17. С. 238–241.

2. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / под науч. ред. докт. техн. наук, проф. Г. Г. Райкунова. М. : Физматлит, 2013. С. 103–167.

3. Федосов В. В., Казаковцев Л. А., Масич И. С. Метод нормировки исходных данных испытаний электрорадиоизделий космического применения для алгоритмов автоматической группировки // Системы управления и информационные технологии. 2016. Т. 65, № 3. С. 92–96.

4. Разработка алгоритмического обеспечения анализа однородности партий электрорадиоизделий для комплектации радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов / Л. А. Казаковцев [и др.] ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 107–116.

5. Алгоритмическое обеспечение поддержки принятия решений по отбору изделий микроэлектроники для космического приборостроения / В. И. Орлов [и др.] // СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2017. С. 183–203.

### References

1. Orlov V. I., Fedosov V. V. [Quality of electronic components – space long term performance of space vehicles] // *Materialy Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"*. Krasnoyarsk, 2013. Vol. 1, No. 17. P. 238–241 (In Russ.).

2. Raikunov G. G. (Ed.). [Ionizing radiation of outer space and their impact on the spaceborne apparatus of space vehicles]. Moscow, Fizmatlit, 2013. P. 103–167. (In Russ.)

3. Fedosov V. V., Kazakovtsev L. A., Masich I. S. [Method of normalization of the initial data testing of electronic components for space application of algorithms for automatic group]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. 2016. Vol. 65, iss. 3. P. 92–96. (In Russ.)

4. Kazakovtsev L. A. [et al.] [Development of algorithmic support for the homogeneity analysis of production batches of electronic components for the spacecraft electronic equipment assembly]. Krasnoyarsk, Siberian State Aerospace University. 2016. P. 107–116. (In Russ.)

5. Orlov V. I. [et al.] [Algorithmic support of decision support for the selection of microelectronics products for space instrument manufacture]. Krasnoyarsk, SibGU im. M. F. Reshetneva. 2017. P. 183–203. (In Russ.)

© Орлов В. И., Федосов В. В., Белов С. А.,  
Голованов С. М., 2018



УДК 621.37

## НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ МОДУЛЕЙ ПИТАНИЯ АО «ГК «ЭЛЕКТРОНИНВЕСТ»

Е. М. Полянский<sup>1</sup>, П. О. Бономорский<sup>1</sup>, Д. С. Тусков<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>АО «Группа Компаний «Электронинвест»  
Российская Федерация, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, 4922-й проезд, дом 4, строение 2  
E-mail: \*tds-81@mail.ru

*Герметичные радиационно-стойкие, в том числе к воздействию тяжелых заряженных частиц, модули питания производства АО «ГК «Электронинвест» для бортовой аппаратуры космических аппаратов.*

*Ключевые слова: источник вторичного электропитания, модуль питания, радиационно-стойкий, герметичный, космические аппараты.*

## NEWEST RADIATION TOLERANT SPACE DC-DC CONVERTERS FROM JSC "ELECTRONINVEST GROUP"

E. M. Poliansky<sup>1</sup>, P. O. Bonomorsky<sup>1</sup>, D. S. Tuskov<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>JSC "Electroninvest Group"  
4/2, 4922<sup>nd</sup> Str., Zelenograd, Moscow, 124460, Russian Federation  
E-mail: \*tds-81@mail.ru

*Hermetically sealed radiation tolerant DC-DC converters for space applications with improved SEE LET performance from JSC "Electroninvest Group".*

*Keywords: SMPS, DC-DC converter, radiation tolerant, hermetically sealed, space purpose.*

Группа компаний «Электронинвест» специализируется на разработке и серийном производстве полного ряда функциональных устройств в модульном исполнении для систем электропитания специального назначения, в том числе для бортовой аппаратуры космических аппаратов группы 5.3. Одним из направлений деятельности являются герметичные радиационно-стойкие, в том числе к воздействию тяжелых заряженных частиц, модули питания категории качества «ВП», позволяющие создавать системы вторичного электропитания с самыми высокими показателями надежности, качества, стабильности технических характеристик в любых условиях эксплуатации. Вся продукция изготавливается только на отечественной элементной базе.

На данный момент всю номенклатуру радиационно-стойких модулей питания можно разделить на несколько направлений:

- серийно выпускаемые модули питания;
- модули питания, разработанные в рамках, завершающихся в 2018 г. ОКР;

– модули питания, разрабатываемые в рамках задельных работ.

**Серийные** одноканальные модули питания серии СПНС выпускаются с входным напряжением 27 (17-36) В, выходными мощностями 3, 5, 10, 15, 25, 50, 100 Вт и диапазоном выходных напряжений 3,3, 5, 6, 9, 12, 15, 27, 30 В, также в ряду есть двухканальное исполнение 15 Вт модуля питания с выходным напряжением  $\pm 15$  В.

Модули питания соответствуют группе унифицированного исполнения 4У ГОСТ РВ 20.39.414.1-97.

Модули питания имеют все стандартные сервисные функции – гальваническую развязку входных цепей от выходных и всех цепей от корпуса, защиту от короткого замыкания, защиту от перегрузки по току, дистанционное выключение по входу, наличие выносной обратной связи, регулировку выходного напряжения, работу в режиме «холостого хода» без «подгрузки».

Модули питания выпускаются в двух исполнениях (обычное и «Ч») и обеспечивают стойкость к воздействию специальных факторов, указанную в таблице.

### Исходные данные

Воздействующий фактор	Обычное исполнение	Исполнение «Ч»
7.К <sub>1</sub> , 7.К <sub>4</sub>	1К	2К
7.С <sub>1</sub>	14,3x5У <sub>с</sub>	73,6x5У <sub>с</sub>
7.С <sub>4</sub>	5,3x5У <sub>с</sub>	10x5У <sub>с</sub>
7.К <sub>11</sub> , 7.К <sub>12</sub>	не менее 40 МэВ·см <sup>2</sup> /мг	не менее 60 МэВ·см <sup>2</sup> /мг

**Разработанные** в рамках завершаемых в 2018 году ОКР модули питания:

– *двухканальные модули питания серии СПНС* с входным напряжением 27 (16–36) В и суммарной выходной мощностью 3, 5, 6, 10, 15, 25, 30 Вт.

Ряд стандартных выходных двухполярных напряжений  $\pm 5, \pm 6, \pm 12, \pm 15$ ;

Ряд стандартных гальванически развязанных напряжений (3,3, 5), (5, 5), (9, 9), (12, 12), (15, 15), (9, 12), (5, 12), (5, 15) В.

Модули питания обеспечивают стойкость к воздействию специальных факторов, указанную в таблице (исполнение «Ч»).

– *одно-, двух- и трехканальные модули питания серии СПНС* с номинальным входным напряжением 100 (80-120) В и выходной мощностью от 5 Вт до 100 Вт.

Ряд выходных мощностей одноканальных модулей питания 5, 10, 15, 25, 50, 100 Вт (выходные напряжения 3,3, 5, 6, 9, 12, 15, 27, 50 В);

Ряд выходных мощностей двухканальных модулей питания 5, 15 Вт (выходные напряжения  $\pm 5, \pm 15$  В);

Суммарная выходная мощность трехканальных модулей 15 Вт (выходные напряжения 5,  $\pm 15$  В).

Модули питания обеспечивают стойкость к воздействию специальных факторов, указанную в таблице 1 (исполнение «Ч»);

– *импортозамещающие одно- и двухканальные модули питания серии СПНИ* с входным напряжением 27 В и суммарной выходной мощностью от 5 Вт до 100 Вт.

Модули питания с выходной мощностью до 5 Вт (аналоги серий SMSA (фирма Interpoint), SVSA (фирма VPT)).

Диапазон входного напряжения 16 – 40 В;

Ряд стандартных выходных напряжений одноканальных модулей питания 3,3, 5, 9, 12, 15В;

Ряд стандартных выходных напряжений двухканальных модулей питания  $\pm 5, \pm 12, \pm 15$ В;

Модули питания с выходной мощностью до 15 Вт (аналоги серий SMSA (фирма Interpoint), SVSA (фирма VPT)).

Диапазон входного напряжения 16 – 45 В;

Ряд стандартных выходных напряжений одноканальных модулей питания 2,5, 3,3, 5, 12, 15В;

Ряд стандартных выходных напряжений двухканальных модулей питания  $\pm 5, \pm 12, \pm 15$ В;

Модули питания с выходной мощностью до 30 Вт (аналоги серий SMTR (фирма Interpoint), SVTR(фирма VPT)).

Диапазон входного напряжения 16 – 40 В;

Ряд стандартных выходных напряжений одноканальных модулей питания 3,3, 5, 12, 15В;

Ряд стандартных выходных напряжений двухканальных модулей питания  $\pm 5, \pm 12, \pm 15$ В;

Модули питания с выходной мощностью до 35 Вт (аналоги серий SMTR (фирма Interpoint), SVTR(фирма VPT)).

Диапазон входного напряжения 19–56 В;

Ряд стандартных выходных напряжений одноканальных модулей питания 3,3, 5, 9, 12, 15 В;

Ряд стандартных выходных напряжений двухканальных (каналы гальванически развязаны) модулей питания 5;5, 12;12, 15;15 В;

Модули питания являются стойкими к воздействию специальных факторов со значениями характеристик:

– 7.К<sub>1</sub>, 7.К<sub>4</sub> соответствующими группе унифицированного исполнения 1,44х1К;

– 7.С<sub>1</sub> соответствующей группе унифицированного исполнения 8,38х5У<sub>с</sub>;

– 7.С<sub>4</sub> соответствующей группе унифицированного исполнения 1,93х5У<sub>с</sub>.

Пороговое значение линейных потерь энергии (ЛПЭ) тяжелых заряженных частиц в результате одиночного радиационного эффекта (ОРЭ): SET (одиночный эффект переходной ионизационной реакции Single Event Transient), SEL (одиночный тиристорный Single Event Latshup), SEFI (однократный сбой Single Event Functional Interrupt) – не менее 68 МэВ·см<sup>2</sup>/мг во всем диапазоне входных напряжений,  $I_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{ВЫХ ном}}$  на каждый канал при температуре корпуса до 85 °С.

КО (катастрофический отказ) – не менее 60 МэВ·см<sup>2</sup>/мг в номинальном режиме работы ( $U_{\text{ВХ}} = 27$  В,  $I_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{ВЫХ ном}}$  на каждый канал, НКУ);

КО (катастрофический отказ) – не менее 40 МэВ·см<sup>2</sup>/мг при ( $U_{\text{ВХ}}$  от 27 до 33 В,  $I_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{ВЫХ ном}}$  на каждый канал, НКУ).

**Разрабатываемые** в настоящее время модули питания:

– модули питания с выходной мощностью 30 и 500 Вт для аппаратуры МОС-ПП с напряжением борсети 27 В и 100 В.

Модуль ИВЭП500 предназначен для формирования мощной промежуточной шины электропитания с номинальным значением напряжения 27 В. Данный модуль подключается к бортовой сети со значением питающего напряжения 100 В.

Модуль ИВЭП30 предназначен для формирования шести каналов питающих напряжений 1,8 В 1,8 В; 2,5 В; 3,3 В и  $\pm 5$  В для питания функциональных узлов БА.

**К заделным работам** относятся:

– разработка импортозамещающих одно- и двухканальных модулей питания, идентичных сериям DVCH, MCH (MGH), SLH фирм VPT, Interpoint с суммарной выходной мощностью до 1,5 Вт.

© Полянский Е. М., Бономорский П. О., Тусков Д. С., 2018

УДК 519.6

## ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ С ОСОБЫМИ ТРЕБОВАНИЯМИ КАЧЕСТВА С ПРИМЕНЕНИЕМ АНСАМБЛЕЙ АЛГОРИТМОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

И. П. Рожнов, В. И. Орлов, Л. А. Казаковцев

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

*Рассмотрен алгоритм составления оптимального (по точности результата на заданном наборе задач) ансамбля алгоритмов кластеризации для обеспечения качества электронно-компонентной базы (ЭКБ), устанавливаемой в лётные образцы космических аппаратов.*

*Ключевые слова: алгоритмы кластеризации, ансамбли алгоритмов, генетический алгоритм.*

## FORMATION OF ELECTRONIC COMPONENT BASE WITH SPECIAL QUALITY REQUIREMENTS WITH THE USE OF CLUSTERING ALGORITHMS

I. P. Rozhnov, V. I. Orlov, L. A. Kazakovtsev

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

*We consider an algorithm for compiling an ensemble of clustering algorithms to ensure the quality of the electronic component base (ECB), which is installed in spacecrafts (in terms of the accuracy of the result on a given set of problems).*

*Keywords: clustering algorithms, ensembles of algorithms, genetic algorithm.*

Комплектация бортовой аппаратуры космического аппарата высоконадёжными электронными компонентами является одной из основных задач современной космической отрасли. В рамках решения этой задачи необходимо обеспечить закупку ЭКБ у проверенных поставщиков, а также проведение входного контроля, дополнительных отбраковочных испытаний и разрушающего физического анализа ЭКБ [1].

Для интеллектуального анализа данных, включая задачи автоматической группировки, предложено множество статистических и иных методов, но по-прежнему важной задачей остаётся разработка технологии (метода), подходящей для решения максимально широкого круга задач кластеризации. Например, после проведённых многократных исследований, применение ансамблей алгоритмов кластеризации позволяет сделать вывод об их сравнительной эффективности для решения широкого круга задач. Но тогда возникает вопрос о методе формирования ансамбля. Как показывает практика, формирование эффективных ансамблей сопряжено с трудностями, так как выбор для формирования ансамбля алгоритмов, демонстрирующих лучшие результаты, не всегда приводит к формированию ансамбля дающего наилучшую точность [2–3].

В ансамблевом подходе для каждого полученного отдельными алгоритмами разбиения объектов на группы составляется предварительная бинарная матрица различий размера  $n \times n$  (где  $n$  – количество объектов):

$$H_i = \langle h_i(i, j) \rangle,$$

где  $h_i(i, j)$  равен нулю, если элемент  $i$  и элемент  $j$  попали в один кластер, и 1, если нет.

Следующим шагом в составлении ансамбля алгоритмов кластеризации является составление согласованной матрицы бинарных разбиений.

$$H = (h(i, j)), \quad h(i, j) = \sum w_i h_i(i, j),$$

где  $w_i$  – вес алгоритма. Мы принимаем вес, равный усредненной точности алгоритма, примененного на тестовых задачах.

Генетическое программирование показало высокую эффективность при построении ансамблей нейронных сетей применяемых, в том числе, для решения задач кластеризации. Мы применили генетический алгоритм метода жадных эвристик для формирования ансамбля произвольных алгоритмов.

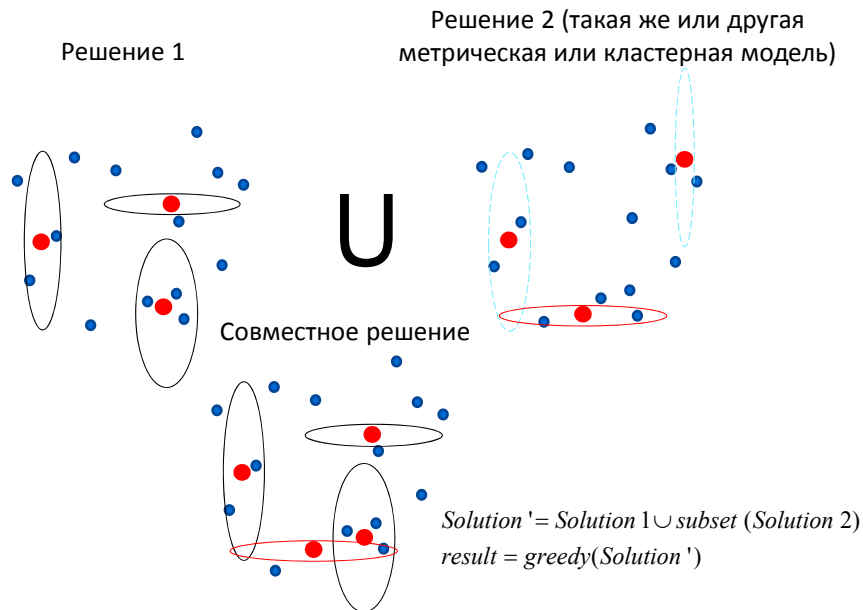
Точность отдельных алгоритмов кластеризации и их ансамблей можно оценить по имеющейся размеченной выборке – то есть требуется выборка, в которой принадлежность объектов к фактическим группам известна заранее.

Точность алгоритмов и их ансамблей будем оценивать следующим образом:

$$Fit^1 = A / N \rightarrow \max,$$

где  $A$  – количество правильно кластеризованных объектов;  $N$  – общее количество объектов.

Алгоритм формирования ансамбля алгоритмов кластеризации изложен авторами в [2–3].



Принцип объединения множеств родительских решений

По результатам наших вычислительных экспериментов видно, что любые алгоритмы кластеризации для задачи разделения сборной партии электрорадиоизделий на две однородные партии показывают довольно высокую точность. При увеличении числа однородных производственных партий в сборной партии точность падает. При этом для разных наборов данных наилучшие результаты демонстрируются разными алгоритмами.

В любом случае, применение нескольких моделей кластеризации полезно: если одна из моделей относит два элемента к одной и той же группе, а другая относит их к различным группам, то в условиях космического производства дешевле отнести их к спорным элементам и на всякий случай исключить из производственного цикла, чем испытывать последствия сбоев на орбите.

Дальнейшим развитием идеи применения ансамблевого подхода является решение нескольких проблем, основанных на разных моделях кластеризации, в одной популяции генетического алгоритма с жадной агломеративной эвристикой [4–5].

Идея наших генетических алгоритмов состоит в объединении пар решений, каждый из которых представляет собой набор центров или центроидов кластеров. В результате мы получаем промежуточное неосуществимое решение с избыточным числом центров.

Дополнительные центры затем последовательно исключаются с помощью жадной агломерационной процедуры (см. рисунок).

В наших работах показано, что можно эффективно комбинировать решения, содержащие различное количество центроидов, то есть решения различных задач кластеризации, которые различаются по количеству кластеров.

Еще одна идея заключалась в объединении наборов центров или центроидов с различными измере-

ниями расстояния. Полученный результат рассматривается как набор центров или центроидов с одной из дистанционных мер, участвующих в объединении, и мы используем жадную процедуру агломерации, последовательно уменьшая число центров.

Таким образом, в одной популяции генетического алгоритма мы можем одновременно получать решения на основе разных моделей кластеризации, а затем либо составлять лучшие из ансамблевых решений, либо отбрасывать противоречивые элементы.

По данной идее сейчас идут вычислительные эксперименты, получены лишь самые первые результаты, но результаты являются многообещающими.

#### Библиографические ссылки

1. Лукьяненко М. В., Чурляева Н. П., Федосов В. В. Надежность изделий электронной техники в аппаратуре космических аппаратов : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. 188 с.
2. Составление оптимальных ансамблей алгоритмов кластеризации / И. П. Рожнов и др. // Системы управления и информационные технологии. 2018. № 2 (72). С. 31–35.
3. Rozhnov I., Kazakovtsev L., Orlov V. Ensembles of clustering algorithms for problem of detection of homogeneous production batches of semiconductor devices // CEUR-WS. 2018. Vol. 2098. P. 338–348.
4. Hansen P., Mladenovic N. Variable Neighborhood Search // Search Methodology / E. K. Bruke, G. Kendall [eds.]. Springer US. 2005. P. 211–238. Doi: 10.1007/0-387-28356-0\_8.
5. Казаковцев Л. А., Ступина А. А., Орлов В. И. Модификация генетического алгоритма с жадной эвристикой для непрерывных задач размещения и классификации // Системы управления и информационные технологии. 2014. Вып. 2 (56). С. 35–39.

### References

1. Lukyanenko M. V., Churlyayeva N. P., Fedosov V. V. Reliability of electronic products in spacecraft equipment : training allowance / Sib. state. aerospace. un-t. Krasnoyarsk, 2016. 188 p.
2. Composing the optimal ensembles of clustering algorithms / I. P. Rozhnov [et al.] // Control Systems and Information Technology. 2018. Vol. 2 (72). P. 31–35. (In Russ.)
3. Rozhnov I., Kazakovtsev L., Orlov V. Ensembles of clustering algorithms for problem of detection of homogeneous production batches of semiconductor devices // CEUR-WS. 2018. Vol. 2098. P. 338–348.
4. Hansen P., Mladenovic N. Variable Neighborhood Search // Search Methodology / E. K. Bruke, G. Kendall [eds.]. Springer US. 2005. P. 211–238, Doi: 10.1007/0-387-28356-0\_8.
5. Kazakovtsev L. A., Stupina A. A., Orlov V. I. Modification of the genetic algorithm with greedy heuristics for continuous problems of allocation and classification // Control Systems and Information Technology. 2014. Iss. 2 (56). P. 35–39. (In Russ.)

© Рожнов И. П., Орлов В. И., Казаковцев Л. А., 2018



**Секция**  
**«КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЯ**  
**РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ»**

УДК 629.786.2.015.4

## О СПОСОБЕ ПРОВЕДЕНИЯ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ РКТ НА ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОПРОВО-ПРУЖИННОГО СТЕНДА

А. Ю. Бондаренко, А. Ю. Митин, В. А. Толченев, А. Н. Эйхорн, О. А. Юранев

Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»  
Российская Федерация, 141070, Московская обл., г. Королев, ул. Пионерская, 4  
E-mail: EykhornAN@tsniimash.ru

*Описывается подход к проведению исследовательских испытаний коприво-пружинного стенда, служащего для воспроизведения инерционных нагрузок импульсного характера. Приводятся результаты валидации расчетной модели стенда по результатам испытаний.*

*Ключевые слова: коприво-пружинный стенд, испытания, переходные процессы.*

## AN APPROACH TO GROUND TESTING OF ROCKETS AND SPACE VEHICLES ON TRANSIENT PROCESSES BY COPRA-SPRING STAND

A. Yu. Bondarenko, A. Yu. Mitin, V. A. Tolchenov, A. N. Eykhorn, O. A. Yuranev

Federal State Unitary Enterprise TsNIIMash  
4, Pionerskaya Str., Korolev, 141070, Russian Federation  
E-mail: EykhornAN@tsniimash.ru

*Authors propose an approach to research tests of copra-spring stand, designed for testing rockets and spacecraft on inertial forces of a pulse character. Authors present the results of validation of finite-element model of the stand, based on a test data.*

*Keywords: copra-spring stand, ground tests, transient processes.*

Опыт летной эксплуатации космических аппаратов и других изделий ракетно-космической техники показывает, что наиболее интенсивное динамическое нагружение конструкции в частотном диапазоне до 100 Гц реализуется при переходных процессах, возникающих при старте и разделении ступеней ракет-носителей, при стыковках модулей орбитальных станций, в результате действия ветровых порывов и при нештатных ситуациях.

Общепринятым способом наземной экспериментальной отработки на динамические воздействия подобного рода является замена нестационарного процесса на эквивалентное гармоническое нагружение с помощью вибростенда [1; 2]. При таких испытаниях возможно получение существенных отличий по максимальным уровням перегрузок, а количество циклов нагружения с максимальным уровнем в десятки раз превышает реальное. Это оказывается особенно важным в случае, когда ставится вопрос о необходимости проведения динамических испытаний изделий РКТ, уже побывавших в летной эксплуатации.

В связи с чем предлагается разработать альтернативный подход к проведению наземной отработки изделий РКТ на воздействия подобного рода, суть которого заключается в непосредственном воспроизведении переходных процессов.

Для этого может быть использован коприво-пружинный стенд (рис. 1), установленный в испытательном зале отдела температурно-статической проч-

ности ФГУП ЦНИИмаш [3]. Стенд состоит из двух основных частей: подвижной и неподвижной, которые перемещаются друг относительно друга в вертикальном направлении. На рис. 1 подвижная часть изображена в теплых тонах и включает в себя обечайку, амортизаторы и кольцо нижнее. Неподвижная часть изображена в холодных тонах, включает в себя кольцо силовое, направляющие опоры, кольцо верхнее и спецзамки. Неподвижная часть закреплена к полу. На подвижную часть крепится объект испытания (ОИ), после чего подвижная часть вместе с ОИ поднимается на определенную высоту и сбрасывается вниз. При соприкосновении нижнее кольцо подвижной части фиксируется спецзамками с неподвижной частью, объединяя их в единое целое. Нагружение происходит в процессе торможения ОИ на основании с пружинами сжатия.

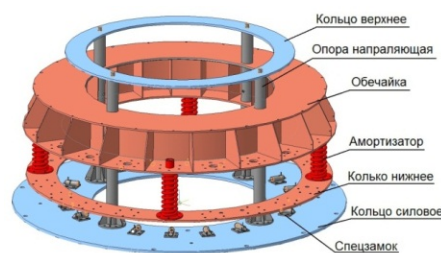


Рис. 1. Общий вид основных исполнительных элементов коприво-пружинного стенда

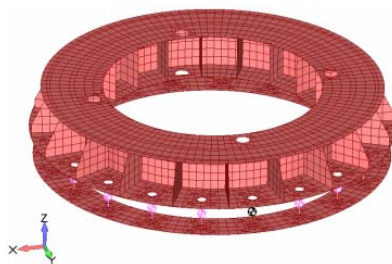


Рис. 2. Конечно-элементная модель подвижной части копрово-пружинного стенда

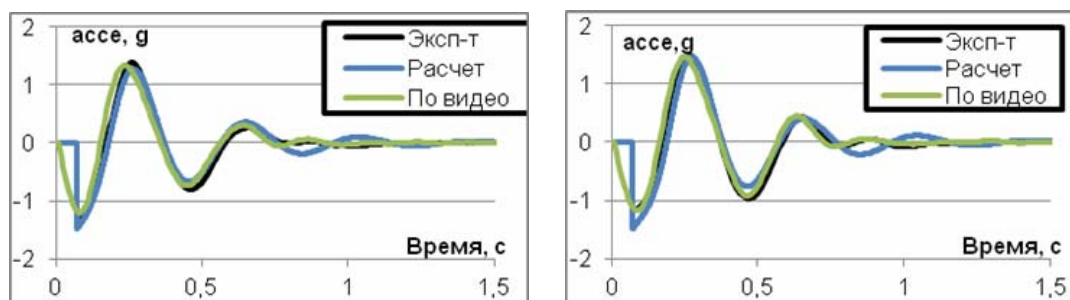


Рис. 3. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных перегрузок, в том числе полученных по результатам обработки видеозаписей, при сбросе с высоты 35 мм (слева) и 50 мм (справа)

Частота колебаний ОИ определяется количеством используемых пружин и их жёсткостью, а уровень перегрузок – высотой сброса. Стенд позволяет проводить нагружение объектов типа модулей МКС, перспективных долговременных орбитальных станций, элементов перспективных РН, многоразовых космических и авиационно-космических систем, перспективных пилотируемых и транспортных кораблей массой до 20 т. Существуют стенды, воспроизводящие динамические нагрузки более легких ОИ [4]. Еще одной отличительной чертой данного стенда является также то, что при проведении испытаний имеется возможность создавать нагружение внутренним пневматическим давлением. Это возможно благодаря размещению стенда в защищенном пневмогидробоксе [5].

Исследовательские испытания копрово-пружинного стенда проводились без объекта испытаний, высоты сброса были равны 20, 35 и 50 мм (проводилось по три сброса с каждой высоты). Определялись уровни осевых и поперечных перегрузок на обечайке стенда. По результатам исследовательских испытаний была разработана и валидирована конечноэлементная модель стенда (рис. 2).

Конструкция копрово-пружинного стенда представляет собой пространственную механическую систему сложной конструктивно-компоновочной схемы, отдельные части которой обладают существенно различными упругими и диссипативными характеристиками. Для проведения расчетов использовался метод конечных элементов. Расчеты проводились нелинейной постановке, позволяющей корректно учесть нагружение стенда на всех этапах, с использованием метода прямого интегрирования уравнений движения.

Наряду с показаниями датчиков перегрузок при анализе результатов была проведена оценка уровней перегрузок по видеозаписям перемещений обечайки стенда.

На рис. 3 приведено сравнение экспериментальных данных по перегрузкам, в том числе полученных по видеозаписям, и расчетных перегрузок.

Таким образом, по результатам проведенных исследовательских испытаний удалось достичь хорошего согласования между расчетными и экспериментальными данными по перегрузкам на основной частоте продольных колебаний стенда.

#### Библиографические ссылки

1. Основы отработки прочности ракетно-космических конструкций / А. В. Кармишин, А. И. Лиходед, Н. Г. Паничкин и др. М. : Машиностроение, 2007. С. 470; 471.
2. Беляев И. Т., Зернов И. А. Технология сборки и испытаний космических аппаратов. М. : Машиностроение, 1990. С. 133–137.
3. Колозезный А. Э. Задачи прочностных испытательных центров в эпоху численного моделирования. Ч. 1 // Космонавтика и ракетостроение. 2014. Вып. 4 (77). С. 164–170.
4. Нестационарная аэроупругость тонкостенных конструкций / А. В. Кармишин, Э. Д. Скурлатов, В. Г. Старцев и др. М. : Машиностроение, 1982. С. 132; 133.
5. Копрово-пружинный стенд для нагружения космических аппаратов инерционными силами импульсного характера / С. С. Александров, А. Ю. Бондаренко, А. Н. Эйхорн и др. // Космонавтика и ракетостроение. 2017. Вып. 4 (97). С. 65–70.



### References

1. Karmishin A. V., Likhoded A. I., Panichkin N. G. *Osnovy obrabotki prochnosti raketno-kosmicheskikh konstruksiy* [The principles of stress support of space-rocket designs]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. P. 470; 471.
2. Belyayev I. T., Zernov I. A. *Tekhnologiya sborki i ispytaniy kosmicheskikh apparatov* [Assembly and tests of space vehicles]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. P. 133–137.
3. Kolozeznyy A. E. *Zadachi prochnostnykh ispytatel'nykh tsentrov v epokhu chislennogo modelirovaniya. CHast' I* [Tasks of strength tests centers in the field of finite-element modelling. Part 1]. *Kosmonavtika i raketostroyeniye*. 2014. No. 4 (77). P. 164–170. (In Russ.)
4. *Nestatsionarnaya aerouprugost' tonkostennykh konstruksiy* [Nonlinear aeroelasticity of thin-walled structures] / A. V. Karmishin, E. D. Skurlatov, V. G. Startsev [et al.]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. P. 132; 133.
5. [Copro-spring stand for loading of spacecraft inertial forces of a pulse character] / S. S. Aleksandrov, A. Yu. Bondarenko, A. N. Eykhorn [et al.] // *Kosmonavtika i raketostroyeniye*. 2017. No. 4 (97). P. 65–70. (In Russ.)

© Бондаренко А. Ю., Митин А. Ю., Толченков В. А.,  
Эйхорн А. Н., Юранев О. А., 2018

УДК 621.321

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ В ИМИТАТОРЕ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Г. В. Двирный<sup>1</sup>, А. А. Шевчук<sup>1,2\*</sup>, В. В. Двирный<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

\*E-mail: expert-zh24@yandex.ru

*Предложена схема имитатора солнечного излучения на основе светодиодных источников для наземной отработки космических аппаратов, с лучшими, по сравнению с традиционными имитаторами на основе газоразрядных ксеноновых ламп воздушного охлаждения, эксплуатационными и техническими характеристиками.*

*Ключевые слова: наземная отработка космических аппаратов, термовакуумные испытания, имитатор солнечного излучения, светоизлучающий диод.*

## POSSIBILITY OF LED-BASED SOURCES APPLICATION IN SOLAR SIMULATOR FOR SPACECRAFTS GROUND TESTING

G. V. Dvirniy<sup>1</sup>, A. A. Shevchuk<sup>1,2\*</sup>, V. V. Dvirniy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian Federal University  
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

\*E-mail: expert-zh24@yandex.ru

*We propose a scheme of a solar simulator based on LED sources for ground testing of spacecrafts with better operational and technical characteristics than traditional solar simulators based on air-cooled gas-discharge xenon lamps.*

*Keywords: ground testing of spacecrafts, thermal vacuum testing, solar simulator, light emitting diode.*

**Введение.** Одним из базовых и наиболее сложных элементов испытательного оборудования, применяемого при комплексных термовакуумных испытаниях космических аппаратов (КА), является имитатор солнечного излучения (ИСИ).

Растущий уровень технического исполнения КА и новые стандарты, в частности, действующий с 2017 г. ГОСТ Р МЭК 60904–9 [1], идентичный международному стандарту IEC 60904–9, означают новые требования к точности испытательного оборудования, что говорит о необходимости совершенствования характеристик вновь создаваемых отечественных ИСИ.

**Сравнительный анализ.** Можно выделить два основных направления в создании ИСИ:

– первое, на основе традиционных источников – ламп накаливания и газоразрядных ксеноновых ламп, спектр последних наиболее точно соответствует солнечному спектру;

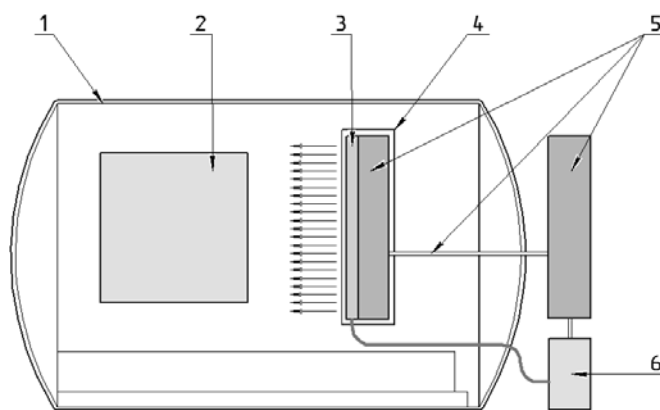
– второе, более современное и динамично развивающееся – на основе светодиодных источников. В последнее время за рубежом активно ведутся разработки светодиодных ИСИ наземного спектра и созданы первые серийные образцы, в том числе класса ААА, с удельной световой мощностью до  $1\ 200\ \text{Вт/м}^2$ , что вплотную приближается к значению солнечной постоянной за пределами атмосферферы  $1\ 321...1\ 412\ \text{Вт/м}^2$ ,

с достаточной спектральной точностью и однородностью светового потока и размером светового поля до  $2 \times 1,2\ \text{м}$  [2].

Практически все существующие крупногабаритные ИСИ для термовакуумных испытаний КА, в том числе два крупногабаритных ИСИ, действующие в АО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева», построены по принципу суммирования излучения массивов охлаждаемых воздухом газоразрядных ксеноновых ламп. Их отличительной особенностью является расположение световых источников за пределами термовакуумной камеры. Известно, что расположение ИСИ внутри камеры более рационально [3], но трудно выполнимо в случае использования газоразрядных ксеноновых ламп. Кроме этого, традиционным ИСИ присущ ряд других характерных недостатков, в частности:

– низкий КПД, как правило, около 10 % [4], что обусловлено как низкой эффективностью газоразрядных ксеноновых ламп, так и высокими потерями в сложной оптической системе;

– значительная масса, габариты и неудобство монтажа основных компонентов ИСИ, необходимость сложной, трудоемкой настройки и юстировки всех элементов оптической системы, состоящей из большого числа элементов;



Компоновка ИСИ внутри термовакуумной камеры:  
 1 – термовакуумная камера; 2 – объект испытаний; 3 – источник света на основе светодиодной матрицы; 4 – термоизолирующий корпус; 5 – компоненты системы охлаждения; 6 – вторичные источники питания светодиодной матрицы

– высокая нагруженность и усиленный нагрев оптических вводов в термовакуумную камеру, где на малой площади сосредоточен световой поток высокой интенсивности;

– малый срок службы и высокая стоимость газоразрядных ксеноновых ламп.

Анализ показывает, что для термовакуумных испытаний КА по ряду причин может быть предпочтительнее ИСИ на основе светодиодных источников [5]. В этом случае можно сформировать квазипараллельный световой поток при помощи светодиодной матрицы с распределенными параметрами, размеры излучающей поверхности которой близки к требуемым размерам светового поля. Излучатель при этом возможно разместить наиболее логичным и выгодным способом – внутри термовакуумной камеры в непосредственной близости к объекту испытаний, в виде одного или нескольких компактных модулей с небольшой массой и приемлемыми габаритами (см. рисунок):

Среди других очевидных преимуществ предлагаемого ИСИ можно отметить:

– в несколько раз большие, по сравнению с газоразрядными ксеноновыми лампами, энергоэффективность, ресурс и временную стабильность светодиодов;

– возможность точной настройки в максимально широких пределах спектра и интенсивности излучения;

– безопасность для обслуживающего персонала, поскольку расположение ИСИ в термовакуумной камере исключает контакт с ультрафиолетовым излучением и образование озона, неизбежное при работе газоразрядных ксеноновых ламп воздушного охлаждения.

Следует также отметить, что оптическая система в виде единого массива оптических элементов, жестко связанных с излучателями, не потребует настройки в ходе эксплуатации.

**Основные проблемы при создании светодиодного ИСИ.** К наиболее сложным задачам можно отнести:

– обеспечение требуемой спектральной точности, для чего комбинируют излучение нескольких групп

белых и монохромных светодиодов с разными длинами волн. В существующих зарубежных разработках применяют, в зависимости от требуемой точности, от 8 до 23 групп [2]. Низкая эффективность, узкая полоса излучения и высокая стоимость инфракрасных и ультрафиолетовых светодиодов делает более оправданным комбинирование светодиодных источников в видимой области и традиционных источников с высоким КПД в инфракрасной и ультрафиолетовой областях, например, кварцево-галогенных ламп [6] и ртутных ламп среднего давления.

– разработка оптической системы, суммирующей излучение отдельных светодиодов матрицы по спектру, углу и площади. Наибольшей эффективностью будет обладать ИСИ с первичной TIR – оптикой, работающей по принципу полного внутреннего отражения, без вторичной оптики, но равномерность выходного излучения при этом будет соответствовать низшему классу С по ГОСТ Р МЭК 60904–9. Совместное применение первичной и вторичной оптики, например, изображающего гомогенизатора, позволит получить очень высокую равномерность, на порядок превышающую требования высшего класса А по ГОСТ Р МЭК 60904–9 [2], но приведет к значительному снижению эффективности ИСИ;

– чувствительность светодиодных источников к перегреву и, как следствие, необходимость высокопроизводительной системы охлаждения, выводящей избыточное тепло за пределы термовакуумной камеры.

### Библиографические ссылки

1. ГОСТ Р МЭК 60904–9–2016. Приборы фотоэлектрические. Часть 9. Требования к характеристикам имитаторов солнечного излучения. М.: Стандартинформ, 2017. 12 с.

2. Plita F. Optical design of a fully LED-based solar simulator: PhD thesis : 07.2015 / Foteini Plita. Loughborough University, Loughborough, 2015. 186 p.

3. Разработка компактных источников излучения солнечного спектра / Р. О. Асланян, И. А. Марченко,

Д. И. Анисимов, В. И. Пантелеев // Решетневские чтения : материалы XX Междунар. науч. конф. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 436–437.

4. Подходы к созданию комплексных систем для отработки и испытания космических аппаратов / С. В. Кравченко [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 1 (13). С. 149–175.

5. Анализ возможности создания имитатора солнечного излучения на основе светодиодных источников для наземной отработки космических аппаратов / Г. В. Двирный [и др.] // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 2. С. 271–280.

6. Базилевский А. Б., Карпенко А. В. Имитатор солнечного излучения на базе комбинированных непрерывных источников света // Материалы науч.-техн. конф. ОАО «ИСС» им. акад. М. Ф. Решетнева», Железногорск. 2011. С. 160–162.

### References

1. GOST R MEK 60904-9–2016. Pribory fotoelektricheskiye. Chast' 9. Trebovaniya k kharakteristikam imitatorov solnechnogo izlucheniya. M. : Standartinform, 2017. 12 p.

2. Plita F. Optical design of a fully LED-based solar simulator: PhD thesis : 07.2015 / Foteini Plita. Loughborough University, Loughborough, 2015. 186 p.

3. Razrabotka kompaktnykh istochnikov izlucheniya solnechnogo spektra / R. O. Aslanyan, I. A. Marchenko, D. I. Anisimov, V. I. Panteleyev // Reshetnevskiyechteniya : materialy XX Mezhdunar. nauch. konf. / pod obshch. red. Yu. Yu. Loginova ; Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2016. P. 436–437.

4. Podkhody k sozdaniyu kompleksnykh sistem dlya otrabotki i ispytaniya kosmicheskikh apparatov / S. V. Kravchenko [et al.] // Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii. 2013. № 1 (13). P. 149–175.

5. Analiz vozmozhnosti sozdaniya imitatora sol-nechnogo izlucheniya na osnove svetodiodnykh istochnikov dlya nazemnoy otrabotki kosmicheskikh apparatov / G. V. Dvirnyy [et al.] // Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii. 2018. T. 19, № 2. P. 271–280.

6. Bazilevskiy A. B., Karpenko A. V. Imitator solnechnogo izlucheniya na baze kombinirovannykh ne-preryvnykh istochnikov sveta // Materialy nauchn.-tekh. konf. ОАО «ISS» им. акад. М. Ф. Решетнева», Zheleznogorsk. 2011. P. 160–162.

© Двирный Г. В., Шевчук А. А., Двирный В. В., 2018

**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ОБРАТИМЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ**В. В. Игнатенко<sup>1\*</sup>, О. В. Бубнов<sup>1</sup>, А. Г. Юдинцев<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики  
Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники  
Российская Федерация, 634034, г. Томск, ул. Белинского, 53<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30

\*E-mail: ignatenco.vlas@gmail.com

*С целью обеспечения отечественных предприятий ракетно-космической отрасли более надёжным и качественным оборудованием для этапа наземной отработки и подготовки систем электропитания (СЭП) космических аппаратов (КА) и в целом КА к полету, а также для обеспечения автоматизации проверок и существенного сокращения продолжительности испытаний разработан энергосберегающий статический обратимый преобразователь (ПСО). ПСО содержит несколько независимых силовых каналов, которые могут быть сконфигурированы для работы в режиме имитатора аккумуляторных батарей в составе СЭП КА, источника питания, а также постоянной или импульсной нагрузки.*

*Ключевые слова: наземные испытания, системы электропитания космического аппарата, имитирующие устройства, имитатор аккумуляторных батарей, имитатор нагрузки.*

**ENERGY-SAVING MULTICHANNEL RECIPROCAL CONVERTER**V. V. Ignatenco<sup>1\*</sup>, O. V. Bubnov<sup>1</sup>, A. G. Yudinsev<sup>1,2</sup><sup>1</sup>The research institute of automatics and electromechanics  
of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
53, Belynskogo Str., Tomsk, 634034, Russian Federation<sup>2</sup>Tomsk Polytechnic University  
30, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation

\*E-mail: ignatenco.vlas@gmail.com

*To provide domestic enterprises in the rocket and space industry with more reliable and high-quality equipment for the stage of ground testing and preparation of power conditioning units (PCU) and spacecraft, and to provide automation of checks and significantly shorten the test duration, an energy-saving mode static reciprocal converter (SRC) has been developed. The SRC contains several channels intended for the replacement of on-board storage batteries in spacecraft PCU, for work in the power supply mode, as well as constant or impulse load.*

*Keywords: electrical ground support equipment, special check out equipment, spacecraft power conditioning unit, storage batteries simulator, load simulator.*

СЭП КА, наряду с системами ориентации и терморегулирования, является одной из жизнеобеспечивающих систем в составе КА [1]. При проведении этапа наземной отработки СЭП подключение бортовых первичных источников, таких как солнечные (СБ) и аккумуляторные батареи (АБ), затруднено по следующим причинам:

- сложность воспроизведения энергии солнечного потока, аналогичной энергии в космическом пространстве;

- большая площадь полностью развернутых реальных батарей

- трудности и высокие временные затраты на задание необходимой точки на ВАХ СБ и уровня заряда АБ.

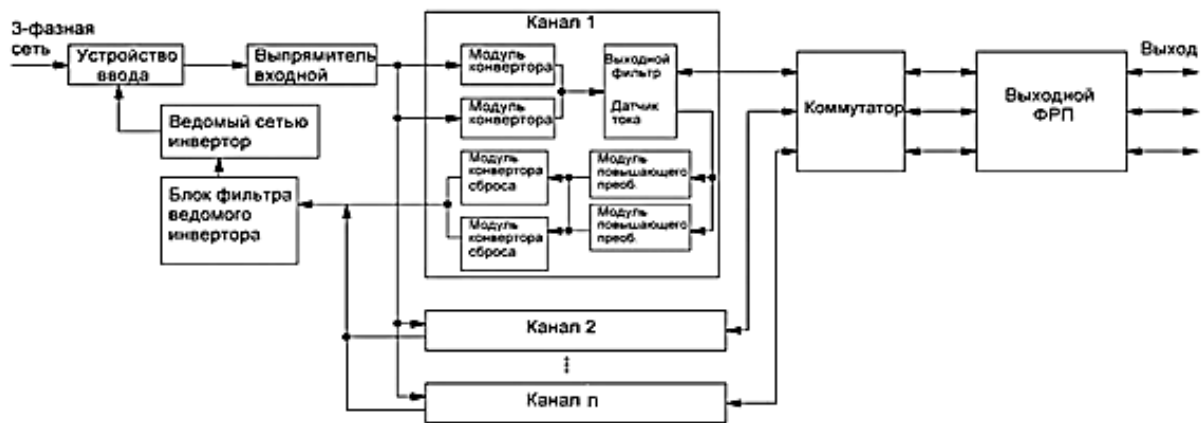
Следовательно, успешное проведение наземных испытаний обеспечивает наличие специализированных имитирующих устройств [2].

С целью обеспечения необходимым оборудованием отечественных предприятий, ракетно-космической

отрасли, «НИИ АЭМ ТУСУР» (Томск, Россия) реализует весь спектр имитирующих устройств: имитатор аккумуляторной батареи (ИАБ), имитатор солнечной батареи (ИБС), имитатор нагрузки (ИН), имитатор переменной частотно-регулируемой нагрузки (ИПЧН) и др.

Следующим шагом в создании наземного испытательного оборудования является создание универсального изделия, совмещающего функции нескольких устройств в одном. В контексте решения данной задачи разработан преобразователь статический обратимый (ПСО).

ПСО (см. рисунок) может содержать  $n$  – независимых каналов (в зависимости от мощности), каждый из которых может работать в различных режимах: режим имитатора аккумуляторных батарей (ИАБ), режим имитации наземного источника питания (ИП), режиме электронной постоянной или импульсной нагрузки (ПН или ИН).



Структурная схема ПСО

Принцип действия канала ПСО основан на преобразовании электроэнергии переменного тока питающей сети в энергию постоянного тока, передаче ее в нагрузку, в режимах ИАБ РАЗРЯД и ИП, а также преобразовании входного постоянного тока в энергию переменного тока и сброса ее в питающую сеть в режимах ИАБ ЗАРЯД, ПН, ИН [3].

ПСО способен имитировать АБ бесконечной емкости с неограниченным временем разряда и заряда. Таким образом, можно заменить весь ряд АБ, с номинальным напряжением 16–130 В.

В режиме ИП ПСО обеспечивает регулирование напряжения и тока на выходе, с возможностью переноса точки стабилизации напряжения с выходных разъемов внутри прибора на шины удаленной нагрузки.

В режиме имитации ИН ПСО способен формировать импульсный ток нагрузки с фронтом нарастания и спада менее 1 мс и периодом следования импульсов 0,1–10 с.

В ПСО реализован непрерывный программно-аппаратный контроль и диагностика аварийных и нештатных состояний электронных узлов и блоков, коммутационной аппаратуры с отключением ПСО от изделия при возникновении аварийной ситуации. В устройстве предусмотрены два типа защиты: канальная и общая. При срабатывании общих защит ПСО автоматически отключается, блокирует включение силовой части и подключение каналов к изделию. Срабатывание защиты приводит к появлению и фиксации сигналов АВАРИЯ с детализацией причин появления аварий. Срабатывание канальной защиты приводит лишь к отключению выхода аварийного канала, при этом работа других каналов продолжается.

Встроенное программное обеспечение (ПО) ПСО обеспечивает:

- возможность вести обмен данными с внешней ПЭВМ по интерфейсу связи Ethernet;
- контроль и диагностику неисправности ПСО;
- тестирование ПСО с целью оценки возможности его функционирования;
- конфигурация режимов;
- управление подключением изделия;
- пользовательский интерфейс, достаточный для реализации всех видов работ.

Таким образом, разработанный многоканальный обратимый преобразователь обладает следующими преимуществами:

- многофункциональность, благодаря совмещению функций трех устройств (имитатор АБ, источник питания, имитатор нагрузки) в одном;
- экономичность, стоимость одного ПСО ниже стоимости трех имитаторов по отдельности;
- компактность, удобство использования, полностью оснащенное рабочее место ПСО компактнее, чем рабочее место с тремя отдельными имитаторами.
- энергосбережение при имитации режимов ИАБ ЗАРЯД и нагрузочных токов.

#### Библиографические ссылки

1. Системы спутников связи : учеб. пособие / А. Б. Базилевский и др. Красноярск, 1989. 224 с.
2. Юдинцев А. Г. Проблемы проектирования автоматизированных испытательных комплексов систем электропитания космических аппаратов // Решетневские чтения : Междунар. науч. конф. Красноярск, 2013. Ч. 1. С. 336–337.
3. Ignatenko V. V., Bubnov O. V. Static reciprocal converter // Научная сессия ТУСУР–2018 : материалы Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (16–18 мая 2018, г. Томск) : в 5 ч. Томск : В-Спектр, 2018. Ч. 4. С. 205–207.

#### References

1. Sistemy sputnikov svyazi : Uchebnoe posobie po kursu “Sistemy ehlektrosnabzheniya LA” / A. B. Bazilevskij et al. Krasnoyarsk, 1989. 224 s.
2. Yudinsev A. G. Problemy proektirovaniya avtomatizirovannyh ispytatelnyh kompleksov sistem ehlektropitaniya kosmicheskikh apparatov // *Materialy Mezhdunar. nauch. konf. “Reshetnevskie chteniya”*, Krasnoyarsk, 2013. Chast’ 1. P. 336–337.
3. Ignatenko V. V., Bubnov O. V. Static reciprocal converter // *Nauchnaya sessiya TUSUR–2018 : materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh (16–18 maya 2018 g. Tomsk)* : v 5 ch. Tomsk: V-Spekt, 2018. Ch. 4. P. 205–207.

© Игнатенко В. В., Бубнов О. В., Юдинцев А. Г., 2018

УДК 621

## ВНЕДРЕНИЕ ЦЕНТРА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПРИ ОГНЕВЫХ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ ЖРД

Г. В. Комлев, С. В. Мухин, А. В. Чудагашев

Производство ИЗК АО «Красмаш»  
 Российская Федерация, 662991, г. Железнодорожный Красноярского края, п. Подгорный, ул. Заводская, 1

*Разработан принцип внедрения эффективной организации аппаратной структуры и виртуализации управляющей инфраструктуры автоматизированной системы управления огневых испытаниями ЖРД на производстве ИЗК АО «Красмаш».*

*Ключевые слова: кластер, виртуализация, мониторинг, огневые стендовые испытания.*

## THE DATA PROCESSING CENTRE OF THE INFORMATION CONTROL SYSTEM FOR THE LIQUID ROCKET ENGINE FIRE TESTS IMPLEMENTATION

G. V. Komlev, S. V. Mukhin, A. V. Chudagashev

Production Based at Testing and Refueling Industrial Complex JSC "Krasmash"  
 1, Zavodskaya Str., Podgorny, Zheleznogorsk, Krasnoyarskiy region, 662991, Russian Federation

*The principle to be implemented while organizing the hardware architecture efficiency, as well as while control infrastructure of the automated control system for the liquid rocket engines fire tests virtualizing at the testing and refueling industrial complex JSC "Krasmash" production site has been developed.*

*Keywords: cluster, virtualization, monitoring, fire tests.*

**Введение.** Информационно-управляющая система (ИУС), используемая в ходе огневых стендовых испытаний (ОСИ) жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) принимает сигналы с первичных преобразователей, преобразует их и передает на серверы для регистрации и через стойки управления на исполнительные органы для корректировки работы изделия. При эксплуатации существующей системы возникают существенные проблемы.

Например, невозможность автоматически корректировать управляющие воздействия на исполнительные органы в ходе нештатного развития испытания из-за недостаточной вычислительной мощности контроллеров.

Недостаточная скорость обмена локально-вычислительной сети для создания системы интеллектуальной автоматической защиты. Устаревание существующей системы, вследствие чего отказоустойчивость системы недостаточно высока.

Потеря данных в обратной связи ИУС может привести к сбою программы испытаний и, как следствие, к дорогостоящим мероприятиям, вплоть до повтора ОСИ на новом ЖРД.

В качестве решения этих проблем на производстве ИЗК АО «Красмаш» внедряется центр обработки данных информационно-управляющей системы (ЦОД ИУС).

ЦОД ИУС является технологическим элементом стендового оборудования, используемого для ОСИ ЖРД, и представляет собой совокупность серверной и сетевой инфраструктур высокой доступности, объединенных в кластер, с организацией системы по-

средством дублирования критически важных компонентов [1].

**Описание.** Кластер виртуализации основан на гипервизоре VMware ESX(i), входящем в состав пакета VMware vSphere Essentials Plus Kit. Гипервизор устанавливается на серверах системы Cisco HyperFlex [2].

Кластерная система может вмещать до 25 и более сеансов виртуальных клиентов различных типов без влияния этих сеансов друг на друга [3].

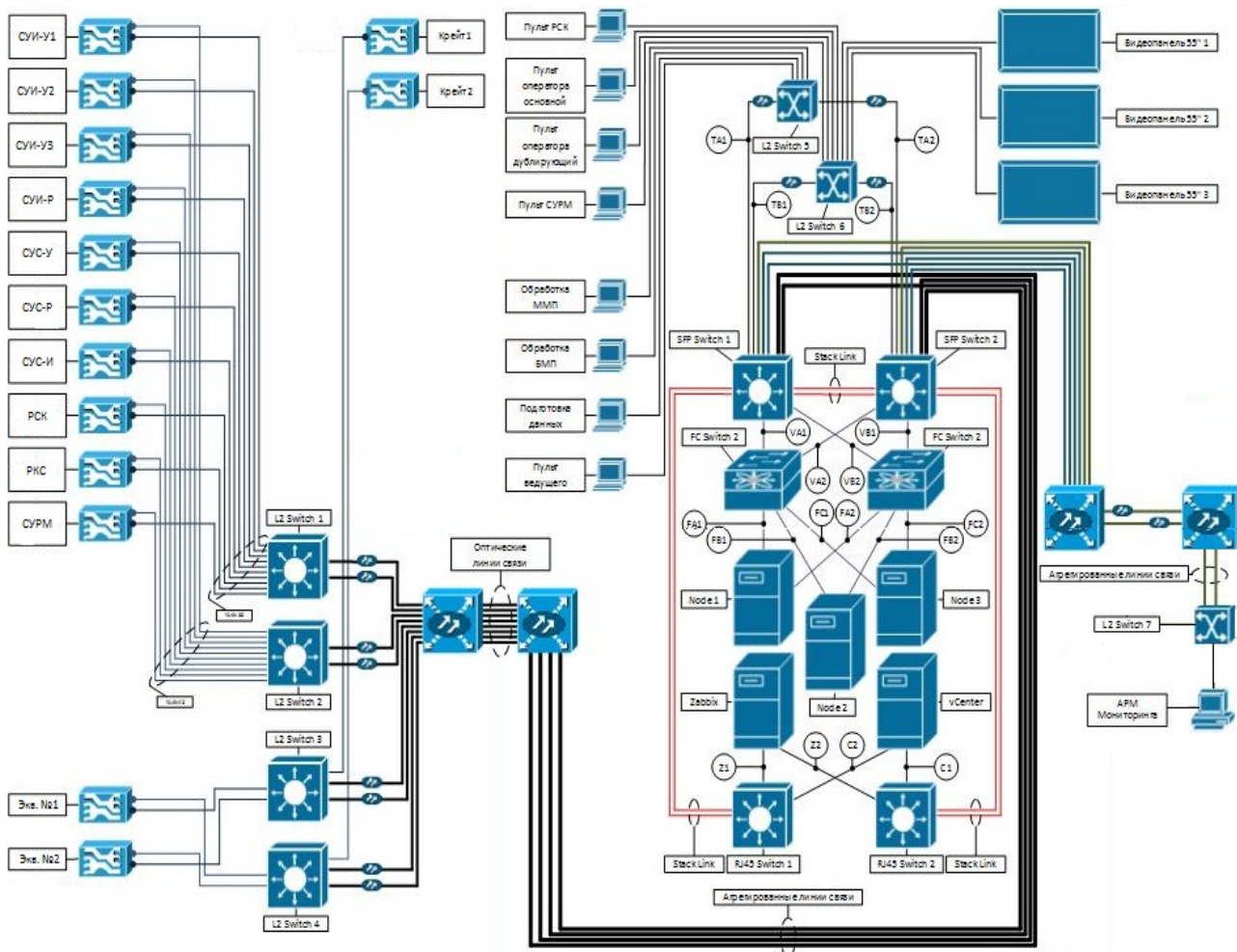
На рисунке изображена схема серверной и сетевой структуры кластера.

Решение Cisco HyperFlex предполагает установку в серверный шкаф трех физических высокопроизводительных серверов с двумя процессорами.

В каждом сервере предусмотрена установка адаптера FCoE/Ethernet HBA с двумя портами 10Gbps. Один порт адаптера служит для подключения к коммутатору кластера HyperFlex (FC Switch 1), а второй порт адаптера служит для подключения к коммутатору кластера HyperFlex (FC Switch 2). Коммутаторы кластера в свою очередь соединены с коммутаторами ядра сети, посредством агрегируемых дублирующих каналов связи.

Подключение серверов к сети доступа, в которой будут располагаться тонкие клиенты, осуществляется по технологии 100Base-T.

Для связи контроллеров системы управления испытательного стенда, а также тонких клиентов с виртуальными машинами в гипервизоре VMware ESX системы HyperFlex имеются 4 виртуальных коммутатора, каждый из которых имеют привязку к определенному VLAN.



Структурная схема серверной и сетевой структуры кластера

На испытательном стенде находятся контроллеры систем управления огневыми испытаниями. У каждого контроллера имеются два сетевых адаптера, на управление и на регистрацию. Также на стенде располагаются два коммутатора уровня 3:

- первый L3 Switch 1 служит для коммутации линий связи контроллеров АСУТП с определенной IP-адресацией;
- второй L3 Switch 2 служит для коммутации линий связи контроллеров АСУТП с другой IP-адресацией.

Порты SFP данных коммутаторов служат для связи с коммутаторами ядра сети и передачи тегированного трафика. С целью исключения единых точек отказа предполагается агрегирование портов SFP 1000BASE-LX/LH.

На рабочих местах операторов находятся коммутаторы ядра сети уровня 3, коммутаторы уровня 2 для соединения тонких клиентов с отказоустойчивым кластером, в том числе серверные компоненты кластера.

Коммутаторы L2 Switch 1 и L2 Switch 2 подключены к коммутаторам ядра сети оптическими каналами связи. С целью исключения единых точек отказа предполагается агрегирование портов SFP 1000Base-VX данных коммутаторов [4].

**Заключение.** Внедрение ЦОД ИУС позволит выйти на новый уровень проведения ОСИ, повысить на-

дежность и защиту систем обработки данных, их масштабируемость, а также их управляемость и администрирование, высокую доступность и безотказную работу управляющего комплекса, обеспечивающего сбор и регистрацию измерительных параметров испытываемого ЖРД, первичную и вторичную обработку зарегистрированных параметров [5].

Появится возможность повышения эффективности, обоснованности и оперативности принятия решений при огневых испытаниях жидкостных реактивных двигателей за счет опережающего интеллектуального анализа потоков данных.

Работы по проектированию начались в 2016 году, в 2017 году закуплены материалы и оборудование, в настоящее время проект находится на стадии монтажных работ.

#### Библиографические ссылки

1. Википедия Виртуализация [Электронный ресурс]. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Виртуализация> (дата обращения: 24.08.2018).
2. VMware [Электронный ресурс]. URL: <http://vmware.com> (дата обращения: 24.08.2018).
3. Wikipedia Virtual machine [Электронный ресурс]. URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Virtual\\_machine](http://en.wikipedia.org/wiki/Virtual_machine) (дата обращения: 24.08.2018).



4. Самойленко А. Технологии аппаратной виртуализации [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ixbt.com/cm/virtualization-h.shtml> (дата обращения: 24.08.2018).

5. Карпенко А. П. Параллельные вычисления [Электронный ресурс]. URL: <http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=Parallel/ch010104.mod/?cou=Parallel/base.cou> (дата обращения: 24.08.2018).

#### References

1. Wikipediya Virtualizatsiya. Available at: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Виртуализация> (accessed: 04.08.2018).

2. VMWare. Available at: <http://vmware.com> (accessed: 24.08.2018).

3. Wikipedia Virtual machine. Available at: [http://en.wikipedia.org/wiki/Virtual\\_machine](http://en.wikipedia.org/wiki/Virtual_machine) (accessed: 24.08.2018).

4. Samoylenko A. Tekhnologii apparatnoy virtualizatsii. Available at: <http://www.ixbt.com/cm/virtualization-h.shtml> (accessed: 24.08.2018).

5. Karpenko A. P. Parallelnye vychisleniya. Available at: <http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=Parallel/ch010104.mod/?cou=Parallel/base.cou> (accessed: 24.08.2018).

© Комлев Г. В., Мухин С. В., Чудагашев А. В., 2018

## КРИОВАКУУМНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОЧИСТКИ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ОТ ОСТАТКОВ И ПАРОВ МАСЛА-ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ЛЗ-ТК

Д. Ю. Максимов

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: secret398@mail.ru

*Представлена конструкция автоматизированной криовакуумной установки для очистки системы охлаждения космического аппарата от остатков и паров масла-теплоносителя ЛЗ-ТК после промывки и испытаний. Принцип работы установки основан на откачке остатков и паров ЛЗ-ТК из системы охлаждения созданием вакуумметрического давления с попутной продувкой через азотные ловушки, кристаллизации частиц жидкости на фильтрующих панелях и последующей их утилизации в виде жидкого конденсата после регенерации (оттаивания). В установке реализована задача автоматического поддержания уровня криогенной жидкости в азотных ловушках.*

*Ключевые слова: азот, вакуумирование, автоматизация, система охлаждения, откачка паров, очистка системы.*

## CRYO-VACUUM UNIT FOR CLEANING THE COOLING SYSTEM OF THE SPACECRAFT FROM RESIDUES AND VAPORS OF THE LZ-TK HEAT CARRIER OIL

D. Y. Maximov

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: secret398@mail.ru

*The paper presents the of an automated cryo-vacuum unit for cleaning the spacecraft cooling system from residues and vapors of the LZ-TK heat transfer fluid after washing and testing. The principle of operation of the plant is based on evacuation of residues and vapors of LZ-TK from the cooling system by creating vacuum pressure with associated blow-through through nitrogen traps, crystallization of liquid particles on the filter panels and their subsequent utilization in the form of liquid condensate after regeneration (thawing). The installation implemented the task of automatically maintaining the level of cryogenic liquid in nitrogen traps.*

*Keywords: nitrogen, vacuuming, automation, cooling system, vapor pumping, system cleaning.*

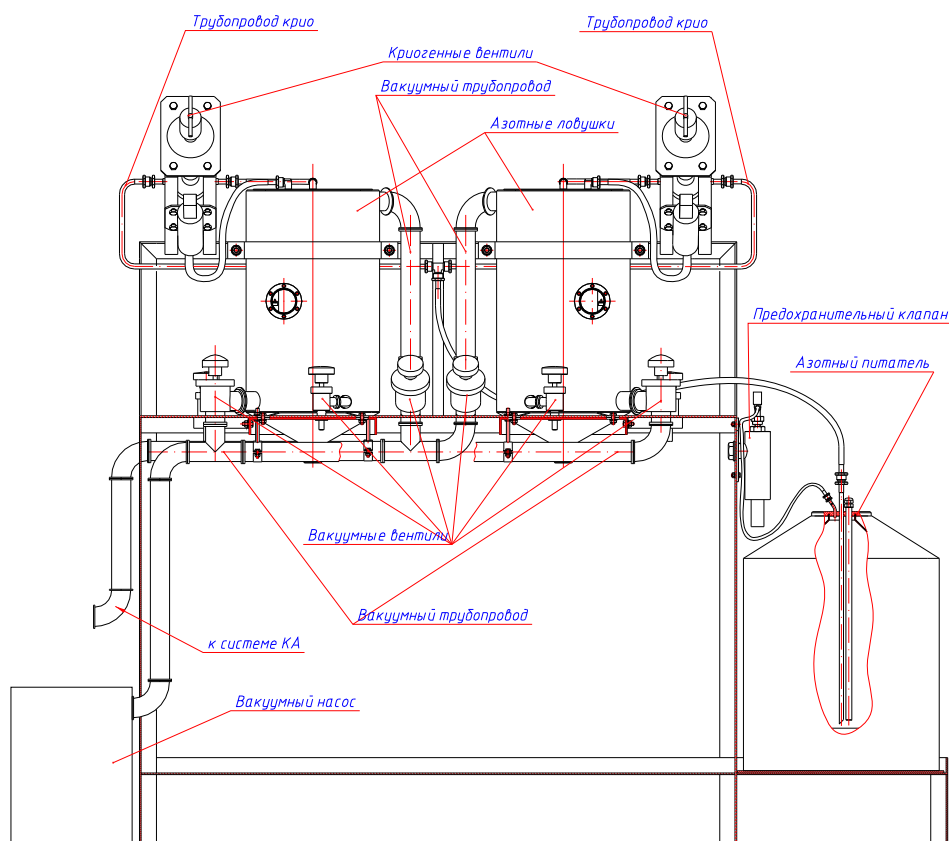
**Введение.** В технологическом процессе производства космического аппарата предусмотрены испытания узлов и систем на соответствие ряду параметров. Так систему охлаждения предварительно испытывают на герметичность путём закачки в неё масла-теплоносителя ЛЗ-ТК с последующим его удалением. ЛЗ-ТК, благодаря присутствию в нём противоизносных присадок, также играет роль смазки для механических узлов системы охлаждения, рабочие поверхности которых работают на трение скольжение и выполнены с высокой точностью. В связи с этим категорически исключается присутствие в масле частиц загрязнений, так как даже самые мелкие фракции могут привести к поломке оборудования, что приведёт к нарушению механизма терморегуляции и впоследствии выводу из строя космического аппарата. Загрязнения исключаются путём проведения после испытаний нескольких циклов промывки с прогонкой масла-теплоносителя через специальные фильтры. Затем отработанное масло-теплоноситель удаляется из системы. После удаления отработанного масла-

теплоносителя технология предусматривает осушение (удаление паров ЛЗ-ТК) из системы охлаждения вакуумированием (откачкой воздуха). Также вакуумирование позволяет исключить образование воздушных пробок при окончательной заправке ЛЗ-ТК.

В настоящее время операцию сушки и вакуумирования систем охлаждения космических аппаратов проводят на морально устаревшем оборудовании разработки советского времени, которое обладает рядом недостатков.

**Габариты.** Установка достаточно громоздкая, так как на момент её проектирования оборудование, работающее с криогенными жидкостями и вакуумом, имело гораздо большие габариты, чем современные;

**Перерасход.** На данный момент работа установки связана со значительными потерями криогенной жидкости. Причиной является отсутствие регулировки скорости подачи её в ловушки, что исключает возможность герметизации системы подающих каналов и самих ловушек из-за опасности возникновения аварийной ситуации создавшимся чрезмерным избыточным давлением.



Компоновка установки

Низкая эффективность. Азотные ловушки из-за недостатков конструкции не обеспечивают достаточную очистку воздуха от частиц ЛЗ-ТК, что приводит к выбросу их в атмосферу, а так как пары парафинов, нагретые до определённой температуры, при контакте с воздухом воспламеняются, то при не достаточной эффективности вентиляции может произойти возгорание.

**Описание.** Несмотря на то, что установка представляет собой единую систему, под управлением логического микроконтроллера, однако её конструкцию можно поэтапно разделить на несколько самостоятельных узлов в зависимости от функционала.

Первый этап – подача криогенной жидкости. Эту функцию выполняет электрический криогенный питатель. Конструкция питателя является собственной разработкой и спроектирована для обеспечения автоматизации процесса подачи криогенной жидкости (см. рисунок).

Работа питателя основана на принципе вытеснения жидкости создающимся избыточным давлением газа в сосуде, образовавшегося в результате кипения криогенной жидкости при нагреве элемента, входящего в состав конструкции питателя.

Следующий этап – очистка воздуха от паров ЛЗ-ТК и последующая их утилизация. Эту функцию выполняют азотные ловушки. Их конструкция доработана для обеспечения более качественной очистки воздуха от паров охлаждающей жидкости.

Конструкция ловушки представляет собой сосуд в сосуде, один из которых наполняется криогенной жидкостью. Рабочей зоной ловушек является про-

странство между сосудами, через которое продувается воздух с парами ЛЗ-ТК. В рабочей зоне между сосудами сформирован лабиринт из рёбер, которые приварены к внутренней ёмкости, но не контактируют с внешней ёмкостью, исключая её обледенение. Рёбра заставляют воздух с парами ЛЗ-ТК на пути от входного штуцера до выходного находиться максимально длительное время в рабочей зоне азотной ловушки, контактировать с охлаждёнными до сверхнизкой температуры поверхностями и кристаллизоваться на них.

Для контроля процесса работы ловушки оборудованы смотровыми окнами. Так же конструкцией предусмотрена шкала, для контроля слоя намерзания кристаллизовавшихся частиц ЛЗ-ТК и определения момента перевода ловушки в режим регенерации (оттаивания). Процесс регенерации заключается в удалении из внутреннего сосуда ловушки остатков криогенной жидкости, что приводит к её постепенному нагреву. Кристаллизовавшиеся частицы ЛЗ-ТК оттаивают, стекают со стенок и рёбер и скапливаются в нижней конусной части ловушки в виде конденсата. Когда ловушка полностью оттаяла, конденсат сливают через сливной штуцер, открыв заглушку, а затем продувают рабочую зону сжатым воздухом для удаления остатков по специальной дренажной линии.

Последний этап – откачка воздуха из системы охлаждения космического аппарата до создания вакуума и прокачка её через азотные ловушки. За эту операцию отвечает вакуумный насос, который должен соответствовать требованиям безопасности и обеспечивать необходимую скорость прокачки воздуха.

**Вывод.** Представленная автоматизированная крио-вакуумная установка спроектирована для проведения операций вакуумирования системы охлаждения космических аппаратов и исключает выше изложенные недостатки. Она обладает относительно малыми габаритами, позволяет добиться значительной экономии криогенной жидкости за счёт контроля автоматикой её уровня в азотных ловушках, что также положительно сказывается на эффективности их работы.

#### Библиографический список

1. Фатеев В. Ф. Малые космические аппараты информационного обеспечения / под ред. В. Ф. Фатеева. М. : Радиотехника, 2010.
2. Авианорама: Международный авиационно-космический журнал [Электронный ресурс]. 2003–2004. URL: <http://aviapanorama.su> (дата обращения: 11.03.2018).
3. Новости космонавтики: научно-популярный журнал [Электронный ресурс]. 2013–2014. URL: <http://novosti-kosmonavtiki.ru> (дата обращения: 11.03.2018).
4. Химическое и нефтегазовое машиностроение : ежемесячный международный научно-технический производственный журнал.
5. Тепловакуумные испытания современных космических аппаратов / А. Ю. Вшивков, С. А. Крат, В. И. Халиманович // Вакуумная техника и технология. 2011. Т. 21, № 3. С. 171–177.
6. Солнцев Ю. П., Ермаков Б. С., Слепцов О. И. Материалы для низких и криогенных температур : энциклопедический справочник / под ред. Ю. П. Солнцева. 2008. С. 233–240.
7. Машины низкотемпературной техники / Криогенные машины / под общ. ред. А. М. Архарова, И. К. Буткевича. 2011. С. 267–283.

8. Кишкин А. А., Лавров Н. А., Делков А. В., Мокеев В. В. Моделирование режимов работы малых холодильных установок // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012.

#### References

1. Fateeva, V. F. Small space vehicles information support / Ed. V. F. Fateyev. M. : Radio Engineering, 010.
2. Avian Panorama: International Aviation and Space Journal [Electronic resource]. 2003–2004. URL: <http://aviapanorama.su> (date of visit: 11.03.2018).
3. News of astronautics: popular science magazine [Electronic resource]. 2013–2014. URL: <http://novosti-kosmonavtiki.ru> (date of visit: 11.03.2018).
4. Monthly international scientific and technical production magazine “Chemical and Oil and Gas Engineering”.
5. Thermal vacuum tests of modern space vehicles / A. Yu. Vshivkov, S. A. Krat, V. I. Khalimanovich // Vacuum Technology and Technology. 2011. T. 21, № 3. P. 171–177.
6. Solntsev Yu. P., Ermakov BS, Sleptsov OI Encyclopedic reference book “Materials for low and cryogenic temperatures” / Ed. Yu. P. Solntseva. 2008. P. 233–240.
7. Machines for temperature-temperature technology / Cryogenic machines / Under the general ed. A. M. Arkharov and I. K. Butkevich. 2011. P. 267–283.
8. Kishkin A. A., Lavrov N. A., Delkov A. V., Mokeev V. V. Modeling of operating modes of small refrigeration plants // Engineering Journal: Science and Innovation. 2012.

© Максимов Д. Ю., 2018

УДК:534.322

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТЕНДОВ ТИПА K200 ПРИ УДАРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

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

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

<sup>2</sup>АО «Российские космические системы»  
Российская Федерация, 111250, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53  
E-mail: contact@spacecorp.ru

*Рассматривается методика ударных испытаний по методу ударных спектров ускорений с использованием ударного стенда K200, дается характеристика, обсуждаются преимущества и недостатки применяемой методики.*

*Ключевые слова: ударный стенд, ударный спектр ускорений, резонансная плита.*

## ON THE USE OF K200 PILE-DRIVER BENCHES IN SHOCK TESTS OF THE BOARD EQUIPMENT FOR SPACECRAFTS

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

<sup>1</sup>JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: office@iss-reshetnev.ru

<sup>2</sup>JSC "Russia space systems"  
53, Aviamotornaya Str., Moskva, 111250, Russia Federation  
E-mail: contact@spacecorp.ru

*In this paper, the technique of impact tests using acceleration shock spectrum on a K200 impact bench is given, a characteristic is given, the advantages and disadvantages of the applied technique are discussed.*

*Keywords: impact bench, acceleration shock spectrum, resonance plate.*

На участке выведения космический аппарат подвергается различным механическим воздействиям, одним из которых являются ударные нагрузки высокой интенсивности. Источники таких воздействий – это пирсредства ракеты-носителя (РН) и собственные пирсредства космического аппарата (КА) [1–3]. Требования по ударным воздействиям на КА и его оборудование в настоящее время задаются в форме ударных спектров ускорений (УСУ) [1; 2]. Вместе с тем наибольшее распространение для проведения ударных испытаний получили различные копровые стенды маятниковые и со свободно падающими столами. Это стенды как импортного, так и отечественного производства ориентированы на создание в местах крепления объекта испытаний ударных воздействий в виде одиночного импульса ускорений с различной амплитудой и длительностью сигнала [4]. Типовым стендом, использующимся при испытаниях на удар уже более 60 лет, является копровый стенд K200 [5]. При этом необходимо учитывать, что согласно [6]: «При испытаниях аппаратуры критичной к механическим ударам не рекомендуется использовать копровые стенды, характеризующиеся начальной или конечной скоростью движения (падения) рабочего стола с закрепленным объектом испытаний». То

есть рассмотренный стенд не рекомендуется для проведения ударных испытаний бортовой аппаратуры КА, чувствительной к ударным воздействиям. Вместе с тем данный стенд до настоящего времени входит в список рекомендуемого оборудования для проведения ударных испытаний [7]. Следует также отметить, что амплитуда ударного импульса ускорений в 3–4 раза больше амплитуды нестационарной вибрации (при одинаковом УСУ) [8].

Выход из сложившейся ситуации заключается в установке на стенд K200 резонансной плиты с объектом испытаний. Это позволило проводить на копровом стенде ударные испытания по методу УСУ созданием нестационарной вибрации.

Предварительно (до начала испытаний) разрабатывалась математическая (конечно-элементная) модель ударного стенда с резонансной плитой и расчетным путем подбирались параметры резонансной плиты, ее положение на стенде, количество точек крепления резонансной плиты к стенду, скорость соударения маятника и т. д. Затем на стенд устанавливали динамический макет объекта испытаний для уточнения режимов нагружения. После чего макеты приборов заменялись штатной аппаратурой, и проводились ударные испытания.

Таблица типовых ударных воздействий

Зона	Поддиапазон частот, Гц					
	35–50	50–100	100–200	200–500	500–1000	1000–10000
Значение спектра удара, g						
S1	25–50	50–150	150–400	400–1750	1750–5000	5000
S2	13–25	25–75	75–200	200–875	875–2500	2500
S3	5–10	10–30	30–80	80–350	350–1000	1000
S4	3–5	5–15	15–40	40–175	175–500	500
S5	–	–	3–8	8–35	35–100	100

*Примечание:* Ударные нагрузки задаются по каждой из трех взаимно перпендикулярных осей в виде ударных спектров ускорений (при добротности резонаторов  $Q = 10$ ). Изменение ускорения в пределах каждого частотного поддиапазона – линейное при логарифмическом масштабе по частоте и амплитуде ускорения.

Испытания проводятся последовательно по каждому из трех взаимно перпендикулярных направлений. В докладе рассматриваются примеры ударных испытаний различной бортовой аппаратуры массой от 3 до 25 кг и уровнями ударных воздействий, приведенными в таблице типовых ударных воздействий. Уровни воздействий, соответствующие зонам S4-S5 (до 500g по УСУ), воспроизводятся на стандартном оборудовании даже без использования специальной резонансной плиты. При этом используется как маятниковый боек, так и вертикально падающий груз, что позволяет исключать монтаж и демонтаж испытуемой бортовой аппаратуры при проведении ударных испытаний по трем взаимно перпендикулярным направлениям. Зона S3 является переходной, и вызывает уже необходимость проводить ударные испытания с использованием резонансной плиты. Но особых трудностей в создании нестационарной вибрации, обеспечивающей необходимые ударные спектры, как правило, не вызывает.

Наибольшие трудности возникают при создании ударных воздействий, соответствующих требованиям зон S1–S2 для приборов массой более 3–5 кг. В этом случае возникают проблемы с оснасткой, которая должна обеспечивать большую жесткость, количеством точек крепления резонансной плиты и т. д. В докладе обсуждаются особенности проведения таких испытаний.

#### 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. Adriano Calvi, “Spacecraft Loads Analysis” ESA / ESTEC, Noordwijk, The Netherlands November 21, P. 2011–126.
4. Orlov S. A., Matveev K. A., Rastorguev G. I. Rationing and shock testing on-board equipment of spacecrafts // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 894 (2017) 012131.

5. Круглов Ю. А., Туманов Н. А. Ударовиброаппаратура машин и оборудования. Л. : Машиностроение, 1986. 222 с.

6. ОСТ 92-5100–2002. Аппаратура космических комплексов. Общие технические условия. Федеральное космическое агентство, 2002. 174 с.

7. ГОСТ РВ20.57.305–98. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам. М. : Госстандарт, 1999. 50 с.

8. ECSS-E-HB-32-25A. Space engineering. Mechanical shock design and verification handbook. 14 July 2015. 541 p.

#### References

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. Adriano Calvi, “Spacecraft Loads Analysis” ESA / ESTEC, Noordwijk, The Netherlands November 21, P. 2011–126.
4. Orlov S. A., Matveev K. A., Rastorguev G. I. Rationing and shock testing on-board equipment of spacecrafts // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 894 (2017) 012131.
5. Kruglov Ju. A., Tumanov N. A. Udarovibroshchita mashin i oborudovaniya. L. : Mashinostroenie, 1986. 222 с.
6. OST 92-5100–2002. Apparatura kosmicheskikh kompleksov. Obshchie tekhnicheskie usloviya. Federal'noe kosmicheskoe agentstvo, 2002. 174 p.
7. GOST RV20.57.305–98. Apparatura, pribory, ustrojstva i oborudovanie voennogo naznacheniya. Trebovaniya stojkosti k vneshnim vozdeystvuyushchim faktoram. M. : Gosstandart. 1999. 50 p.
8. ECSS-E-HB-32-25A. Space engineering. Mechanical shock design and verification handbook. 14 July 2015. 541 p.

© Орлов С. А., Копытов В. И.,  
Мацыгорин А. И., 2018

УДК 534.322

## О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ИСПЫТАНИЙ НА ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЕ УДАРНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

С. А. Орлов, В. И. Копытов, А. В. Пасько

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

*Рассматривается проведение ударных испытаний систем космических аппаратов на высокоинтенсивные воздействия по методу ударных спектров ускорений с использованием ударного стенда с падающим столом и специального пиротехнического устройства, обсуждаются преимущества и недостатки применяемых методик, даются рекомендации по применению рассматриваемых методик при испытаниях различного оборудования.*

*Ключевые слова: ударный стенд, ударный спектр ускорений, пространственные конструкции, бортовая аппаратура.*

## ON SOME FEATURES OF TESTS OF SPACECRAFTS ON SHOCK IMPACTS OF HIGH INTENSITY

S. A. Orlov, V. I. Kopytov, A. V. Pasko

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: office@iss-reshetnev.ru

*In this paper, the shock testing of spacecraft systems on high-intensity impact using acceleration shock spectrum on an impact bench and a special pyrotechnic device is considered, the advantages and disadvantages of the methods used are discussed, recommendations on the application of the techniques in question when testing various equipment.*

*Keywords: impact bench, acceleration shock spectrum, spatial structures, onboard equipment.*

В настоящее время при испытаниях на высокоинтенсивные ударные воздействия, источником которых являются различные пиротехнические устройства космических аппаратов (КА), основные проблемы возникают на этапе принятия методики ударных испытаний [1–3]. При этом наибольшие сложности связаны с испытаниями различных подсистем космических аппаратов, включающих как элементы конструкции, так и бортовую аппаратуру (БА). Как правило, это пространственные конструкции, имеющие несколько плоскостей крепления (например, облучатели антенн). Для проведения ударных испытаний БА наиболее широкое распространение получили различные копровые стенды, например, в АО «ИСС» используется стенд с падающим столом P55L фирмы LANS-MONT [4], а для проведения ударных испытаний с использованием пиротехнических устройств используется специальное пиротехническое устройство (СПУ) [5].

Типовой режим в виде ударных спектров ускорений (УСУ) при добротности  $Q = 10$ , на который проводится отработка БА и систем КА, приведен в таблице 1. Данный режим соответствует границе между режимами средней и дальней зон ударного нагружения КА согласно европейским стандартам и стандартам США [2; 3]. Этот режим допускается воспроизводить как на механических (копровых) стендах, так и на стендах с использованием различных пиротехни-

ческих устройств [6]. Далее рассматриваются особенности использования различных методик испытаний на ударные воздействия.

В докладе приводятся результаты испытаний облучающей системы (ОС) одного из КА разработки АО «ИСС» на ударные воздействия согласно таблице. Испытания проводились с динамическим макетом ОС, установленной в специально изготовленную оснастку, обеспечивающую штатные условия крепления макета. При ударных испытаниях с использованием пиротехнических устройств оснастка вывешивалась на резиновых шнурах, а при испытаниях на стенде P55L жестко крепилась к столу стенда. Показано, что при близких уровнях ударного спектра ускорений в точках крепления ОС к оснастке максимальные амплитудные значения ускорения в этих точках примерно в два раза выше при испытаниях на стенде с падающим столом P55L, чем при использовании СПУ. Кроме того, пики УСУ (как отклик на пиротехническое воздействие) смещаются в более высокочастотную область относительно ударных испытаний на копровом стенде. При этом на самой ОС (в ее центре) при испытаниях на стенде с падающим столом P55L максимальное значение УСУ в 1,5 раза выше, чем при пиротехническом воздействии, причем независимо от способа ударного нагружения в низкочастотной области спектра отклик ОС происходит на частоте с максимальной эффективной массой (~250 Гц).

**Режим ударного нагружения**

Поддиапазон частот, Гц	35–50	50–100	100–200	200–500	500–1000	1000–10000
Значение спектра удара, g	5–10	10–30	30–80	80–350	350–1000	1000

Обе методики испытаний обеспечили соблюдение требований по погрешностям, рекомендуемые как отечественными, так и зарубежными стандартами ( $\pm 3$  дБ). При увеличении требований по амплитуде УСУ (например, до 2 500 g) предпочтение должно отдаваться стендам с пиротехническими элементами.

**Библиографические ссылки**

1. Adriano Calvi. Spacecraft Loads Analysis. ESA / ESTEC, Noordwijk, The Netherlands November 21, P. 2011–126.
2. ECSS-E-HB-32-25A. Space engineering. Mechanical shock design and verification handbook. 14 July 2015. 541 p.
3. Product verification requirements for launch, upper-stage and space vehicles. MIL-STD-1540D, 15 January, 1999. 308 p.
4. URL: <http://www.novatest.ru> (дата обращения: 25.06.2018).
5. 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.

6. Pyroshock test criteria. NASA-STD-7003, may 18, 1999. 26 p.

**References**

1. Adriano Calvi. Spacecraft Loads Analysis. ESA / ESTEC, Noordwijk, The Netherlands November 21. P. 2011–126.
2. ECSS-E-HB-32-25A. Space engineering. Mechanical shock design and verification handbook. 14 July 2015. 541 p.
3. Product verification requirements for launch, upper-stage and space vehicles. MIL-STD-1540D, 15 January, 1999. 308 p.
4. Available at: <http://www.novatest.ru> (accessed: 25.06.2018).
5. Pat. 2394217 RF, MPK G01M 7/08. Pirotehnicheskoe ustrojstvo dlja sozdanija udarnyh vozdejstvij [Pyrotechnic device for creating shock impact] / Orlov S. A., Orlov A. S. ; Published on 10.07.2010. Bjul. № 19. 8 p.
6. Pyroshock test criteria. NASA-STD-7003 may 18, 1999. 26 p.

© Орлов С. А., Копытов В. И., Пасько А. В., 2018



## АНАЛИЗ МЕТОДИК ПРОВЕДЕНИЯ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЙ СВЯЗНЫХ ПОЛЕЗНЫХ НАГРУЗОК В АО «ИСС»

Е. Б. Проценко, С. И. Иконников, А. А. Шаров, А. С. Кислица, И. С. Нестеренко

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

*Проведен анализ существующих методик испытаний связных полезных нагрузок в АО «ИСС». По результатам анализа разработаны предложения по адаптации имеющегося набора измерений под потребности операторов спутниковых систем связи.*

*Ключевые слова: космические аппараты, связные полезные нагрузки, наземная экспериментальная обработка, интермодуляционные продукты, контрольно-проверочная аппаратура.*

## ANALYSIS OF GROUND TESTS METODOLOGY FOR COMMUNICATION PAYLOAD

E. B. Protsenko, S. I. Ikonnikov, A. A. Sharov, A. S. Kislitsa, I. S. Nesterenko

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: sharovaa@iss-reshetnev.ru

*This article deals with existing testing methods of communication payloads in JSC "ISS". Based on the results of the analysis, proposals were made to adapt the existing set of measurements to the needs of operators of satellite communication systems.*

*Keywords: satellites, communication payloads, AIT, IMP, checkout equipment.*

Спутниковая связь широко распространена в мире и используется для создания международных и национальных сетей связи и передачи данных. Основные системные параметры спутниковой системы связи, в значительной степени, зависят от космического сегмента и, в конечном итоге, определяются высокочастотными (радиотехническими) характеристиками полезной нагрузки (далее – ПН) [1].

Классическая связная ПН представляет собой многоступенчатое радиотехническое приемопередающее устройство с антенно-фидерной системой (далее –

АФС) и преобразованием частоты (чаще всего однократным). Подробно состав ПН описан в [1].

Блок-схема связной полезной нагрузки представлена на рис. 1.

Одной из важнейших стадий создания связных ПН является экспериментальное подтверждение заданных в техническом задании (далее – ТЗ) высокочастотных характеристик. Для этого в АО «ИСС» был разработан и успешно квалифицирован на ряде проектов комплексный план наземной экспериментальной обработки (далее – НЭО) ПН.

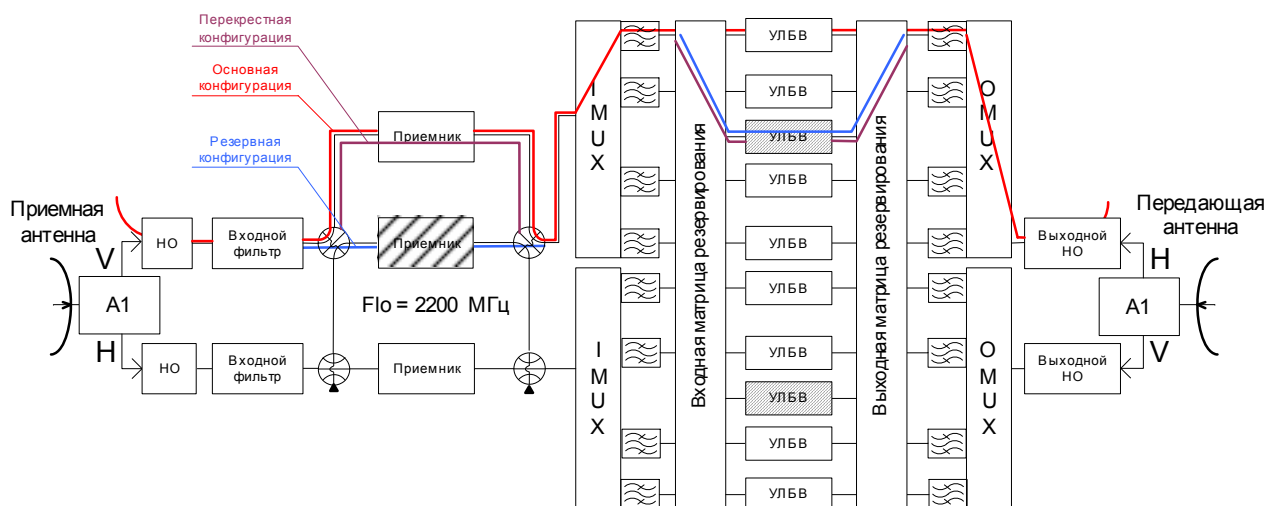


Рис. 1. Блок-схема связной ПН

Основными этапами НЭО являются:

а) автономные испытания ПН, в нормальных условиях по результатам которых выдаётся заключение об установке на космический аппарат (далее – КА);

б) испытания в составе КА (имитация участка выведения и штатных режимов работы КА), проверки высокочастотных характеристик ПН проходят на следующих подэтапах испытаний ПН в составе КА:

– электротермовакуумные испытания (далее – ЭТВИ);

– функциональные испытания ПН после механических воздействий и высокочастотные испытания (ВЧИ) в нормальных условиях.

Целью автономных испытаний является проверка высокочастотных характеристик всех стволов ПН, включая всевозможные резервы. Полученные в ходе данных проверок результаты сравниваются с расчетными, что позволяет проектировщику оценить правильность заложенных технических решений и убедиться в корректной сборке ПН. Кроме того, полученные результаты применяются в качестве опорных на последующих этапах наземной экспериментальной отработки в нормальных условиях.

На этапе ЭТВИ имитируются условия функционирования КА на орбите (начало срока активного существования (далее – САС), конец САС). Главной задачей данного вида испытаний является подтверждение способности ПН выполнять требования ТЗ в агрессивных условиях космического пространства (вакуум и широкий диапазон температур). Помимо этого, подтверждаются качество монтажа оборудования ПН на панелях КА и правильность заложенных конструкторских решений для компенсации температурных деформаций конструкции ПН.

Этапы функциональных испытаний после механических воздействий и ВЧИ характеризуются измерениями меньшего объема стволов и, главным образом, призваны подтвердить отсутствие деградации высокочастотных характеристик ПН в процессе имитации участка выведения и межцехового транспортирования КА соответственно. Дополнительно на этапе ВЧИ подтверждается выполнение требований по электромагнитной совместимости всех подсистем КА, в том числе автосовместимость ПН (подтверждается качество сборки и изготовления высокомоощных трактов ПН посредством измерения продуктов пассивной интермодуляции).

Для предъявления Заказчику используются результаты проверок радиотехнических характеристик, полученных на этапах приемо-сдаточных испытаний (ПСИ). Традиционно данный этап включает в себя ЭТВИ и ВЧИ. На ПСИ критерием успешно проведенных испытаний являются требования ТЗ, в то время как на остальных этапах НЭО за критерий успешности выбирается сходимость результатов измерений с этапами автономных испытаний и ЭТВИ.

Такое деление диктуется, по большей части, необходимостью учета особенностей измерений высокочастотных характеристик в различных внешних условиях. Так, например, измерения АЧХ, ГВЗ и частоты преобразования в нормальных условиях (этапы автономных испытаний, ВЧИ) не являются представи-

тельными для выполнения требований ТЗ. Это обуславливается вакуумным сдвигом частот в каналоборудовании из состава ПН и технической реализацией задающего генератора преобразователя частоты ПН.

Типовой перечень измерений радиотехнических характеристик на всех этапах НЭО, а также их ключевые особенности представлены в таблице.

Из данных таблицы видно, что большинство измерений проводится с использованием единичной немодулированной несущей ВАЦ.

На текущий момент современная контрольно-проверочная аппаратура (КПА) позволяет измерять радиотехнические характеристики ПН только последовательно для каждого ствола. Данное обстоятельство приводит к увеличению длительности процесса испытаний на величину временных интервалов измерений, определенных в [2]. Кроме того, согласно [3] требования по линейности амплитудной характеристики стволов ПН должны подтверждаться в режиме максимально приближенному к эксплуатационному.

Операторы спутниковых систем связи стараются эффективно использовать имеющиеся возможности связанных полезных нагрузок и загружают стволы большим количеством несущих, с выбором соответствующей рабочей точки на передаточных характеристиках выходных усилителей мощности. Кроме того, существует тенденция к увеличению количества несущих и переходу к использованию модуляций высоких порядков [4]. Таким образом, операторам систем спутниковой связи необходимо знать характеристики ПН в многосигнальном режиме для прогнозирования функционирования сетей связи.

В виду всего вышесказанного, а также по результатам анализа данных таблицы, можно сделать вывод, что результаты измерения радиотехнических характеристик не отражают в полной мере возможности ПН во время эксплуатации, так как при измерениях не учитывается одновременная работа стволов ПН с нагрузкой большим количеством несущих. В частности требуют доработки методики измерения линейности амплитудной характеристики в части увеличения количества несущих и измерения НАЧХ в части учета одновременной работы стволов ПН.

С увеличением количества несущих возрастает количество гармонических составляющих, образующихся в результате нелинейных искажений в трактах, вследствие чего происходит перераспределение мощности между полезным сигналом и паразитными комбинационными составляющими как показано на рис. 2. Таким образом, целесообразно оценивать мощность сигнала в полосе канала, а также отношение сигнал/ шум при загрузке шумоподобным сигналом (ШПС).

Оценку отношения сигнал/ шум можно провести при помощи измерений NPR (noise power ratio – коэффициент мощности шума). NPR определяется уровнем интермодуляционных продуктов при загрузке тракта ШПС. При измерении NPR объект испытаний загружается большим количеством несущих (более 100) или ШПС, с отсутствующей несущей на центральной частоте канала, как показано на рис. 3.

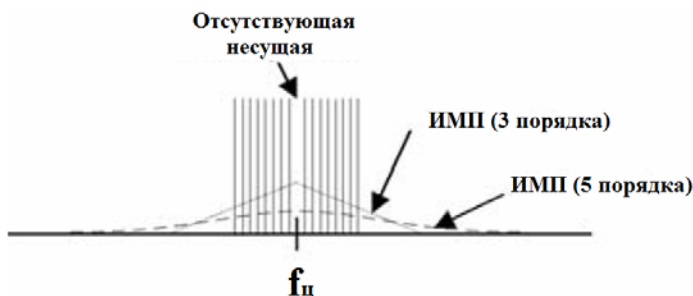
## Измеряемые радиотехнические характеристики ПН

Вид измерения	СИ <sup>1</sup>	Тип тестового сигнала	Особенность измерения
АЧХ	ВАЦ <sup>2</sup>	Единичная немодулированная несущая	Необходимость учета вакуумного сдвига частот в нормальных условиях, измерение в полосе канала
НГВЗ	ВАЦ		Результат вычисляется по выражению: $Kш(дБ) = (C/Ш)_{вх} - (C/Ш)_{вых}$ (C/Ш) <sub>вх</sub> – отношение сигнал/ шум на входе устройства; (C/Ш) <sub>вых</sub> – отношение сигнал/ шум на выходе устройства
Коэффициент шума	ВАЦ		
Фазовые шумы	АС <sup>3</sup> , генератор сигналов		На больших отстройках от несущей уровень фазового шума становится ниже собственных шумов ретранслятора
АМ-АМ характеристика с измерением точки насыщения	ВАЦ		Проводится путем изменения входной мощности на фиксированной частоте с фиксацией выходной мощности
Линейность амплитудной характеристики (продукты интермодуляции третьего порядка)	ВАЦ	Две немодулированные несущие равного уровня с отстройкой в 1 МГц	Проверка проводится на фиксированной частоте каждого канала
Режим работы режима АРУ	ВАЦ	Единичная немодулированная несущая	Измерение проходит в два этапа: 1) поиск шага насыщения ару; 2) мониторинг выходной мощности при снижении входной
Частота преобразования	АС, генератор сигналов		Косвенное измерение, результат вычисляется как разность между частотой задающего генератора и частотой на выходе ПН
Дискретная паразитная модуляция	АС, генератор сигналов		Проводится на центральной частоте канала;
Характеристики маяка	АС	–	В зависимости от объема заданных требований

Примечание: <sup>1</sup>средства измерения; <sup>2</sup>векторный анализатор цепей; <sup>3</sup>анализатор сигналов.



Рис. 2. Отношение сигнал/шум при воздействии двумя несущими



$$NPR = \frac{\text{Мощность всех ИМП в узкой полосе}}{\text{Мощность одной несущей}}$$

Рис. 3. Измерение NPR

Отношение мощности несущих к уровню интермодуляционных продуктов (ИМП) на выходе тракта и есть NPR.

Отсутствие при измерениях НАЧХ сигналов смежных по частоте каналов приводит к исключению из результатов дополнительной неравномерности в полосе пропускания измеряемого ствола из-за конечного значения избирательности общего каналообразующего оборудования ПН [5].

В целях повышения качества изготавливаемой продукции, снижения рисков, а также увеличения конкурентоспособности создаваемых АО «ИСС» ПН предлагается ввести в состав измеряемых высокочастотных характеристик на этапе НЭО следующие виды измерений:

- измерение мощности сигнала в полосе канала при загрузке шумоподобным сигналом;
- NPR;
- НАЧХ с одновременной загрузкой смежных по частоте каналов.

Данными измерениями предлагается заменить существующие измерения точки насыщения, коэффициента шума, интермодуляционных продуктов третьего порядка и НАЧХ, что не должно привести к дополнительным временным затратам.

Ведущие разработчики измерительного оборудования (R&S, Keysight) имеют готовые технические решения для реализации вышеуказанных измерений, что позволит оперативно внедрить данные типы проверок в имеющийся план НЭО с учетом доукомплектации имеющейся на АО «ИСС» КПА.

**Заключение.** В ходе анализа методик измерений было выявлено, что большинство измерений высокочастотных характеристик ПН проводятся поствольно в режиме загрузки объекта испытаний единичной немодулированной несущей, что не соответствует стандартному режиму эксплуатации. Вследствие чего предлагается адаптировать имеющийся набор измерений под режимы эксплуатации введением дополнительных измерений – НАЧХ с одновременной загрузкой смежных по частоте каналов, мощности сигнала в полосе канала при загрузке ШПС, а также NPR. Данные измерения не должны привести к общему увеличению длительности проверок и позволят потенциальному Заказчику получить информацию

о характеристиках эксплуатации ПН в многосигнальном режиме на этапе НЭО.

#### Библиографические ссылки

1. Полезные нагрузки современных спутников ФСС/РСС и тенденции их развития / Ю. Г. Выгонский [и др.] // Технологии и средства связи. Специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание – 2015». 2014. Ч. 2. № 6. С. 44–53.
2. Проценко Е. Б., Квашнин А. А., Мочалов Д. А. Анализ методов проведения испытаний высокочастотных характеристик связных полезных нагрузок // Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем : сб. тезисов IV науч.-техн. конф. молодых специалистов / АО «ИСС». 2017. С. 19–21.
3. Teresa M. Braun. Satellite communications payload and system. New Jersey : John Wiley, 2012. 369 p.
4. Fazel K., Kaiser S. Multi-carrier and spread spectrum systems. Chichester : John Wiley, 2003. 281 p.
5. Communication payload performance analysis method / Alcatel Space, 2007. 71 p.

#### References

1. Payloads of modern FSS / BSS satellites and their development trends / Y. G. Vygonkiy [et al.] // Technology and communication tools. Special edition “Satellite communication and announcement – 2015”. 2014. № 6, Part 2. P. 44–53.
2. Protsenko E. B., Kvashnin A. A., Mochalov D. A. Analyses of testing methods of radio-frequency characteristics of communication payloads // Developing, manufacturing, tests and exploitation of spacecrafts and systems. Theses collection of IV scientific and technical conference of young specialists / JSC “ISS”. 2017. P. 19–21.
3. Teresa M. Braun. Satellite communications payload and system. New Jersey : John Wiley, 2012. 369 p.
4. Fazel K., Kaiser S. Multi-carrier and spread spectrum systems. Chichester: John Wiley, 2003. 281 p.
5. Communication payload performance analysis method/ Alcatel Space, 2007. 71 p.

© Проценко Е. Б., Иконников С. И., Шаров А. А., Кислица А. С., Нестеренко И. С., 2018

УДК 621.3

**ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Д. А. Солдатов, Е. С. Солдатова, М. А. Костина, Е. М. Шульгин

АО «Научно-производственный центр «Полюс»,  
 Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Кирова, 56в  
 Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
 Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30  
 E-mail: dimasoldatov@sibmail.com

*Значительное число отказов электронных устройств связано с плохим качеством контактных соединений. Поэтому актуальной задачей является разработка методов и средств контроля переходного сопротивления контактов для исключения отказов электронной аппаратуры. Особенно важно осуществлять такой контроль для изделий ракетно-космической техники, ремонт которых невозможен в процессе эксплуатации.*

*Ключевые слова: большое переходное сопротивление, контактные соединения, предупреждение пожаров, средства диагностики.*

**ELECTRICAL CONTACT CONNECTIONS DIAGNOSTICS**

D. A. Soldatov, E. S. Soldatova, M. A. Kostina, E. M. Shylgin

JSC “Scientific and Production Center”,  
 56v, Kirova Av., Tomsk, 634050, Russian Federation  
 National research Tomsk Polytechnic University  
 30, Lenina Av., Tomsk, 634050, Russian Federation  
 E-mail: dimasoldatov@sibmail.com

*A significant number of electronic devices failures is associated with poor contact connections quality. Therefore, an urgent task is the methods development and means of monitoring the contact resistance to eliminate electronic equipment failures. It is especially important to carry out such control for rocket products and space technology, for which repair is not possible during operation.*

*Keywords: big transient resistance, contact connections, fire prevention, diagnostic tools.*

Согласно статистике в России в 2014 году случилось 29 208 пожаров вследствие нарушения правил эксплуатации электрооборудования и бытовых электроприборов, причинивших ущерб на 4 млрд рублей [1]. Одна из самых распространенных причин аварийных ситуаций – возникновение больших переходных сопротивлений электрических контактных соединений. В связи с этим их контроль в ракетно-космической отрасли является важнейшей задачей обеспечения пожаробезопасности в период непосредственной эксплуатации.

Переходные сопротивления образуются в местах соединения проводников между собой и с разъемами, печатными платами, аппаратами, приборами. Они возрастают вследствие слабого либо неплотного сжатия, малой поверхности контакта, неровностей в местах соединения и оконцевания проводов (особенно при наличии вибрации оборудования), уменьшения сечения проводов, окисления металлов. В таких случаях площадь действительного соприкосновения уменьшается, увеличивается количество выделяющегося в этом месте тепла. Возникает локальный перегрев, что может приводить к воспламенению изоляции в сгораемых элементах конструкций и, в конечном итоге, стать причиной отказа электронного уст-

ройства. Опасность больших переходных сопротивлений усугубляется тем, что их трудно обнаружить, а аппараты защиты по току не срабатывают, поскольку ток в цепи не увеличивается, а уменьшается.

Обнаруживают такие сопротивления обычно уже тогда, когда они приводят к отказу. Поэтому особое значение приобретает мероприятия, направленные на то, чтобы не допустить их появления. Это возможно при их своевременном обнаружении в контролируемой цепи и устранении причины их возникновения. Разработано множество средств и методов диагностики, позволяющих осуществлять температурный мониторинг электроустановок.

**Тепловизионный контроль** состояния электрооборудования. Это комплексный метод, позволяющий проводить поэлементную, а также общую оценку технического состояния электрооборудования в процессе его работы. Однако, несмотря на высокую точность диагностики, хорошую методическую оснащенность, для использования этого метода необходим оператор, который будет следить за состоянием оборудования в непрерывном режиме [2].

**Контактные датчики (термопары, термометры).** Они широко распространены в силу малой стоимости, но для диагностирования состояния контак-

ных соединений требуют специальных схем подключения к устройству сбора и обработки данных. Для использования этих средств в электроэнергетических системах требуется обеспечить их электроизоляцию, крепление на контактах, а также специальную сеть проводов для подключения к системе сбора данных. Такая сеть сама по себе может быть потенциальным источником коротких замыканий [3].

**Химические термоиндикаторы** однократного и многократного действия. По принципу действия они делятся на композиции, изменяющие цвет при определенной температуре, и композиции с калиброванными точками плавления. Несмотря на простоту их применения и невысокую стоимость, диагностирование перегрева контактов в электронных устройствах с их помощью ограничено. Так, использование термоиндикаторов, выполненных в виде термочувствительных красок и карандашей, требует проведения дополнительных малярных работ в корпусе электронного устройства. Кроме того, многие нормативные документы, например, Правила эксплуатации электрооборудования кораблей, запрещают окрашивать электрические контакты [4].

**Указатели перегрева** однократного действия. В них две части указателя, способные перемещаться одна относительно другой, спаиваются легкоплавким припоем, температуру которого выбирают с учетом допустимого нагрева контакта рабочим током и током короткого замыкания. При нагреве контакта до температуры, превышающей температуру плавления припоя, одна из частей указателя под действием силы тяжести отпадает. Для приведения индикатора в рабочее положение необходимо заново припаять отпадающий элемент. Вместе с тем в случае короткого замыкания возможно разбрызгивание припоя, что может спровоцировать возникновение электрической дуги.

**Датчики контактной нагрузки.** Для мониторинга контактов используются специальные болты с встроенным устройством контроля усилия затяжки, которое выполняется в виде тензодатчика, установленного в отверстии внутри болта. Изменение момента затяжки этих болтов контролируется с центрального пульта. Однако использование датчиков контактной нагрузки требует дополнительных проводников в щитах, недопустимость введения которых отмечена при рассмотрении контактных датчиков [5].

Несмотря на многообразие разработанных средств и методов температурного мониторинга электронного оборудования, по различным техническим причинам они не нашли широкого применения на практике. На сегодняшний день самыми распространенными методами являются визуальный контроль (по наличию почернения и обгорания изоляции) и ручная обтяжка всех без исключения контактов во время регламентных работ. Как правило, электротехнический персонал пренебрегает этой операцией, что может привести к аварийной ситуации [6].

Одним из путей решения этой проблемы может стать термоэлектрический контроль, при котором за счет нагревания переходного сопротивления при

плохом контакте проводников будет появляться термоЭДС. По уровню этой термоЭДС можно судить о значении переходного сопротивления контактов. Однако эта методика требует тщательной проработки для определения чувствительности и разрешающей способности метода.

#### Библиографические ссылки

1. Сведения о пожарах и их последствиях за январь – сентябрь 2014 года [Электронный ресурс]. URL: [http://www.mchs.gov.ru/activities/stats/Pozhari/2014\\_god/Svedeniya\\_o\\_pozharah\\_i\\_ih\\_posledstvijah](http://www.mchs.gov.ru/activities/stats/Pozhari/2014_god/Svedeniya_o_pozharah_i_ih_posledstvijah) (дата обращения: 28.08.2018).
2. Бажанов С. А. Тепловизионный контроль электрооборудования в эксплуатации. М. : НТФ Энергопрогресс, 2005. 144 с.
3. Бойченко В. И., Дзекцер Н. Н. Контактные соединения токоведущих шин. Л. : Энергия, 1978. 144 с.
4. Правила эксплуатации электрооборудования кораблей ВМФ (ПЭК-71). М. : Военное издательство Министерства обороны СССР, 1972.
5. Пат. 2491687 Рос. Федерация: МПК H01R4/00. Устройство для диагностики ослабления затяжки резьбового контактного соединения с токоведущим накопечником / Горшков А. И. [и др.]. № 2011141144/07 ; заявл. 11.10.2011 ; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 24.
6. Гренчук А. М., Гуменюк В. И. О возможности массового применения средств диагностики пожароопасного состояния электрооборудования // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. № 2 (195). С. 21–215.

#### References

1. Information on fires and their consequences for January–September 2014. Available at: [http://www.mchs.gov.ru/activities/stats/Pozhari/2014\\_god/Svedeniya\\_o\\_pozharah\\_i\\_ih\\_posledstvijah](http://www.mchs.gov.ru/activities/stats/Pozhari/2014_god/Svedeniya_o_pozharah_i_ih_posledstvijah) (accessed: 28.07.2013).
2. Bazhanov S. A. Thermal imaging control of electrical equipment in operation. M. : ed. NTF EnergoProgress, 2005. 144 p.
3. Boychenko V. I., Dzektsers N. N. Contact connections of busbars. L. : Energy, 1978. 144 p.
4. Rules for the operation of electrical equipment of the Navy ships (PEEK-71). M. : Military Publishing House of the Ministry of Defense of the USSR, 1972.
5. The patent 2491687 of the Russian Federation: MPK H01R4/00. A device for diagnosing the weakening of the tightening of a threaded contact connection with a current-carrying tip / Gorshkov A. I. [et al.]. № 2011141144/07 ad. 10/11/2011 ; from 08/27/2013, newsletter № 24.
6. Grenchuk A. M., Gumenyuk V. I. On the possibility of mass application of means for diagnosing the fire-hazardous state of electrical equipment // Scientific and Technical Bulletins of SPbSPU. 2014. № 2 (195). P. 21–215.

УДК 629.7

## ПОВТОРНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАБОЧЕГО ТЕЛА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ ДВИГАТЕЛЕЙ СИСТЕМ КОРРЕКЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. В. Хахленков\*, Р. С. Симанов

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

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

*Рассматриваются проблемы и перспективы вопроса повторного применения ксенона при проведении огневых испытаний двигателей систем коррекции КА. Представлен перечень решаемых вопросов для внедрения способа оптимизации затрат на отработку систем коррекции КА.*

*Ключевые слова: наземная экспериментальная отработка КА, огневые испытания, подсистема коррекции, вакуумная камера, способ оптимизации затрат.*

## REPEATED USE OF THE WORKING BODY AT FIRE TEST OF ENGINES OF SPACECRAFT CORRECTION SYSTEM

A. V. Hahlenkov\*, R. S. Simanov

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

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

*The research considers problems and perspectives of the repeated use of xenon during the fire testing of spacecraft correction system. It represents a list issues to be resolved to introduction of a method for optimizing the cost of spacecraft correction system's testing.*

*Keywords: land experimental trying out, fire test, propulsion subsystem, vacuum chamber, cost optimization method.*

АО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева» занимается созданием космических аппаратов (КА) связи, телевидения, ретрансляции, навигации, геодезии.

Неотъемлемой частью создания КА является многоступенчатая наземная экспериментальная отработка, в ходе которой проверяется функционирование сначала отдельных приборов, деталей и узлов, затем систем, а в конечном итоге и собранных спутников.

Одной из систем, подлежащих отработке, является система коррекции (СК). Её основной задачей является выработка импульса тяги для коррекции орбиты КА при выполнении маневров: приведения КА в рабочую область орбиты; удержания КА в рабочей области орбиты; перевода КА из одной рабочей области в другую (при необходимости); увод КА с орбиты в конце срока активного существования [1].

Целью отработки СК является проверка совместной работы ее составных частей. Для создания условий, максимально близких к эксплуатационным, СК, смонтированная на специальную оснастку, помещается в вакуумную камеру (ВК); затем ВК откачивается до рабочего давления (не более  $6,65 \cdot 10^{-4}$  Па), а элементы СК термостатируются в диапазоне эксплуатационных температур ( $25 \pm 15$  °С).

На КА производства АО «ИСС» им. М. Ф. Решетнева» в качестве ДУК и ДУОС применяются электро-реактивные двигатели плазменного типа, в частности СПД и КМ производства ФГУП ОКБ "Факел". Прин-

цип работы двигателей данного типа заключается в ионизации газа и его разгоне электростатическим полем. Газом, который ионизируется и разгоняется, является ксенон [2].

Целью отработки СК является проверка совместной работы ее составных частей. Для создания условий, максимально близких к эксплуатационным, система коррекции, смонтированная на специальную оснастку помещается в вакуумную камеру, вакуумная камера откачивается, а система коррекции термостатируется в диапазоне эксплуатационных температур.

За один цикл испытаний одной системы коррекции расходуется порядка полутора килограмм газообразного ксенона, при стоимости около 2 400 долларов за килограмм.

Как один из способов снижения затрат на испытания предлагается повторное использование отработавшего ксенона, который можно аккумулировать в специально разработанном или адаптированном оборудовании во время регенерации криогенных насосов.

Для того чтобы определить целесообразность установки дополнительного оборудования для сбора ксенона, предстоит решить следующие задачи:

- получить представление о теплообменных процессах в вакуумной установке;
- выяснить, как влияют методы откачки вакуумной камеры на концентрацию ксенона в объеме криогенных насосов;

- оптимизировать метод откачивания вакуумной камеры для повышения концентрации ксенона в объеме криогенных насосов;
- описать экономический эффект от использования отработавшего ксенона при испытаниях систем коррекции;

#### Библиографические ссылки

1. Чеботарев В. Е. Проектирование космических аппаратов и систем информационного обеспечения : в 2 кн. Кн. 2. Внутреннее проектирование космического аппарата / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2005. 168 с.
2. Горшков О. А., Муравьев В. А., Шагайда А. А. Холловские и ионные двигатели для космических

аппаратов / под ред. А. С. Коротева. М. : Машиностроение, 2008. 280 с.

#### References

1. Chebotarev V. E. Proektirovanie kosmicheskikh apparatov i system informacionnogo obespechenia [Design of space vehicles and information support systems]. Krasnoyarsk, Sib. Gos. Aerocosmich. Un-t., 2005. 168 p.
2. Gorshkov O. A. Hollovskie i ionnye ionnye dvigateli dlya kosmicheskikh apparatov [Hall and ionic engines for space vehicles]. Moscow, Mashinostroenie, 2008. 280 p.

© Хахленков А. В., Симанов Р. С., 2018



## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕМОВ В РАКЕТОСТРОЕНИИ

Е. О. Ширшов, Е. В. Сугак

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

*Измерение объемов баков является одним из актуальных вопросов современного ракетостроения, существует несколько способов измерения объемов. Оба способа основаны на одном принципе.*

*Ключевые слова: измерение объемов, ракетостроение, газовый метод, градуировка баков.*

## MODERN METHODS OF MEASUREMENT OF VOLUMES IN MISSILE BUILDING

E. O. Shirshov, E. V. Sugak

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

*Measuring the volume of tanks is one of the topical issues of modern rocket engineering, there are several ways to measure volumes. Both methods are based on one principle.*

*Keywords: measurement of volumes, rocket engineering, gas method, calibration of tanks.*

В настоящее время измерение объемов баков двигателей осуществляется следующими методами основанные на одном принципе, расшифрованном в ОСТ 92-1039–82 [1].

Сущность первого способа заключается в сравнении объема изделия с известным объемом мерной емкости через величины давления газа до и после прямого и обратного перепусков. Данный способ измерения имеет следующие требования к измеряемому изделию, оборудованию, помещению, применяемому газу:

– изделие должно находиться на месте измерений не менее часа;

– во время проведения измерений не допускается воздействовать на объект измерений, кроме действий, предусмотренных в технологическом процессе;

– геометрическая форма мерной емкости должна соответствовать образцовым мерникам 2-го разряда по ГОСТ 8.400–80;

– время достижения в емкости изделия и мерной емкости давления менее 7 Па должно быть не более 20 минут;

– время достижения в емкости изделия и мерной емкости давления 200 кПа должно быть не более 5 минут;

– температура в помещении должна соответствовать требованиям, указанным в инструкции по эксплуатации, в качестве рабочего газа следует применять атмосферный воздух или воздух любой категории по ОСТ 92-1577–78 при отсутствии указаний по составу газовой среды, так же допускается применение азота газообразного по ГОСТ 10157–79 [2].

В ГОСТ 8.570–2000 описаны следующие методы [3]:

– метод геометрических измерений, заключающийся в вычислении объема емкости на основании геометрических измерений;

– объемный динамический метод поверки резервуара, заключающийся в определении вместимости резервуара путем непрерывного наполнения его поверочной жидкостью и одновременных измерениях уровня, объема и температуры поверочной жидкости для каждого изменения уровня на 1 см;

– объемный статический метод поверки резервуара, заключающийся в определении вместимости резервуара путем наполнения его отдельными дозами поверочной жидкости и одновременных измерениях уровня, объема и температуры поверочной жидкости для каждого изменения уровня в пределах от 10 до 100 мм.

Использование лазерных радаров с микронной точностью повышает точность метода геометрических измерений, что позволяет использовать его в современном производстве [4; 5].

При проведении поверки емкостей допускается комбинирование методов измерений, данные комбинации повышают точность конечных измерений объемов [6].

### Библиографические ссылки

1. ОСТ 92-1039–82. Изделия отрасли. Типовые технологические процессы измерения объемов емкостей газами. М.: Изд-во стандартов, 1982.

2. ГОСТ 10157–79. Аргон газообразный и жидкий. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1979.

3. ГОСТ 8.570–2000. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Резервуары стальные вертикальные цилиндрические. Методика поверки. М.: Изд-во стандартов, 2000.

4. Координатные измерительные машины и их применение / А. А. Гапшис, А. Ю. Каспарайтис, М. Б. Модестов и др. М.: Машиностроение, 1988. 102 с.

5. Осипович Д. А., Ярушин С. Г. Выбор метода оцифровки для контроля геометрии крупногабаритных сложнопрофильных деталей и узлов авиационных двигателей // Молодой ученый. 2014. № 1. С. 103–110.

6. Electronic textbook StatSoft [Электронный ресурс]. URL: <https://edrid.ru/rid//217.015.8220.html> (дата обращения: 24.04.2018).

#### References

1. OST 92-1039–82. Izdeliya otrasli. Tipovye tekhnologicheskie processy izmereniya ob’emov emkostej gazami. M. : Izd-vo Standart, 1982.

2. GOST 10157–79. Argon gazoobraznyj i zhidkij. Tekhnicheskie usloviya. M. : Izd-vo Standart, 1979.

3. GOST 8.570–2000. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenij (GSI). Rezervuary stal’nye vertikal’nye cilindricheskie. Metodika poverki. M. : Izd-vo Standart, 2000.

4. Koordinatnye izmeritel’nye mashiny i ih primeneniye / A. A. Gapshis, A. Yu. Kasparaitis, M. B. Modestov et al. M. : Mashinostroenie, 1988. 102 p.

5. Osipovich D. A., Yarushin S. G. Vybor metoda oциfrovki dlya kontrolya geometrii krupnogabaritnyh slozhnoprofil’nyh detalej i uzlov aviacionnyh dvigatelej // Molodoj uchenyj. 2014. № 1. P. 103–110.

6. Electronic textbook StatSoft [Available at: <https://edrid.ru/rid//217.015.8220.html> (accessed: 04.24.2018)].



**Секция**

**«МАЛЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ:  
ПРОИЗВОДСТВО, ЭКСПЛУАТАЦИЯ  
И УПРАВЛЕНИЕ»**

УДК 629.7

## МОДУЛЬНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАЗЕМНОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ МАЛЫМИ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ\*

С. В. Ефремова<sup>1</sup>, В. В. Храпунова<sup>1</sup>, Л. М. Скопинцева<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>22 НИО 2 НИУ НИЦ ВА РВСН им. Петра Великого  
Российская Федерация, 143900, Московская область, г. Балашиха, ул. Карбышева, 8  
E-mail: efremova\_svet@sibsau.ru

*Проведен анализ базовых моделей формирования мультиверсионного программного обеспечения наземного комплекса управления малыми космическими аппаратами (НКУ МКА).*

*Ключевые слова: наземный пункт управления малым космическим аппаратом (НКУ МКА), программное обеспечение, мультиверсионное программирование.*

## MODULAR SOFTWARE OF THE GROUND-BASED CONTROL COMPLEX OF SMALL SPACE VEHICLES

S. V. Efremova<sup>1</sup>, V. V. Hrapunova<sup>1</sup>, L. M. Skopintseva<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>22 NIO 2 NIU NIC VA Peter The Great  
8, Karbysheva Str., Balashikha, Moscow region, 143900, Russian Federation  
E-mail: efremova\_svet@sibsau.ru

*The analysis of the basic models of the formation of multi-version software of ground-based control complex of small space vehicles has been performed.*

*Keywords: ground control station for a small space vehicle, software, multi-version programming.*

Мультиверсионная методология проектирования программного обеспечения наземного комплекса управления малым космическим аппаратом (ПО НКУ МКА) предполагает его модульную композицию. В общем случае при проектировании ПО НКУ МКА необходимо создать в соответствии с принятым критерием эффективности оптимальную программную систему при ограничениях двух типов [1].

Первый тип ограничений характеризует уровень современных знаний теории и методов решения поставленных задач, принципов построения основных функциональных алгоритмов, методов структурного построения сложных систем и технологии их проектирования.

Второй тип ограничений относится в основном к техническим параметрам средств, на которых предполагается реализовать сложную систему, и к ресурсам, которые могут быть выделены на разработку и эксплуатацию системы.

С точки зрения пользователей модульного ПО НКУ МКА одним из наиболее важных атрибутов оценки их качества является информационная производительность. Она определяется как отношение:

1) объема полезных пересылок данных при получении заданных выходных результатов к общему времени их получения (либо к общему времени обращения к внешней памяти при решении задачи);

2) среднего количества информации в элементах выходного потока данных системы управления и обработки информации к среднему времени их получения.

Необходимым уровнем достоверности функционирования НКУ МКА является достоверность информации, получаемой ее пользователями.

В качестве ограничений при решении задач синтеза оптимального модульного ПО НКУ МКА могут использоваться, кроме перечисленных выше атрибутов, такие характеристики, как состав процедур и объем каждого модуля, состав и объем информационных массивов, сложность и состав интерфейса между модулями, степень дублирования процедур и информационных элементов.

Естественными являются также технологические ограничения на объем оперативной памяти ЭВМ, число каналов, возможности передачи управления между внутри и между модулями, допустимые затраты и время разработки и внедрения модульного программного обеспечения НКУ МКА и т. д.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Соглашение от «26».09.2017 № 14.577.21.0246, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0246).

Проведенные исследования выявили основные базовые модели формирования мультиверсионного ПО НКУ МКА, каждая из которых применима к различным структурам мультиверсионного ПО НКУ МКА (от очень простой структуры к более сложной) [2].

Проведен анализ базовых моделей для различных структур мультиверсионного ПО систем НКУ МКА, позволяющих определить оптимальный метод мультиверсионного программного обеспечения при максимизации надежности ПО с ограничениями на затраты.

Модель SNR формирует оптимальный состав модулей однофункционального мультиверсионного ПО НКУ МКА без введения программной избыточности. Мультиверсионное ПО состоит из единственной программы, выполняющей одну «главную» функцию. Программа составлена из набора модулей последовательного исполнения. Доступны более чем одна версия каждого модуля, но из-за жестких ограничений по стоимости (а такой случай не должен исключаться из рассмотрения) и/или некритического характера части или всей программной системы сохранение многократных версий модулей нежелательно или невозможно. Модель, разработанная для этой ситуации, позволяет сформировать оптимальный состав набора модулей для одиночной программы, максимизируя надежность, при существующих стоимостных ограничениях, благодаря которым полная стоимость разработки остается приемлемой.

Модель SR формирует оптимальный состав модулей однофункционального мультиверсионного ПО НКУ МКА с избыточностью, когда мультиверсионное ПО НКУ МКА выполняет одну, но наиболее важную (критическую по отказоустойчивости) функцию. Отказ ПО и, следовательно, данной функции НКУ может привести к очень серьезным негативным последствиям. В такой модели отказоустойчивость программного обеспечения достигается путем введения в систему избыточных версий каждого модуля. Соответственно, ограничения на стоимость ПО, выполняющего такие функции, должны быть достаточными, чтобы позволить избыточность модулей. Цель модели SR – определить оптимальный состав модулей с учетом избыточности версий, максимизируя надежность мультиверсионного ПО НКУ МКА, не нарушая рамки стоимостных ограничений.

Модель MNR формирует оптимальный состав модулей многофункционального (К функций) мультиверсионного ПО НКУ МКА без избыточности. Программная система состоит из нескольких программ, каждая из которых выполняет свою функцию. Каждая программа содержит ряд модулей. Программы могут вызываться соответствующими функциями программной системы, а модули – любой программой [3]. Цель этой модели состоит в определении оптимального набора модулей для программ без использования избыточности таким образом, чтобы надежность мультиверсионной программной системы была максимальной при заданных ограничениях по стоимости.

Модель MR формирует оптимальный состав модулей многофункционального (К функций) мультиверсионного ПО НКУ МКА с введением избыточности. Ввиду того, что избыточность в структуре разрешена,

возможен выбор более чем одной версии для каждого модуля программной системы [3].

Для задач практического применения (большая размерность постановок, алгоритмически заданные ограничения т. д.), когда применение традиционных методов не позволяет получить приемлемый результат за реальное время, предлагается применять новые модификации алгоритмов случайного поиска (направленного случайного поиска), которые позволяют избежать указанные недостатки первоначально рассмотренных схем решения.

Отметим, что необходимость контроля корректного выполнения функции ПО требует дополнительного использования компонентов COTS-сопровождения. Однако в настоящее время это является неотъемлемой частью создаваемых высоко надежных программных систем. А для мультиверсионного ПО НКУ МКА, кроме того, гарантируется статистическая независимость различных версий модулей программного обеспечения.

Предложенные базовые модели формирования мультиверсионного ПО систем управления и обработки информации позволяют реализовать различные принципиально возможные структуры мультиверсионного одно- и многофункционального ПО с избыточностью и без избыточности с учетом его надежности и стоимости.

#### Библиографические ссылки

1. Котенок А. В. Мультиверсионная среда исполнения для отказоустойчивых программных комплексов систем управления : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01, 05.13.11 ; [Место защиты : Сиб. аэрокосмич. акад.]. Красноярск, 2009. 119 с.
2. Царев Р. Ю. Оптимизационные модели формирования мультиверсионного программного обеспечения отказоустойчивых систем управления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2007. № 9. С. 18–20.
3. Царев Р. Ю., Семенов Т. И. Формирование оптимального состава многофункциональной мультиверсионной программной системы с избыточностью // Успехи современного естествознания. 2005. № 6. С. 33–34.

#### References

1. Kotenok A. V. Multi-version execution environment for fault-tolerant program complexes of control systems: dissertation ... candidate of technical sciences: 05.13.01, 05.13.11 ; [Place of protection: Sib. aerospace. Acad. them. Acad. M. F. Reshetnev]. Krasnoyarsk, 2009. 119 p.
2. Tsarev R. Yu. Optimization models of the formation of multi-version software of fault-tolerant control systems // Devices and systems. Management, monitoring, diagnostics. 2007. № 9. P. 18–20.
3. Tsarev R. Yu., Semenko T. I. Formation of the optimal composition of a multifunctional multi-version software system with redundancy / Successes of modern natural science. 2005. № 6. P. 33–34.

© Ефремова С. В., Храпунова В. В., Скопинцева Л. М., 2018

УДК 681.5

## РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ СПУТНИКОВЫХ СИГНАЛОВ ПРИ МНОГОСТАНЦИОННОМ ДОСТУПЕ С ВРЕМЕННЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ

Б. Т. Кудабаяев, Г. С. Микишев, М. Ж. Анаров, М. А. Куцев

Акционерное общество «Республиканский центр космической связи»  
Республика Казахстан, 010000, г. Астана, ул. Джангильдина 34  
E-mail: mikishev@rcsc.kz

*Авторами предложена автоматизированная система контроля высокочастотных параметров спутниковых сигналов, организованных по технологии многостанционного доступа с временным разделением каналов.*

*Ключевые слова: контроль параметров спутниковых сигналов, многостанционный доступ с временным разделением.*

## DEVELOPMENT OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF SATELLITE SIGNALS PARAMETERS IN TIME DIVISION MULTIPLEX ACCESS CHANNELS

B. Kudabayev, G. Mikishev, M. Anarov, M. Kucev

JSC “Republican Centre of Space Communication”  
34, Zhangeldin Str., Astana city, 010000, Republic of Kazakhstan  
E-mail: mikishev@rcsc.kz

*The authors proposed an automated monitoring system for high-frequency parameters of satellite signals, organized using time-division multiple access technology. The block diagram of this system and a description of its operation are presented.*

*Keywords: satellite signal parameters control, time division multiple access.*

**Введение.** Номинальная работа земных станций спутниковой связи является необходимым условием функционирования спутниковых сетей [1].

Одной из технологий, включающих большое количество земных станций, является многостанционный доступ с временным разделением [2]. Разработка системы контроля параметров спутниковых сигналов земных станций при МДВР, является актуальной задачей.

**Обзор существующих систем контроля спутниковых сигналов.** Существующие системы мониторинга обеспечивают необходимый уровень контроля частотного спектра полезных нагрузок космических аппаратов. Однако идентификация помех в спутниковых сетях с технологией МДВР/многополосная МДВР, причиной которых являются некорректно работающие передатчики земных станций, при использовании рассмотренных систем не представляется возможным.

**Анализ проблемы.** Для измерения мощности несущих обратных каналов спутниковой сети, организованных по технологии МДВР необходимо проводить временное стробирование. Номинальная мощность канала при технологии МДВР таким образом, может определена в период времени, ограниченного тайм-слотом для данного канала.

**Автоматизированная система контроля параметров спутниковых сигналов при многостанционном доступе с временным разделением каналов.** Данная система включает следующие функциональ-

ные блоки: анализатор цифрового потока, контроллер МДВР, автоматизированное рабочее место (АРМ) станции мониторинга МДВР, анализатор спектра, коммутатор. После интеграции данной системы в главную систему мониторинга, данная система может быть названа: «система мониторинга МДВР».

Блок-схема автоматизированной системы контроля параметров спутниковых сигналов при многостанционном доступе с временным разделением каналов представлена на рисунке.

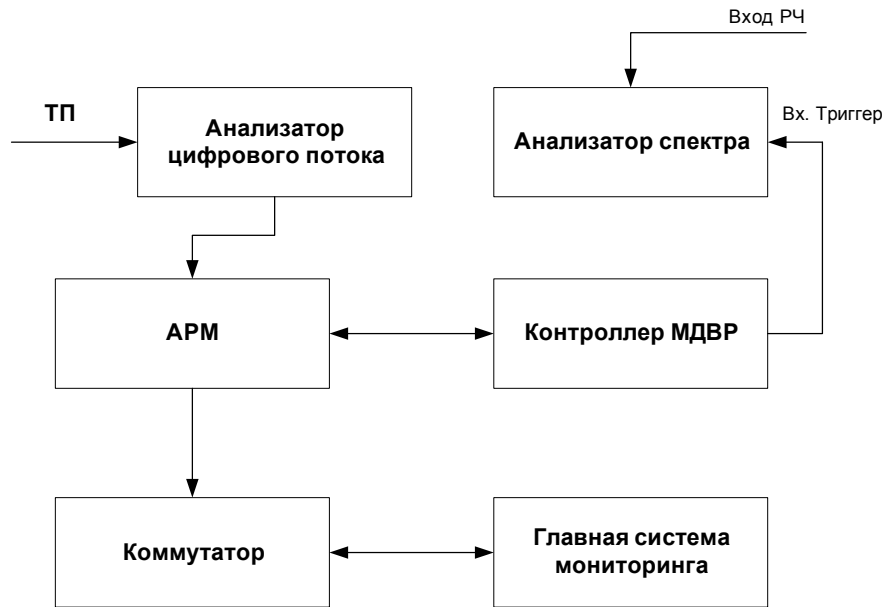
**Анализ выполнения условий реализации системы.** В системе выполняются следующие операции:

- единичные измерения тайм-слота ЗС и проведение экспресс-анализа спектра сигналов;
- выполнение серии измерений в нескольких тайм-слотах и проведение расширенного анализа сигналов;
- установление соответствия принятых сигналов идентификационным номерам земных станций спутниковой сети.

Экспресс-анализ выполняется на основе измерений, выполненных в режиме реального времени и принятых расчетных данных о задержках сигнала в наземном и спутниковом сегменте.

Расширенный анализ выполняется следующим образом.

Соответствие между сигналами, принятыми по наземному каналу связи и спутниковой линии связи осуществляется с применением корреляционного анализа.



Блок-схема автоматизированной системы контроля параметров спутниковых сигналов при многостанционном доступе с временным разделением каналов

В качестве объекта анализа принимается система количественных признаков  $X, Y$ , где в результате  $n$  независимых измерений получены пары чисел:

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n).$$

Количественный признак  $X$  включает множество чисел  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , количественный признак  $Y$  включает множество чисел  $(y_1, y_2, \dots, y_n)$ .

В рассматриваемом случае числа множества  $X$  – это интервалы  $x_i$  между временными метками начала тайм-слотов ЗССС, принятых по наземному каналу связи; числа множества  $Y$  – интервалы  $y_i$  между передними фронтами ВЧ-сигналов, принятых через спутниковую линию связи.

Репрезентативность количества  $n$  выборок значений  $x_i, y_i$  для выполнения анализа определяется временем задержки приема сигнала спутникового канала относительно сигнала, принятого по наземному каналу связи.

Величина оценки  $r$  коэффициента корреляции определяется по формуле:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

где  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ;  $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ ;  $n$  – объем выборок [3].

Значение  $r$  коэффициента корреляции выполняется для каждой серии измерений спектра в пределах времени задержки спутниковой линии  $T_{зсл}$ . Соответствие между сигналами, принятыми по наземному каналу связи и спутниковой линии связи устанавливается для серии измерений с наибольшим значением коэффициента корреляции.

В настоящих тезисах приведена структурная схема системы автоматического управления измерениями высокочастотных параметров спутниковых сигналов

передачи данных и связи при использовании технологии многостанционного доступа с временным разделением каналов.

Представлены методы, подтверждающие возможность реализации данной системы с целью повышения уровня качества эксплуатации спутниковых сетей.

#### Библиографические ссылки

1. Основы построения и эксплуатации космической системы связи и вещания. Кн. 1, специальный теоретический курс / А. А. Медведев, В. А. Меньшиков, В. Л. Иванов и др. М.: ИП Хоружевский А. И., 2005. 600 с.
2. Bernard Sklar. Digital Communications. Fundamental and Applications. Second Edition, Prentice Hall PTR, New Jersey, USA 2001. 1074 p.
3. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006. 816 с.

#### References

1. Medvedev A. A., Men'shikov V. A., Ivanov V. L. [Basics of construction and operation of the space communication and broadcasting system. Book 1, a special theoretical course]. Moscow, IE Horuzhevskij, 2005. 600 p. (in Russ.)
2. Bernard Sklar. Digital Communications. Fundamental and Applications. Second Edition. New Jersey, Prentice Hall, 2001. 1074 p.
3. Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov*. [Applied mathematical statistics. For engineers and scientists]. Moscow, Fizmatlit Publ, 2006. 816 p. (in Russ.)

© Кудабаяев Б. Т., Микишев Г. С., Анаров М. Ж., Куцев М. А., 2018

УДК 629.78

## РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ\*

В. В. Леонов, Е. Р. Салиев, Н. Н. Тютюнник, Г. А. Щеглов

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана  
Российская Федерация, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5  
E-mail: lv-05@mail.ru

*Рассмотрены вопросы, связанные с применением малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли и разработкой космической платформы, унифицированной под различную оптико-электронную аппаратуру.*

*Ключевые слова: малый космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, универсальная космическая платформа.*

## DEVELOPMENT OF UNIVERSAL PLATFORM FOR A SMALL SPACECRAFT AIMED AT EARTH REMOTE SENSING

V. V. Leonov, E. R. Saliev, N. N. Tyutyunnik, G. A. Shcheglov

Bauman Moscow State Technical University  
5, 2-nd Baumanskaya Str., Moscow, 105005, Russian Federation  
E-mail: lv-05@mail.ru

*The paper studies the aspects of small spacecrafts' utilization in Earth remote sensing. It also focuses on the development of a space platform capable of carrying various optical hardware onboard.*

*Keywords: small spacecraft, Earth remote sensing, universal space platform.*

**Введение.** В последние десятилетия наблюдается тенденция роста функциональных возможностей малых космических аппаратов (МКА) в силу постепенной миниатюризации и повышения эффективности электронной компонентной базы, элементов и блоков бортовых систем и целевой аппаратуры, что приводит к появлению возможности эффективного решения на базе МКА ряда задач, доступных ранее только тяжёлым аппаратам [1; 2]. В частности, к таким задачам относится дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ).

В настоящее время уже существует довольно большое количество МКА, оснащённых камерой или камерами ДЗЗ как панхроматическими, так и мультиспектральными [2; 3]. Это – спутники различных формфакторов, начиная с трёхюнитовых кубсатов, заканчивая предельными для этого класса аппаратами [3; 4]. Как правило, такие аппараты обеспечивают съёмку со средним разрешением и «заточены» под решение конкретных задач. Каждый из таких аппаратов по своим возможностям, в первую очередь, по количеству решаемых задач уступает аппарату тяжёлого класса, но их относительно низкая стоимость позволяет создавать группировки аппаратов схожего назначения или взаимно дополняющих друг друга.

Групповое применение МКА ДЗЗ позволяет обеспечить покрытие большой территории и высокую оперативность предоставления услуг.

Применение большого количества однотипных или схожих по функционалу и конструктиву аппаратов позволит в будущем перейти от единичного или штучного производства, характерного для предыдущего поколения космической техники, к серийному производству, позволяющему ещё больше сократить затраты на развёртывание и обновление группировки. При этом переход к серийному производству подразумевает широкую унификацию и стандартизацию, в том числе, использование модульной архитектуры и унифицированных бортовых систем, блоков, конструктивных элементов и интерфейсов. Одним из первых шагов в этом направлении – разработка и применение универсальной космической платформы (УКП).

**Универсальная космическая платформа.** Изначально в рамках проводимой работы была предпринята попытка разработки универсальной космической платформы (УКП) для МКА различных назначений, как ДЗЗ, так и, например, связи. Но анализ специфики функционирования и компоновки разной полезной нагрузки показал нерациональность такого подхода.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках мероприятия 1.3 федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (Соглашение от 26 сентября 2017 года № 14.577.21.0247, уникальный идентификатор работ RFMEFI57717X0247).



В результате чего было принято решение вести работу в направлении унификации платформы только под один тип нагрузки – камеры ДЗЗ, обеспечив возможность установки аппаратуры с различными характеристиками при минимальных изменениях в конструкции.

В качестве основной целевой нагрузки выбрана оптико-электронная аппаратура (ОЭА) высокого разрешения, включающая в свой состав 2 оптико-электронные камеры: панхроматическую и мультиспектральную.

В качестве альтернативы рассматривался вариант ОЭА среднего разрешения, включающей в свой состав 4 панхроматические камеры.

В рамках работы на данном этапе проанализированы требования по составу и характеристикам бортовых систем и рассмотрено два принципиальных подхода к построению архитектуры аппаратов.

Первый, условно «классический» основан на опыте разработчиков, полученном при создании аппаратов семейства «Бауманец» [5], и подразумевает выделение в аппарате служебного блока – космической платформы, с установкой на неё блока полезной нагрузки.

Второй – более инновационный модульный принцип, при котором аппарат создаётся из соединяемых между собой отдельных универсальных блоков, например, блок двигательной установки, блок энергетики и другие. Каждый из этих подходов имеет свои преимущества и недостатки.

#### Библиографические ссылки

1. Исследование рынка малых космических аппаратов в ретроспективе 2002–2013 гг. и с прогнозом до 2020 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://o2consulting.ru/articles/market-research-mka/> (дата обращения: 07.09.2018).

2. Данилкин А. П., Козлов В. А. Мировые тенденции развития малых спутников // Экономические стратегии. 2016. № 6. С. 136–149.

3. Спутники ДЗЗ [Сайт]. URL: <https://ecoruspace.me> (дата обращения: 07.09.2018).

4. Anderson Chad, Brunskill Chris, Guillo Corentin Small is the new big [Электронный ресурс]. URL: <https://sa.catapult.org.uk/wp-content/uploads/2016/03/Small-is-the-new-Big.pdf> (дата обращения: 07.09.2018).

5. Generic space micro platform Baumanets-2: on the verge of the launch / V. I. Mayorova [et al.] // Proc. 66th International Astronautical Congress (IAC-15). 2015. Vol. 6. P. 4584–4591.

#### References

1. *Issledovanie rynka malykh kosmicheskikh apparatov v retrospektive 2002–2013 gg. i s prognozom do 2020 g.* [Small Satellites Market Research in a Retrospective 2002–2013 and with the Forecast Until 2020]. Available at: <http://o2consulting.ru/articles/market-research-mka/> (accessed: 07.09.2018).

2. Danilkin A. P., Kozlov V. A. *Mirovyeye tendentsii razvitiya malykh sputnikov* [Global Trends in the Development of Small Satellites] // Economic strategy. 2016. № 6. P. 136–149.

3. Earth remote sensing satellites. Available at: <https://ecoruspace.me> (accessed: 07.09.2018).

4. Anderson Chad, Brunskill Chris, Guillo Corentin Small is the new big. Available at: <https://sa.catapult.org.uk/wp-content/uploads/2016/03/Small-is-the-new-Big.pdf> (accessed: 07.09.2018)

5. Generic space micro platform Baumanets-2: on the verge of the launch / V. I. Mayorova [et al.] // Proc. 66th International Astronautical Congress (IAC-15). 2015. Vol. 6. P. 4584–4591.

© Леонов В. В., Салиев Е. Р., Тютюнник Н. Н., Щеглов Г. А., 2018

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКТИВНОЙ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ ДЛЯ НАНОСПУТНИКОВ КЛАССА CubeSat

Е. С. Лепёшкина\*, В. Х. Ханов, А. В. Шахматов

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

*Описано использование активной отказоустойчивости как способа обеспечения надежности наноспутников класса CubeSat. Рассмотренный подход позволяет поддерживать работоспособность космического аппарата при отказе отдельных устройств, при этом не прибегать к большим ресурсным затратам.*

*Ключевые слова: активная отказоустойчивость, CubeSat.*

## ACTIVE FAULT TOLERANCE USING FOR CubeSat

E. S. Lepeshkina\*, V. Kh. Khanov, A. V. Shakhmatov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: klepka1111.93@mail.ru

*The article describes the use of active fault tolerance as a way to ensure the reliability of CubeSat. This approach allows maintaining the availability of the spacecraft in the event of device failures with no cost of resources.*

*Keywords: active fault tolerance, CubeSat.*

На сегодняшний день обеспечение надежности космической техники не ограничивается только традиционными методами структурного резервирования бортовых устройств. Относительно новой в данном направлении является активная отказоустойчивость [1], позволяющая поддерживать работоспособность космического аппарата (КА) при отказе отдельных устройств, при этом не прибегать к большим ресурсным затратам.

Использование активной отказоустойчивости заключается в приобретении дополнительных функций устройствами разного назначения. При отказе одного из устройств частично его функции берет на себя другое устройство, при этом не переставая выполнять собственные задачи. Такой подход позволяет сохранить полезность КА, не смотря на возможную потерю части функционала. Не маловажно, что использование активной отказоустойчивости не приводит к увеличению габаритов, веса, энергопотребления бортовой аппаратуры. Для наноспутников класса CubeSat это является значимым моментом, так как именно на них накладываются жесткие ресурсные ограничения.

Рассмотрим возможное решение для наноспутников класса CubeSat. Информационно-управляющая структура поддерживает два контура управления – от наземного комплекса управления (НКУ) и бортовых управляющих центров, к которым относят одноплатный бортовой компьютер (БК) и телекомандную систему (бортовая аппаратура командно-измерительной системы, БА КИС) [2]. Первый контур осуществляет

внешнее управление, второй – автономное. Оба центра в автономном контуре управления взаимодействуют с телеметрической системой (ТМС). Связь между ними осуществляется по сети SpaceWire [3]. Взаимодействие центров осуществляется таким образом, что они функционально дополняют друг друга, дублируют на различных стадиях полета. Элементом активной отказоустойчивости является возможность принятия блоком БА КИС на себя части функционала отказавшего блока БК. Это позволяет поддерживать хотя бы минимальную активность КА, получать данные о его состоянии и возможность по возвращению к рабочему состоянию путем коммутации электропитания БК.

Рассмотренный подход КА, основанный на двух центрах управления с возможностью дублирования основного функционала в аварийных ситуациях, удовлетворяет как жестким ресурсным ограничениям наноспутников класса CubeSat, так и требованиям по обеспечению высокой надежности космической техники.

### Библиографические ссылки

1. Тарасов А. А. Функциональная реконфигурация отказоустойчивых систем : монография. М. : Логос, 2012. 152 с.
2. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.

3. Бортовой комплекс управления для наноспутника CubeSat на базе технологии «система на кристалле» / В. Х. Ханов, А. В. Шахматов, С. А. Чекмарев, Е. С. Лепешкина // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 5. С. 403–408.

#### References

1. Tarasov A. A. *Funktsional'naya rekonfiguratsiya otkazoustoychivyykh system*. Moscow, Logos Publ., 2012. 152 p.

2. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proyektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* / Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2011. 488 p.

3. Khanov V. Kh., Shakhmatov A. V., Chekmarev S. A., Lepeshkina E. S. *Bortovoy kompleks upravleniya dlya наноспутника CubeSat na baze tekhnologii "sistema na kristalle"* [Proc. of "Journal of Instrument Engineering"]. 2018. Vol. 61, No. 5. P. 403–408.

© Лепёшкина Е. С., Ханов В. Х.,  
Шахматов А. В., 2018



**Секция**

**«ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ  
СРЕДСТВ, ТЕХНОЛОГИЙ  
И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ  
ДЛЯ МОНИТОРИНГА  
И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ»**

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРОН ДЕРЕВЬЕВ

В. В. Балтайс<sup>1</sup>, А. В. Сорокин<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>Институт физики имени академика Л. В. Киренского, Красноярский научный центр  
Сибирского отделения Российской академии наук  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/38  
E-mail: Vika.Baltajs@yandex.ru

*Представлены результаты определения параметра ориентационного порядка ветвей в кронах берёзы и сосны. Выявлено уменьшение параметра порядка от вершины к нижней границы кроны. Обсуждается влияние параметра порядка на эффективную диэлектрическую проницаемость кроны.*

*Ключевые слова: кроны деревьев, параметр порядка, эффективная диэлектрическая проницаемость.*

## DIELECTRIC PROPERTIES OF TREE CROWNS

В. В. Baltajs<sup>1</sup>, A. V. Sorokin<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>Institute of Physics named after academician L. V. Kirenskiy  
Krasnoyarsk Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
50/38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
E-mail: Vika.Baltajs@yandex.ru

*The results of determining the parameter of the orientation order of branches in the crowns of birch and pine are presented. The decrease of the order parameter from the top to the lower boundary of the crowns is revealed. The effect of the order parameter on the effective permittivity of crowns is discussed.*

*Keywords: trees, the order parameter, the effective dielectric constant.*

Сигналы навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS эффективно используются в мониторинге состояния леса [1; 2]. Лесной массив как двухкомпонентная сплошная диэлектрическая среда, включающая элементы дерева и воздух, может рассматриваться как смешанный диэлектрик. Это позволяет создать адекватную модель взаимодействия сигналов навигационных спутников с лесом, учитывающую видовые и сезонные особенности электрофизических характеристик лесных массивов.

Кроны деревьев различных видов индивидуальны по пространственному расположению ветвей. Параметром структурирования кроны является длина волны зондирующих сигналов навигационных спутников и их соотношение с характерными размерами элементов деревьев [3]. На рис. 1 приведены фотографии типичных кроны берёзы и сосны.

В данной работе представлены результаты определения параметра ориентационного порядка кроны ветвей деревьев для реальных лесных массивов сосны и берёзы. Измерены углы наклона ветвей относительно ствола для деревьев 4 возрастных групп: для берёз 11–12 и 16–18 лет, и для сосны 7–8 и 12–13 лет. Проведён расчёт ориентационного параметра порядка для верхних ярусов деревьев.

Электрофизическая модель леса как совокупность отдельных деревьев с относительно малой плотностью распределения элементов деревьев в объёме древостоя предполагает учёт диэлектрических свойств отдельного дерева и его элементов. Анизотропия древесины определяет анизотропию эффективной диэлектрической проницаемости как отдельного дерева так лесного массива в целом. В отличие от ствола дерева, имеющего вертикальную ориентацию, кроны формируются из ветвей разной ориентации относительно ствола. Анизотропные свойства древесины стволов и кроны можно считать близкими [4]. Поэтому ориентационный параметр порядка ветвей кроны необходим для корректного описания эффективной диэлектрической проницаемости кроны и древостоя в целом.

Ветви кроны отдельного дерева представляют упорядоченную систему, которую можно охарактеризовать ориентационным параметром порядка  $S$  относительно направления [5]:

$$S = \left\langle \frac{3 \cos^2 \theta - 1}{2} \right\rangle,$$

где  $\theta$  – угол между ветвями и стволом, усреднение по всему годичному ярусу ветвей.



Рис. 1. Структура крон:  
а – берёза; б – сосна

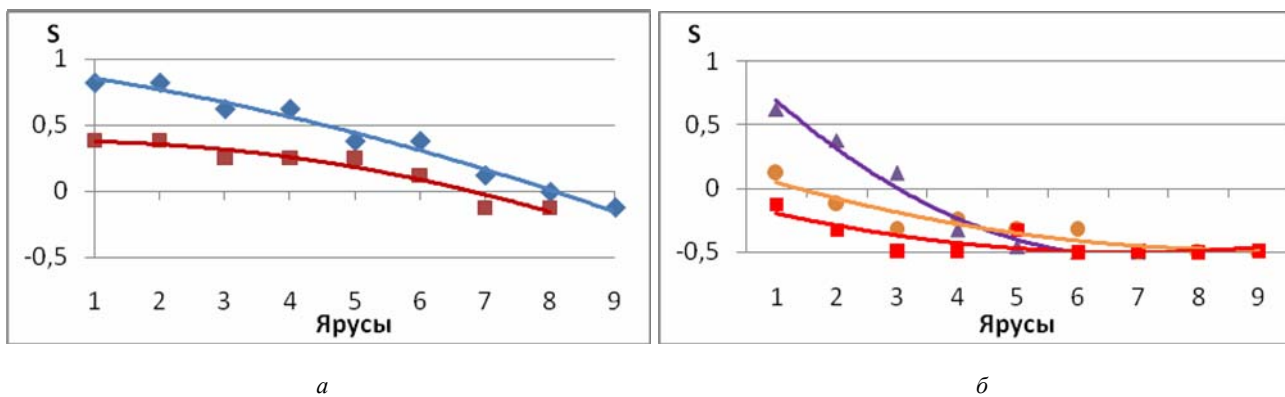


Рис. 2. Зависимость параметра порядка от ярусов крон ветвей деревьев:  
а – для берёзы 11–12 лет; б – для сосны 12–13 лет

Зависимости ориентационного параметра порядка  $S$  ветвей крон сосны и берёзы представлена рис. 2.

Экспериментальные данные о зависимости элементов тензора комплексной диэлектрической проницаемости древесины  $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$  разных видов леса от влажности и температуры для радиочастот в диапазоне  $20\text{--}10^{11}$  Гц представлены в монографии [3]. Различие диэлектрических свойств древесины наблюдается для ориентаций вектора напряженности электрического поля вдоль волокон (ствола), в радиальном и тангенциальном направлении. В практических приложениях используются элементы тензора, соответствующие продольному направлению ( $L$ ) и поперечному ( $C$ ). Анизотропия древесины характеризуется величиной  $\Delta\epsilon = \epsilon_L - \epsilon_C$ . Слой стволов с влажностью 40 % при температуре  $20^\circ\text{C}$  для берёзы на частотах порядка 1,5 Гц имеет значение анизотропии эффективной диэлектрической проницаемости древостоя  $\Delta\epsilon = 6$ . В случае равновероятной ориентации ветвей в кронах  $\Delta\epsilon = 0$ , что соответствует изотропной среде [2]. Частичная упорядоченность ветвей в кронах характеризуется параметром порядка и лежит в интервале  $0 < \Delta\epsilon < \epsilon_L - \epsilon_C$ . Пересечение слоёв стволов и крон

с известным распределением анизотропии по вертикали позволяет корректно определить комплексную эффективную диэлектрическую проницаемость слоистой модели древостоя в целом.

Использование слоистой анизотропной модели древостоя для описания трансформации поляризационных и амплитудных характеристик сигналов навигационных спутников позволяет корректно восстанавливать биометрические характеристики лесных массивов.

#### Библиографические ссылки

1. Эволюция характеристик сигналов навигационных спутников в лесу / А. В. Сорокин [и др.] // Известия вузов. Физика. 2017. Т. 60, № 12/2. С. 19–22.
2. Сорокин А. В., Подопригора В. Г., Макаров Д. С. Рассеяние сигналов навигационных спутников на пространственных неоднородностях леса // Решетневские чтения [Электронный ресурс] : материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (8–11 нояб. 2017, г. Красноярск). Ч. 1. С. 416–417.

3. Попов В. И. Распространение радиоволн в лесах. М. : Горячая линия -Телеком, 2015. 392 с.

4. Torgovnikov G.I. Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials. Springer-Verlag. 1993. 194 p.

5. Блинов Л. М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М. : Наука, 1978. 384 с.

#### References

1. Evolution of characteristics of navigation satellite signals in the forest / A. V. Sorokin [et al.] // News universities. Physics. 2017. Vol. 60, No. 12/2. P. 19–22.

2. Sorokin A. V., Podoprigora V. G., Makarov D. S. Rasseyanie signalov navigatsionnykh sputnikov na prostanstvennykh neodnorodnostyakh lesa. // Reshetnevskie

chteniya [Elektronnyy resurs] : materialy XXI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. pamyati general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M. F. Reshetneva (8–11 noyab. 2017, g. Krasnoyarsk). Ch. 1. P. 416–417.

3. Torgovnikov G. I. Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials. Springer-Verlag. 1993. 194 p.

4. Popov V. I. Rasprostranenie radiovoln v lesakh – М. : Goryachaya liniya – Telekom, 2015. 392 p.

5. Blinov L. M. Electro- and magnetooptics liquid crystals. М. : Science, 1978. 384 p.

© Балтайс В. В., Сорокин А. В., 2018

УДК 519.24

**НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ МНОГОМЕРНЫХ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН В УСЛОВИЯХ БОЛЬШИХ ВЫБОРОК\***

А. В. Лапко<sup>1, 2, а</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, 50/44

<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>а</sup>E-mail: lapko@icm.krasn.ru

*Предлагается непараметрический алгоритм автоматической классификации больших массивов статистических данных. Его синтез основан на декомпозиции исходных статистических данных и использовании ядерных оценок плотности вероятности.*

*Ключевые слова: автоматическая классификация, большие выборки, ядерная оценка плотности вероятности, дискретизация области значений многомерных случайных величин, данные дистанционного зондирования.*

**NONPARAMETRIC ALGORITHM OF AUTOMATIC CLASSIFICATION OF A MULTIDIMENSIONAL RANDOM VARIABLES IN LARGE SAMPLES**

A. V. Lapko<sup>1, 2, а</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

<sup>а</sup>E-mail: lapko@icm.krasn.ru

*A nonparametric algorithm for automatic classification of large-scale statistical data is proposed. Its synthesis is based on the decomposition of the initial statistical data and the use of kernel density estimate.*

*Keywords: automatic classification, large samples, kernel density estimate, discretization of the range of values of multidimensional random variables, remote sensing data.*

Алгоритмы автоматической классификации широко используются при создании математического обеспечения аппаратно-программных комплексов обработки данных дистанционного зондирования природных объектов. В работах [1; 2] под классом понимается множество значений случайных величин, соответствующих одномерному фрагменту плотности вероятности в пространстве признаков анализируемых объектов. Для оценивания плотности вероятности используется непараметрическая оценка плотности вероятности типа Розенблатта–Парзена.

В работе [3] обоснована возможность решения задачи автоматической классификации в рамках задачи распознавания образов с помощью итерационной процедуры последовательного непараметрического оценивания байесовских уравнений разделяющих поверхностей между классами. Цель данной работы состоит в обобщении полученных результатов на условия больших выборок с использованием методики дискретизации области значений случайных величин.

Дискретизация области значений многомерной случайной величины  $x = (x_v, v = \overline{1, k})$  позволяет ис-

ходную информацию  $V = (x^i, i = \overline{1, n})$  большого объёма  $n$  преобразовать в массив данных  $\vec{V} = (z^j, \bar{P}^j, j = \overline{1, N})$ . Здесь  $z^j$  – центр  $j$ -го интервала дискретизации;  $\bar{P}^j$  – оценка вероятности принадлежности случайной величины  $x$  этому интервалу,  $N$  – количество интервалов дискретизации.

Для восстановления плотности вероятности  $p(x)$  предложена статистика [4]

$$\bar{p}(x_1, \dots, x_k) = \frac{1}{\prod_{v=1}^k c_v} \sum_{j=1}^N \bar{P}^j \prod_{v=1}^k \Phi\left(\frac{x_v - z_v^j}{c_v}\right), \quad (1)$$

где ядерные функции  $\Phi(u_v)$  удовлетворяют условиям положительности, симметричности и нормированности, а  $c_v, v = \overline{1, k}$  – коэффициенты их размытости.

Из анализа асимптотических свойств  $\bar{p}(x)$  получена формула оптимальной дискретизации области значений многомерной случайной величины [5].

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-01-00251.



Предлагаемый алгоритм автоматической классификации основан на выполнении следующих действий:

1. Провести анализ массива данных  $\bar{V}$  и исключить информацию её элементов  $S^i$ , для которых  $\bar{P}^i = 0$ . Полученный массив преобразованных данных обозначим через  $\tilde{V}$ , количество их элементов как  $\tilde{N}$ , а множество их номеров через  $\tilde{I}$ .

2. Обнаружить элемент  $S^q$  из  $\tilde{V}$  с максимальной частотой  $\bar{P}^q = \max_{i=1, \tilde{N}} \bar{P}^i$ , который отнести к классу  $\Omega_1$ .

3. Определить множество смежных к  $S^q$  элементов  $S(q) = (S^i, i \in I_1(q))$ , ближайших к нему на расстоянии длины интервала дискретизации  $\beta_v$  по каждому признаку  $x_v$ ,  $v = \overline{1, k}$ . При этом должно соблюдаться условия  $\bar{P}^i < \bar{P}^q$ ,  $i \in I_1(q)$ ,  $i \neq q$ .

Множество элементов  $S(q)$  отнести к классу  $\Omega_1$  и положить  $\bar{P}^q = 0$ .

4. Провести анализ каждого элемента из множества  $S(q)$  по аналогии с этапом 3. Пусть элемент  $S^r$  принадлежит множеству  $S(q)$ . В соответствии с рекомендациями этапа 3 определим новые элементы класса  $\Omega_1$ .

Значения соответствующих им частот  $\bar{P}^r$  в массиве данных  $\tilde{V}$  обнуляются. Выбирается новый элемент  $S^r$  из массива  $S(q)$  и описанная процедура этапа 3 повторяется для всех его элементов.

Если на первом этапе к классу  $\Omega_1$  отнесён элемент  $S^q$ , то при реализации этапа 2 классу  $\Omega_1$  будут отнесены элементы с номерами  $I_1(q)$ . Анализ этих элементов в соответствии с используемым правилом этапа 3 позволяет определить множество номеров элементов дискретизации  $I_1\{2\}$ , которые будут отнесены к классу  $\Omega_1$ .

5. Следуя предложенной выше методике, осуществить анализ элементов дискретизации с номерами  $I_1\{2\}$ . Пусть элемент  $S^r \in I_1\{2\}$ . Тогда, используя правило классификации типа (2) при  $i \in \tilde{I} \setminus (I_1(q) \cup I_1\{2\})$ . Можно обнаружить множество элементов дискретизации пространства признаков с номерами  $I_1\{3\}$ , принадлежащих классу  $\Omega_1$ .

6. Предложенный выше процесс автоматической классификации продолжается до тех пор, пока на его  $\lambda$ -этапе множество  $I_1\{\lambda\}$  будет определено как пу-

стое. В этом случае множество элементов дискретизации  $I_1 = \left( I_1(q) \bigcup_{\varepsilon=2}^{\lambda-1} I_1\{\varepsilon\} \right)$  образует первый класс  $\Omega_1$ .

7. Исключить элементы с номерами  $I_1$  из массива данных  $\tilde{V}$ . Обозначим полученные данные через  $\bar{V}_1$ .

8. Обнаружить множество элементов дискретизации принадлежащих второму классу  $\Omega_2$ . Для этого в соответствии с этапами 1 – 6 провести анализ массива данных  $\bar{V}_2 = (x^i, \bar{P}^i, i \in I \setminus I_1)$ .

9. Процесс автоматической классификации продолжается до тех пор, пока  $\bigcup_{j=1}^M I_j = \tilde{I}$ .

### Библиографические ссылки

1. Цыпкин Я. З. Основы теории обучающихся систем. М.: Наука, 1970. 251 с.
2. Васильев В. И., Эш С. Н. Особенности алгоритмов самообучения и кластеризации // Управляющие системы и машины. 2011. № 3. С. 3–9.
3. 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.
4. Лапко А. В., Лапко В. А. Регрессионная оценка многомерной плотности вероятности и её свойства // Автометрия. 2014. Т. 50, № 2. С. 50–56.
5. Лапко А. В., Лапко В. А. Выбор оптимального количества интервалов дискретизации области значений двухмерной случайной величины // Измерительная техника. 2016. № 2. С. 14–17.

### References

1. Tsypkin Ya. Z. *Osnovy teorii obuchayushhikh sistem* [Fundamentals of the theory of learning systems]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 251 p.
2. Vasil'ev V. I., Esh S. N. [Features of self-learning and clustering algorithms]. *Upravlyayushhie sistemy i mashiny*. 2011. No. 3. P. 3–9. (In Russ.)
3. Lapko A. V., Lapko V. A., Khlopov A. N. [Non-parametric algorithm of automatic classification of statistical data]. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering]. 2011. Vol. 54, No. 4. P. 73–79. (In Russ.)
4. Lapko A. V., Lapko V. A. Regression estimate of the multidimensional probability density and its properties. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2014. Vol. 50, No. 2. P. 148–153.
5. Lapko A. V., Lapko V. A. Selection of the optimal number of intervals sampling the region of values of a two-dimensional random variable. *Measurement Techniques*. 2016. Vol. 59, No. 2. P. 122–126.

© Лапко А. В., Лапко В. А., 2018

УДК 519.7 + 004.93

## ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА АНАЛИЗА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

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, 50/44

<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

*Рассматриваются функциональные возможности программных средств обработки данных дистанционного зондирования. Основу их математического обеспечения составляют непараметрические алгоритмы принятия решений. Программные средства реализованы в среде Delphi.*

*Ключевые слова: непараметрические алгоритмы распознавания образов, проверка гипотез, оценивание состояний объектов исследования, многомерные случайные величины, ядерные оценки плотности вероятности, дистанционное зондирование.*

## SOFTWARE TO ANALYZE REMOTE SENSING DATA ON THE BASIS OF NONPARAMETRIC DECISION ALGORITHMS

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

*The functional capabilities of remote sensing data processing software are considered. The basis of their mathematical support is nonparametric decision algorithms. The software is implemented in Delphi environment.*

*Keywords: nonparametric pattern recognition algorithms, hypothesis testing, estimation of the condition of research objects, multidimensional random variables, kernel density estimation, remote sensing.*

Разработка информационных средств комплексного анализа данных дистанционного зондирования является основой создания геоинформационных систем, обеспечивающих оперативность получения требуемой информации и поддержку принятия управленческих решений. Их применение позволяет значительно повысить точность и оперативность решения задач принятия решений, что особенно актуально при освоении природных ресурсов Севера и Сибири. В данной работе предлагаются программные средства обработки данных дистанционного зондирования с использованием модифицированных непараметрических алгоритмов распознавания образов для решения задач оценивания состояний природных объектов, их пространственного отображения и проверки статистических гипотез о распределениях случайных величин.

Для реализации цели работы создан комплекс программ NSARSD (Nonparametric system for the analysis of remote sensing data), который предназначен для решения задач обработки данных дистанционного зондирования и принятия решений на основе непараметрических статистик ядерного типа. Программа реализована в среде Delphi-7 [1].

Рассмотрим функциональные возможности программных средств.

1. Первичная обработка данных дистанционного зондирования, обеспечивающая оценивание основных количественных характеристик законов распределения случайных величин (математическое ожидание и его доверительное оценивание, среднее квадратическое отклонение, коэффициенты асимметрии, эксцесса и контрэксцесса) [2].

2. Проверка гипотез о распределениях многомерных случайных величин с использованием непараметрических алгоритмов распознавания образов ядерного типа [3; 4].

3. Оценивание состояния природных объектов по спектральным данным на основе непараметрических алгоритмов распознавания образов [5; 6].

4. Пространственное распределение состояний природных объектов по данным дистанционного зондирования.

Основной исходной информацией для обработки данных дистанционного зондирования является обучающая выборка  $V = (x_1^i, \dots, x_k^i, \delta(i), i = \overline{1, n})$ , составленная из спектральных данных  $x^i = (x_1^i, \dots, x_k^i)$  элементов  $S^i$  земной поверхности и указаний  $\delta(i)$  об их принадлежности к состояниям природного объекта

(классам)  $\Omega_j$ ,  $j = \overline{1, M}$ . Классы определяют свойства элементов земной поверхности. Например, типы древостоев лесных массивов по степени усыхания и уровни влажности почвы. Выборка  $V$  используется для обучения непараметрического алгоритма распознавания образов с градациями преимущества [2]. На основе обучающей выборки  $V$  с использованием непараметрических алгоритмов распознавания образов решается задача проверки гипотез об однородности спектральных данных, принадлежащих двум произвольно выбранным классам. Для пространственного отображения состояний природных объектов по спектральным данным, содержащимся в контрольной выборке  $V' = (x_1^i, \dots, x_k^i, y^i, i = \overline{1, n'})$ . Здесь  $y^i = (y_1^i, y_2^i)$  – координаты элемента  $S^i$  земной поверхности, который характеризуется спектральными данными  $x^i = (x_1^i, \dots, x_k^i)$ . Обучающая и контрольная выборки представляются в виде таблиц Microsoft Office Excel.

В первой строке каждого столбца файла Excel должны быть указаны сокращённые названия признаков  $x$ . Остальные строки заполняются числовыми значениями признаков, а в последнем столбце для обучающей выборки определяется их принадлежность к классам. Количество классов (состояний природных объектов) ограничено значением 10. Количество используемых спектральных каналов (признаков  $x$ ) – до 15.

Интерфейс программы позволяет осуществлять эффективное управление исходными данными, последовательностью их обработки и представлением результатов решения функциональных задач.

Разработанные программные средства были использованы при оценивании состояний древостоев лесных массивов юга Красноярского края по данным дистанционного зондирования, полученных с аппарата MODIS/Terra. Каждый элемент земной поверхности характеризовался шестью спектральными признаками  $x = (x_1, \dots, x_6)$  в диапазоне длин волн (620 – 1652) нанометров.

Состояния исследуемого природного объекта  $\Omega_j$ ,  $j = \overline{1, 3}$  соответствовали темнохвойному лесу, усыхающему и сухому древостою. Оценка вероятности ошибки определения состояний древостоев лесных массивов определяется значением  $\bar{p}(\bar{c}) = 0,024$ .

Программный комплекс NSARSD v. 1.0 позволил количественно оценить принадлежность ситуации  $x = (x_1, \dots, x_6)$  к классам  $\Omega_j$ ,  $j = \overline{1, 3}$ , используя нормированные значения непараметрических оценок плотностей вероятностей  $\bar{p}_j(x)$ ,  $j = \overline{1, 3}$ .

#### Библиографические ссылки

1. 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 / А. В. Лапко, В. А. Лапко, С. Т. Им, А. В. Бахтина //

Федеральная служба по интеллектуальной собственности, 2018.

2. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрические системы обработки информации и принятия решений : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2014. 382 с.

3. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрические алгоритмы распознавания образов в задаче проверки статистической гипотезы о тождественности двух законов распределения случайных величин // Автоматика. 2010. Т. 46, № 6. С. 47–53.

4. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрические алгоритмы распознавания образов в задаче проверки гипотезы о распределениях случайных величин // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 4. С. 67–72.

5. Лапко А. В., Лапко В. А. Многоуровневые непараметрические системы обработки информации / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. 270 с.

6. Развитие и применение информационных технологий исследования природных ресурсов территорий Сибири на основе данных дистанционного зондирования / И. В. Зеньков, С. Т. Им, А. В. Лапко и др. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017. 280 с.

#### 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 No. 2018618074, 09.07.2018.

2. Lapko A. V., Lapko V. A. *Neparametricheskie sistemy obrabotki informatsii i prinyatiya reshenij* [Nonparametric information processing and decision-making systems] / Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2014. 382 p.

3. Lapko A. V., Lapko V. A. Nonparametric algorithms of pattern recognition in the problem of testing a statistical hypothesis on identity of two distribution laws of random variables. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2010. Vol. 46, No 6. P. 545–550.

4. Lapko A. V., Lapko V. A. [Nonparametric algorithms of pattern recognition in the problem of hypothesis testing on distributions of random variables]. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering]. 2011. Vol. 54, No. 4. P. 67–72. (In Russ.)

5. Lapko A. V., Lapko V. A. *Mnogourovnevye neparametricheskie sistemy obrabotki informatsii* [Multi-level nonparametric information processing systems]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2013. 270 p.

6. Zen'kov I. V., Im S. T., Lapko A. V. et al. *Razvitie i primeneniye informatsionnykh tekhnologiy issledovaniya prirodnnykh resursov territorij Sibiri na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya* [Development and application of information technologies for the study of natural resources in Siberia on the basis of remote sensing data] ; Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2017. 280 p.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ В МОНИТОРИНГЕ ЗЕМНЫХ ПОКРОВОВ

Д. С. Макаров<sup>1\*</sup>, Д. В. Харламов<sup>1</sup>, А. В. Сорокин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр»

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50

<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: ikivt@yandex.ru

*Описаны ключевые особенности дистанционного зондирования земных покровов с помощью сигналов навигационных спутников. Приведены графики зависимостей пространственно-временных характеристик ослабленных и отраженных сигналов.*

*Ключевые слова: сигналы навигационных спутников, ослабление и отражение, земные покровы.*

## USING SIGNALS OF NAVIGATION SATELLITES IN THE MONITORING OF THE EARTH COVER

D. S. Makarov<sup>1\*</sup>, D. V. Kharlamov<sup>1</sup>, A. V. Sorokin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Federal Research Center Krasnoyarsk Science Centre SB RAS

50, 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: ikivt@yandex.ru

*The key features of remote sensing of terrestrial coverings by means of signals of navigation satellites are described. The graphs of the dependences of the space-time characteristics of the attenuated and reflected signals are given.*

*Keywords: signals of navigation satellites, attenuation and reflection, earth cover.*

Сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) высокоорганизованны и позволяют в непрерывном режиме, наряду с координатными измерениями, восстанавливать в реальном времени диэлектрические параметры сред, с которыми взаимодействуют в процессе распространения [1]. Эффект многолучевости снижает точность координатных измерений, но позволяет по изменению характеристик отраженных или ослабленных средами сигналов восстанавливать значимые для практики свойства этих сред. Фактически ГНСС позволяют реализовать глобальный радиометр на рабочих частотах действующих группировок GPS, ГЛОНАСС. Периоды обращения спутников ГЛОНАСС и GPS составляют 11 ч 16 мин и 11 ч 57 мин соответственно. В течение часа приемная аппаратура регистрирует около 10 сканирующих серий сигналов, трансформируемых исследуемым объектом [2].

В общем случае сигналы ГНСС распространяются от источника к приемнику, через атмосферу, растительные покровы (рис. 1, а) или отражаются от поверхности почвы, воды и растительности (рис 1, б).

Изменения состояния поляризации и амплитуды сигналов ГНСС, возникающих при взаимодействии с поверхностью и объемом сред и учет вариаций характеристик прямых сигналов позволяют корректно вос-

станавливать эффективные значения ряда значимых для мониторинга величин. Это коэффициенты погонного ослабления сигналов в лесном пологом, коэффициенты отражения поверхностей земных покровов [3–5].

На рис. 2 приведен пример записи амплитуды сигнала аппарата GPS 17, прошедший через лесной массив. Эксперимент проводился 31.08.2018 на опытной площадке сосновых посадок. Антенный модуль, принимающий сигнал право круговой поляризации, размещался на высоте 0,7 м в точке с координатами 55°59'25.4"N 92°45'36.4"E. Ось диаграммы направленности устанавливалась вертикально вверх. Антенна находилась на расстоянии 7 м от границы древесного стоя. Расположение антенны обеспечивало регистрацию сигналов, прошедших через массив леса и свободное пространство.

На рис. 3 представлена запись прямого и отраженного от поверхности воды интерференционного сигнала, проведенного 30.07.2018 на территории озера Ши́ра (Координаты местоположения антенны – 54°30'22.8"N 90°08'56.0"E). Регистрация проводилась серийной аппаратурой МРК-32 с вертикально ориентированной дипольной антенной, установленной на расстоянии  $d = 3,2$  метра от границы воды. Высота расположения фазового центра антенны от поверхности воды  $h = 4,1$  м.

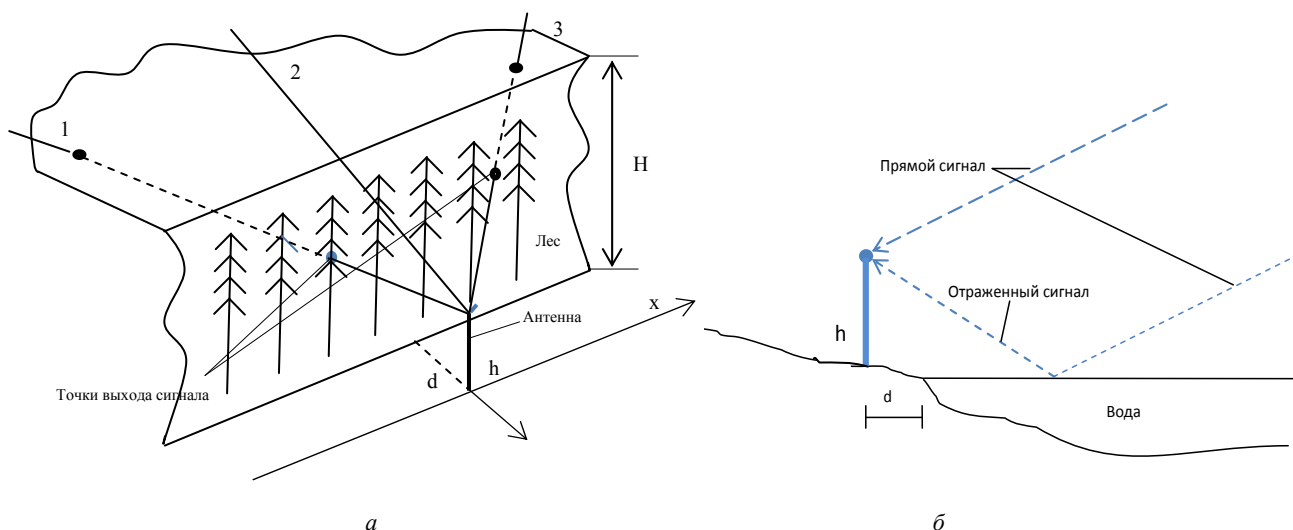


Рис. 1. Схема радиопросвечивания лесного массива (а), схема рефлектометрии водной поверхности (б)

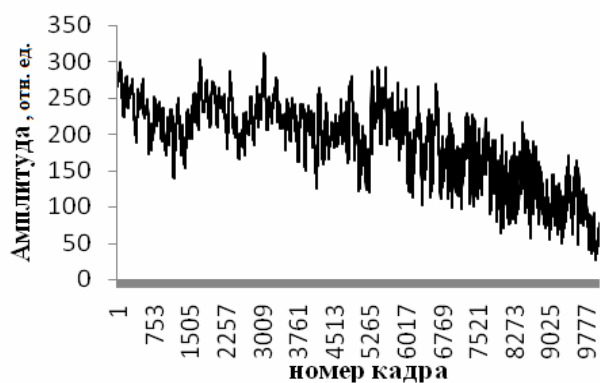


Рис. 2. Пространственно-временная зависимость сигнала спутника GPS 17, прошедшего через лесной массив

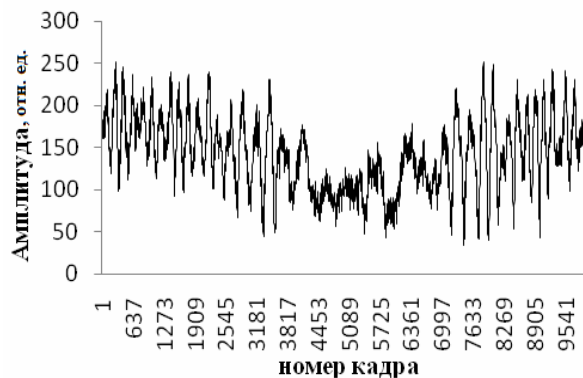


Рис. 3. Пространственно-временная зависимость сигнала спутника ГЛОНАСС 11 на экспериментальной площадке у оз. Ши́ра

Ослабление сигналов в лесном пологом позволяют рассчитать коэффициенты погонного ослабления с координатной привязкой в реальном времени, всепогодно восстанавливать эффективную диэлектрическую проницаемость и влажность.

ГНСС – рефлектометрия от поверхности воды дает возможность определять коэффициенты отражения и восстанавливать соленость воды. Это создаёт основу для разработки специализированных устройств, которые могут быть использованы в сельском, лесном, водном хозяйстве для мониторинга земных покровов в круглосуточном режиме.

#### Библиографические ссылки

1. Jin S., Cardellach E., Xie F. GNSS Remote Sensing. New York, London.: Springer Dordrecht Heidelberg, 2014. 286 p.

2. 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.

3. Попов В. И. Распространение радиоволн в лесах. М.: Горячая линия – Телеком, 2015. 392 с.

4. Сорокин А. В., Подопригора 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.

5. Фомин С. В., Сорокин А. В., Харламов Д. В. Калибровка сигналов ГЛОНАСС и GPS в мониторинге земных покровов с использованием базы данных характеристик прямых сигналов вблизи поверхности Земли // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы IV Междунар. науч. конф. (12–15 сентября 2017, г. Красноярск) / науч. ред. Е. А. Ваганов; отв. ред. Г. М. Цибульский; Сиб. федер. ун-т. Красноярск, 2017. С. 175–177.

### References

1. Jin S., Cardellach E., Xie F. GNSS Remote Sensing. New York, London : Springer Dordrecht Heidelberg, 2014. 286 p.
2. 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. Vol. 51, № 7. P. 825–830. (In Russ.)
3. Popov V. I. *Rasprostraneniye radiovoln v lesakh* [Propagation of radio waves in forests]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2015. 392 p.
4. 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.)
5. Fomin S. V., Sorokin A. V., Harlamov D. V. [Kalibrovka signalov GLONASS i GPS v monitoringe zemnih pokrovov s ispolzovaniem bazi danih karakteristi pryamih signalov vblizi poverhnosti Zemli]. *Materialy IV Mezhdunar. nauch. konf. Krasnoyarsk, 2017. P. 175–177. (In Russ.)*

© Макаров Д. С., Харламов Д. В., Сорокин А. В., 2018

## ПОВЫШЕНИЕ ДЕТАЛЬНОСТИ СПУТНИКОВОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В Г. КРАСНОЯРСКЕ

А. К. Матушко<sup>1,2</sup>, О. Э. Якубайлик<sup>1,2\*</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

\*E-mail: oleg@icm.krasn.ru

*Рассматриваются методы оценки температуры земной поверхности по данным ДЗЗ. Сочетание спутниковых данных с нескольких космических аппаратов повышает уровень детализации температурных карт. Представленные результаты показывают расположение температурных аномалий в Красноярске.*

*Ключевые слова: тепловые спутниковые снимки, остров тепла, температура поверхности Земли, инфракрасный диапазон, Landsat.*

## INCREASING THE DETAIL OF THE SATELLITE MAPPING OF THE LAND SURFACE TEMPERATURE AT KRASNOYARSK

A. K. Matuzko<sup>1,2</sup>, O. E. Yakubailik<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian Federal University  
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

\*E-mail: oleg@icm.krasn.ru

*The methods of land surface temperature estimation based on remote sensing data are considered. Combination of satellite data from several spacecraft increase the level of detail of temperature maps. The presented results show the location of temperature anomalies in Krasnoyarsk.*

*Keywords: thermal satellite images, heat island, Earth surface temperature, infrared, Landsat.*

**Введение.** Температура – один из ключевых показателей окружающей природной среды – может быть измерена наземными методами или на основе спутниковых данных. В условиях сильно разреженной и даже сокращающейся в последние годы сети наземных метеостанций спутниковое дистанционное зондирование – достойная альтернатива традиционным методам измерения температуры, которая обеспечивает получение долговременных однородных рядов данных на исследуемые территории [1].

Оценка температуры поверхности Земли методами дистанционного зондирования основана на данных теплового инфракрасного (ИК) диапазона. Существующие в настоящее время спутниковые системы обеспечивают получение данных ИК-диапазона с различной повторяемостью и уровнем детализации – от ежедневных с пространственным разрешением 1 км/пиксел до еженедельных с разрешением около 100 м/пиксел; точность измерения температуры составляет 1–2 градуса [2]. В этом контексте наиболее привлекательными выглядят данные серии спутников Landsat, благодаря совокупности технических характеристик, доступности принимаемой информации, наличию многолетнего архива наблюдений. Начиная

с 2013 г. на орбите работает спутник Landsat-8, на котором установлен сканер TIRS, выполняющий съемку в двух каналах ИК-диапазона. Регистрируемые данные ИК-каналов пересчитываются в радиояркостную температуру, которая, в свою очередь, в температуру поверхности Земли. Составной частью заключительного этапа является расчет коэффициента излучательной способности (эмиссии).

Естественным ограничением получаемых результатов является уровень детальности формируемых изображений. Упомянутый выше сканер TIRS спутника Landsat-8 имеет пространственное разрешение в ИК-диапазоне около 100 м/пиксел; этой точности явно недостаточно для подробного анализа температурных неоднородностей городской среды [3]. Одним из возможных методов решения этой проблемы является использование дополнительных спутниковых данных, более высокого разрешения.

**Материалы и методы.** В отличие от ряда других спутниковых данных, например, таких как Terra/MODIS, температуру поверхности Земли по данным Landsat нужно вычислять [4]. Исходной информацией служили архивные файлы данных Landsat-8, которые загружались с помощью сервиса EarthExplorer Геоло-

гической службы США. После распаковки из этих архивов извлекались данные TIRS – 10-го спектрального канала Landsat-8 (TIF-файл с именем, которое заканчивается '\_B10.tif'). Данные о температуре записаны в файле побайтно в условных единицах («сырые геоданные»), каждый пиксел может принимать значение в диапазоне от 0 до 215.

Чтобы получить фактическую температуру поверхности, нам нужно 1) сначала преобразовать эти условные единицы в значения излучения, приходящего на сенсор, 2) затем преобразовать эти значения на сенсоре в значения температуры на верхней границе атмосферы, и, наконец, 3) по температуре на верхней границе атмосферы определить температуру на поверхности Земли [5]. При этом существуют различные методы оценки этой температуры, они являются предметом многочисленных исследований. В частности, можно по-разному оценивать влияние атмосферы, применять различные алгоритмы атмосферной коррекции. Также различными способами можно вычислять коэффициент излучательной способности, например, на основе классификации подстилающей поверхности и назначения определенной величины коэффициента каждому классу. В другом подходе используется эмпирическая формула расчета коэффициента излучательной способности на основе вегетационного индекса NDVI; именно этот способ применялся в настоящей работе [6].

Особенностью проведенного исследования стало сочетание спутниковых данных с нескольких космических аппаратов. Используемые данные ИК-диапазона Landsat-8 не обязательно должны дополняться данными тех других каналов этого спутника, которые необходимы для расчета вегетационного индекса NDVI – можно использовать другие, более детальные снимки. В этом случае можно строить комбинированные изображения температуры поверхности более высокого разрешения, аналогично широко используемому подходу повышения детальности изображений с помощью алгоритмов «pan-sharpening». В нашем случае для расчета NDVI были использованы данные видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спутниковой группировки PlanetScope с пространственным разрешением 3 метра.

**Результаты.** В соответствии с изложенной методикой, были построены карты температуры поверхности Земли Красноярска и его окрестностей. Было обнаружено, что на территории города выделяется несколько тепловых аномальных зон разного типа – природные возвышенности, территории около крупных торгово-развлекательных центров, промышленные зоны предприятий, участки теплового загрязнения сточными водами. Был сделан вывод о том, что интенсивное излучение тепла наблюдается от объектов, сделанных из плотных материалов с высокой теплоемкостью, таких как асфальт, бетон и железобетон, камень.

Среди наиболее «горячих точек» ученые отмечают ряд территорий с хорошо поглощающей солнечную радиацию открытой «голой» почвой – Караульная гора, отдельные участки в северо-западной части города. Аномалии, связанные с застройкой, формируются возле торгово-развлекательных центров и в промышленных кварталах. Например, на территории возле железнодорожного вокзала и неработающего комбайнового завода.

Тепловые аномалии на правом берегу Енисея наблюдаются в районе промышленной зоны: Красноярский машиностроительный завод, ТЭЦ-1, Сибирский завод тяжелого машиностроения. В Советском районе, расположенном на левом берегу, максимальные температуры преобладают в промышленной зоне города, а также в местах скопления торгово-развлекательных центров, а именно возле ТРЦ «Планета», гипермаркета «Лента», ТРЦ «Июнь», автосалон, ТЦ «Авиатор» и ТК «Командор».

**Выводы.** Использование сочетания спутниковых данных различного пространственного разрешения дает возможность проведения более детального анализа температурных аномалий городской среды. Такая информация может быть использована при планировании развития города, освоении новых территорий, реконструкции жилых и производственных зон, для оценки комфортности условий жизни в различных городских районах.

## References

1. Stone Jr., Rodgers M. O. Urban Form and Thermal Efficiency: How the Design of Cities Influences the Urban Heat Island Effect // *APA Journal*. 2001. Vol. 67, No. 2. P. 186–198.
2. Niclos R., Valiente J.A., Barbera M. J., Caselles V. Land Surface Air Temperature Retrieval from EOS-MODIS Images // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2014. Vol. 11, No. 8. P. 1380–1384.
3. Stathopoulou M., Cartalis C. Downscaling AVHRR land surface temperatures for improved surface urban heat island intensity estimation // *Remote Sensing of Environment*. 2009. Vol. 113. P. 2592–2605.
4. Giannini M. B., Belfiore O. R., Parente C., Santamaria R. Land Surface Temperature from Landsat 5 TM images: comparison of different methods using airborne thermal data // *Journal of Engineering Science and Technology*. 2015. P. 83–90.
5. Weng Q., Lu D., Schubring J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies // *Remote Sensing of Environment*. 2004. Vol. 89. P. 467–483.
6. Matuzko A. K., Yakubailik O. E. Remote sensing methods for estimation of urban heat islands on the example of Krasnoyarsk city // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM-2018 Conference Proceedings*, 2018. Vol. 18, iss. 2.3. P. 167–174.



УДК 519.6+004.4:504.05

## ПРИБОРНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ ПЫЛЬЮ НА БАЗЕ БПЛА

А. В. Токарев

Институт вычислительного моделирования СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
E-mail: tav@icm.krasn.ru

*Рассматривается разработка прибора для оценки уровня загрязнения атмосферы мелкодисперсной пылью (PM) на базе квадрокоптера DJI Phantom 3, что позволяет выполнять измерения на разных высотах и в труднодоступных местах.*

*Ключевые слова: экологический мониторинг, загрязнение атмосферы, взвешенные частицы, мелкодисперсная пыль, PM2.5, БПЛА.*

## DRONE BASED DEVICE FOR EVALUATION OF FINE PARTICULATE AIR POLLUTION

A. V. Tokarev

Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
E-mail: tav@icm.krasn.ru

*This article describes developing of drone-based device for measuring the pollution level of the atmosphere with fine dust (PM). The unit allows performing measurements at different heights and in hard-to-reach places.*

*Keywords: environmental monitoring, air pollution, particulate matter, PM2.5, drone.*

Твердые частицы относятся к наиболее распространенным загрязняющим веществам, поступающим в атмосферный воздух городов в основном в результате выбросов предприятий теплоэнергетики и автотранспорта. Наиболее опасной для здоровья является мелкая фракция – частицы PM2.5 (частицы с диаметром менее 2,5 мкм) и PM10 [1].

Системы мониторинга состояния загрязнения атмосферного воздуха в настоящее время создаются и внедряются во многих городах мира как за рубежом, так и в России. Одним из последних трендов стало внедрение веб-ориентированных решений, основанных на распределенной сети относительно дешёвых датчиков [2; 3]. В Институте вычислительного моделирования (ИВМ СО РАН) так же ведутся исследования и разработки программно-аппаратного обеспечения для мониторинга загрязнения атмосферы [4]. Для города Красноярска, попавшего в список наиболее загрязнённых городов страны, является актуальным получение объективной информации о закономерностях распространения и рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере города.

Существующие решения направлены в основном на проведение мониторинга у поверхности земли со стационарным размещением датчиков или на транспортных средствах. Однако представляет интерес получение данных о распределении концентрации примесей в атмосфере на разных высотах, а также выполнение измерений в труднодоступных местах. Развитие

технологий зондирования с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) позволит не только получить значительный объем качественных данных для исследований, но и позволит проводить валидацию данных на новом уровне [5].

Для решения поставленной задачи предлагается прототип прибора для оценки загрязнения атмосферы мелкодисперсной пылью на базе популярной модели квадрокоптера DJI Phantom 3 (см. рисунок). Основные характеристики БПЛА: рама – 350 мм, вес – 1280 г, скорость подъема – до 5 м/с, горизонтальная скорость – до 15 м/с, высота полета – до 6000 м, время полёта – до 23 мин. Поддерживается как ручное управление полетом с пультом, так и интеллектуальные режимы полета по заданному маршруту.

Аппаратное обеспечение разработанного прибора построено на базе платы WeMos D1 Mini. Это платформа для разработки устройств на основе WiFi модуля Ai-thinker ESP-12E со встроенным микроконтроллером Espressif ESP8266 и микросхемой flash-памяти 4МБ. Для микроконтроллера была разработана внутренняя микропрограмма на языке Wiring в среде Arduino IDE.

В качестве измеряющего элемента для определения концентрации взвешенных частиц в воздухе выбран модуль PMS7003 – универсальный цифровой датчик компании Plantower [5]. В основе работы датчика лежит измерение рассеивания лазерного излучения на взвешенных частицах.



Внешний вид прибора и его отдельных элементов

Текущие метеоусловия (атмосферное давление, температура и влажность) регистрируются с помощью цифрового датчика на основе чипа Bosch BME280. Для определения географических координат и высоты использован GPS модуль с керамической антенной U-blox NEO-6M. Текущий режим работы и показания датчиков выводятся на OLED дисплее. Сохранение данных выполняется в CSV формате на карту памяти microSD с заданным периодом. Для настройки прибора и выбора режимов работы используется веб-интерфейс, который доступен при подключении по сети Wi-Fi.

На этапе предварительного исследования устройство собиралось и отлаживалось на макетной плате, в дальнейшем прототип был собран в компактном корпусе с креплением к подвесу квадрокоптера и питанием от его основного аккумулятора. Размер устройства (без модуля крепления): 76×76×30 мм, вес: 115 г.

На основе доступных комплектующих собран прототип прибора для измерения уровня загрязнения атмосферы мелкодисперсной пылью PM1, PM2.5, PM10, а также давления, влажности и температуры. Размещение его на БПЛА позволяет выполнять измерения на разных высотах и в труднодоступных местах. Замеры выполняются с заданным периодом, при этом сохраняется привязка данных к географическим координатам, высоте и времени. Устройство находится в опытной эксплуатации, выполнено несколько успешных тестовых полетов.

#### Библиографические ссылки

1. Рекомендации ВОЗ по качеству воздуха, касающиеся твердых частиц, озона, двуокиси азота и двуокиси серы. Глобальные обновленные данные. Всемирная организация здравоохранения. Женева, Швейцария, 2006. 27 с.

2. Review on WSN Based Outdoor Air Pollution Monitoring System / S. M. Godase, P. M. Korake, V. V. Navarkhele et al. // International Journal Series in Engineering Science. 2016. Vol. 2, No. 5. P. 1–13.

3. An integrated low-cost road trac and air pollution monitoring platform for next citizen observatories / A. Zaldei, F. Camilli, T. de Filippis et al. // Transportation Research Procedia 24, 2017. P. 531–538.

4. Якубайлик О. Э., Кадочников А. А., Токарев А. В. Геоинформационная веб-система и приборно-измерительное обеспечение оперативной оценки загрязнения атмосферы // Автометрия. 2018. Т. 54, № 3. С. 39–46. Doi: 10.15372/AUT20180305.

5. Вторый В. Ф., Вторый С. В. Перспективы экологического мониторинга сельскохозяйственных объектов с использованием беспилотных летательных аппаратов // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства, 2017. Вып. 92. С. 158–166.

6. The Plantower PMS5003 and PMS7003 Air Quality Sensor experiment [Электронный ресурс]. URL: <http://aqicn.org/sensor/pms5003-7003/> (дата обращения: 01.09.2018).

#### References

1. WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005: summary of risk assessment. Geneva: World Health Organization, 2006. P. 20.

2. Review on WSN Based Outdoor Air Pollution Monitoring System / S. M. Godase, P. M. Korake, V. V. Navarkhele et al. // International Journal Series in Engineering Science, 2016. Vol. 2, No. 5. P. 1–13.

3. An integrated low-cost road trac and air pollution monitoring platform for next citizen observatories / A. Zaldei, F. Camilli, T. de Filippis et al. // Transportation Research Procedia 24, 2017. P. 531–538.

4. Yakubailik O. E., Kadochnikov A. A., Tokarev A. V. Web Geographic Information System and the Hardware and Software Ensuring Rapid Assessment of Air Pollution. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2018. Vol. 54, No. 3. P. 39–46.

5. Vtoryi V. F., Vtoryi S. V. Prospects for Environmental Monitoring of Agricultural Facilities Using Unmanned Aerial Vehicles. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktii*

*rasteniievodstva i zhivotnovodstva* [Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock products], 2017. Iss. 92. P. 158–166 (In Russ.).

6. The Plantower PMS5003 and PMS7003 Air Quality Sensor experiment. Available at: <http://aqicn.org/sensor/pms5003-7003/> (accessed: 01.09.2018).

© Токарев А. В., 2018

УДК 004.4, 519.688

## ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

О. Э. Якубайлик

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79  
E-mail: oleg@icm.krasn.ru

*Рассматриваются основные тренды развития современных систем дистанционного зондирования Земли. Отмечается резкий рост объемов и уровня доступности получаемой спутниковой информации. Высокопроизводительная вычислительная техника и системы хранения данных стали основой нового поколения систем ДЗЗ.*

*Ключевые слова: спутниковые данные, геопортал, веб-сервис, веб-картография, дистанционное зондирование, пространственные метаданные.*

## THE FEATURES OF MODERN DATA PROCESSING SYSTEMS FOR REMOTE SENSING

O. E. Yakubailik

Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
Siberian Federal University  
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
E-mail: oleg@icm.krasn.ru

*The main trends in the development of modern systems of Earth remote sensing are considered. There is a sharp increase in the volume and availability of satellite information. High-performance computing and data storage systems are the basis of a new generation of remote sensing systems.*

*Keywords: satellite data, geoportal, web service, web mapping, remote sensing, spatial metadata.*

В настоящее время возможности спутниковых систем наблюдения Земли используются для решения достаточно большого числа научных и прикладных задач. В последние годы одной из наиболее значимых сфер их применения стало создание различных специализированных информационных систем дистанционного мониторинга, ориентированных на постоянное получение информации о различных процессах, явлениях и объектах [1; 2].

Обобщая схему организации процессов обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) можно считать достаточно устоявшейся; основные блоки процедур обработки и анализа данных включают прием и архивацию, первичную и тематическую обработку [3]. Если на первых этапах развития систем мониторинга при построении конкретной системы в ней приходилось реализовывать все этапы обработки данных ДЗЗ и полностью создавать для этого специальную инфраструктуру, то в настоящее время более эффективным и целесообразным с разных точек зрения считается использования специализированных центров хранения, обработки и анализа данных [4; 5].

Стоит отметить, что в области, связанной с использованием спутниковых данных дистанционного

зондирования Земли (ДЗЗ) при решении различных научных и прикладных задач, в настоящее время происходят существенные изменения:

Резко возросли возможности спутниковых систем ДЗЗ. За счет увеличения числа космических аппаратов ДЗЗ выросла частота и объемы информации, которая может поступать в систему дистанционного мониторинга. Это привело к тому, что стало возможно организовывать мониторинг быстро протекающих процессов. За последние 4 года число спутников увеличилось на порядок, существенно возросла доступность данных высокого разрешения (до 3 м/пиксел).

Возросло число спутниковых систем ДЗЗ, обладающих «измерительными» свойствами, т. е. обеспечивающих получение не только качественной, но и хорошо калиброванной количественной информации о различных объектах, процессах и явлениях. Эти данные обеспечивают возможность построения точных прогнозов развития различных процессов и явлений, необходимых для оперативной реакции на них.

Повысился уровень доступности информации. Данные многих спутниковых систем стали свободно распространяться – как через сеть Интернет, так и непосредственно со спутников, в незашифрованном

виде. Стало более рентабельно использовать спутниковую информацию, чем развивать наземные и авиационные системы наблюдения.

Значительный рост объемов спутниковой информации и развитие требований и стоимости систем их приема и первичной обработки привели к усилению тенденции перехода от использования персональных систем обработки ДЗЗ к сервис-ориентированным решениям на основе региональных специализированных центров ДЗЗ [6].

Доступность информации ДЗЗ и рост ее объемов привел к необходимости существенно улучшить технологии работы с данными ДЗЗ в плане повышения уровня автоматизации процессов получения и обработки данных, оптимизации ведения собственных архивов данных и использования возможностей внешних систем, обеспечивающих ведение сверхбольших архивов спутниковых данных и предоставляющих различные вычислительные ресурсы для работы с ними [7].

Появились новые информационно-вычислительные технологические возможности, позволяющие организовать принципиально новые схемы работы с данными ДЗЗ, в том числе эффективно работать с распределенными сверхбольшими архивами и различными вычислительными ресурсами в региональных специализированных центрах ДЗЗ [8].

Существенное расширение задач, решаемых системами спутникового мониторинга, и числа задействованных в их работе специалистов формирует потребность в создании новых доступных инструментов работы со спутниковыми данными и различными информационными продуктами, получаемыми на их основе, позволяющими использовать и возможности различных распределенных вычислительных ресурсов [9].

Наряду с экстенсивным развитием спутниковых систем ДЗЗ в последнее десятилетие наблюдается и достаточно резкий рост объемов спутниковых данных, получаемых с отдельных космических аппаратов, а также номенклатуры и суммарных объемов информационных продуктов, формируемых на основе обработки этих данных, т. е. скорость роста объемов информации превышает скорость роста числа систем ДЗЗ [10]. Так, например, объемы архивов данных ДЗЗ в NASA (National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства США – ведомство, отвечающее за гражданскую космическую программу) и NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, Национальное управление океанических и атмосферных исследований США – занимается различными видами метеорологических и геодезических исследований и прогнозов, изучением мирового океана и атмосферы), накапливаемые за год, увеличились более чем на порядок: от почти 1 Петабайта в 2000 г. до более 10 Петабайт в 2011 г., хотя число спутников ДЗЗ увеличилось за это время не более чем в 6 раз. Ввод новых данных ДЗЗ в систему архивации в 2018 г. по планам NOAA составит 20 петабайт/год, а общий их объем – более 100 Петабайт. При этом объем данных из расчета на один спутник вырастет в 100 раз. Аналогичные планы

по наращиванию группировки ДЗЗ и быстрому росту объемов информации ДЗЗ приняты к реализации и в России (Федеральная космическая программа России на 2016–2025 годы).

Таким образом, мы видим, что в сфере работы с данными ДЗЗ и связанными с ними технологиями в последние годы произошли серьезные изменения. Для обеспечения в сложившейся ситуации максимальной эффективности работы региональных систем дистанционного мониторинга необходимо усовершенствовать схемы работы с данными и разработать новые методы и инструменты для их реализации.

Инфраструктурной основой этих исследований и разработок должны стать современные комплексы компьютерного оборудования – высокопроизводительной вычислительной техники и средств хранения данных.

## References

1. Xu W., Shao J., Yu W., Feng P. Land observing satellite data center: Big data challenges and a potential solution // *Geomatics and Information Science of Wuhan University*. 2017. Vol. 42, № 1. P. 7–13.
2. Casu F., Manunta M., Agram P. S., Crippen R. E. Big Remotely Sensed Data: tools, applications and experiences // *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 202. P. 1–2.
3. Kashnitskii A. V., Lupyay E. A., Balashov I. V., Konstantinova A. M. Technology for designing tools for the process and analysis of data from very large scale distributed satellite archives // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2017. Vol. 30, № 1. P. 84–88.
4. Boyd D., Crawford K. Critical questions for big data: Provocations for a cultural, technological, and scholarly phenomenon // *Information Communication and Society*. 2012. Vol. 15. № 5. P. 662–679.
5. Craglia M. et al. Digital Earth 2020: Towards the vision for the next decade // *International Journal of Digital Earth*. 2012. Vol. 5, № 1. P. 4–21.
6. Yakubailik O. E., Kadochnikov A. A., Tokarev A. V. Web geographic information system and the hardware and software ensuring rapid assessment of air pollution // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2018. № 54 (3). P. 243–249.
7. Shaparev N., Yakubailik O. Usage of web mapping systems and services for information support of regional management // *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 79. No. 01081.
8. Gorelick N. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 202. P. 18–27.
9. Yakubailik O., Kadochnikov A., Tokarev A. Applied software tools and services for rapid web GIS development // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM-2015*. Vol. 1 (2). P. 487–494.
10. Riggs G. A., Hall D. K., Román M. O. Overview of NASA's MODIS and Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) snow-cover Earth System Data Records // *Earth System Science Data*. 2017. Vol. 9, № 2. P. 765–777.



**Секция**  
**«ЭКСПЛУАТАЦИЯ И НАДЕЖНОСТЬ  
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ»**

УДК 621.396.932.1

## ВНЕДРЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ «ГОНЕЦ» В ПРОЦЕСС МОНИТОРИНГА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

А. Р. Акзигитов\*, А. С. Андронов

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

\*E-mail: aakzigitov88@mail.ru

*Рассмотрена отечественная спутниковая навигационная система, которая обладает рядом преимуществ в сравнении с зарубежными аналогами.*

*Ключевые слова: Гонец, ГЛОНАСС, GPS, устройство мониторинга, GSM, передача телеметрических данных.*

## INTRODUCTION OF THE DOMESTIC SATELLITE COMMUNICATION SYSTEM "GONETS" IN PROCESS OF AIRCRAFT MONITORING

A. R. Akzigitov\*, A. S. Andronov

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

\*E-mail: aakzigitov88@mail.ru

*In this work the domestic navigation satellite system which has a number of advantages in comparison with foreign analogs will be considered.*

*Keywords: GPS, GLONASS, Iridium, monitoring device, GSM, telemetry data transmission.*

Система спутниковой связи «Гонец» предназначена для глобального обмена различными видами информации с ракетно-космической техникой, а также организации каналов ретрансляции в различных целях.

«Гонец» обеспечивает связью зоны, которые находятся вне покрытия наземными сетями GSM, предоставляет связную среду для российской системы координатно-временного обеспечения ГЛОНАСС и связь со стационарными и мобильными абонентами, находящимися в труднодоступных регионах. Реализована передача пакетированных данных/ сообщений как между абонентами системы, так и с абонентами сетей общего пользования. Оборудование и программное обеспечение космических аппаратов и абонентских терминалов спроектировано таким образом, что для работы системы не требуется непрерывное нахождение абонентов в зоне радиовидимости космического аппарата. При отсутствии совместной зоны радиовидимости абонентских терминалов и космических аппаратов сообщение буферизуется и передаётся при пролёте одного из КА системы над абонентом [1].

В данное время на базе системы «Гонец» реализованы следующие услуги:

- обмен сообщениями между абонентами системы в глобальном масштабе;
- передача данных о местоположении объектов, полученных с использованием системы ГЛОНАСС;
- обмен сообщениями между абонентами системы и абонентами внешних сетей в глобальном масштабе;
- циркулярная передача сообщений группе пользователей;

– передача телеметрической информации контролируемых объектов.

Данные передаются в системе как без задействования наземного сегмента (точка-точка: абонент-КА-абонент), так и с задействованием региональных станций (абонент-КА-региональная станция). Региональные станции обеспечивают маршрутизацию сообщений, а также информационный обмен абонентов с сетью Интернет [2].

При нахождении передающего и принимающего терминалов в зоне радиовидимости одного КА время доставки сообщения составляет 1–2 минуты. Время ожидания сеанса связи абонентом на территории России для системы с 12 КА составляет от 0 (на северной границе) до 15 минут (на южной границе России).

Каналы подвижной спутниковой связи «Гонец» используются в сетях М2М, где есть необходимость передавать телеметрические данные из удаленных мест, не охваченных наземными сетями связи. Со спутника «Гонец» М2М данные передаются на региональную станцию «Гонец», отсюда – в сеть Интернет [3].

Использование спутниковых каналов системы «Гонец» в построении М2М сетей добавляет неограниченную масштабируемость в индустриальные системы, где контрольная аппаратура разнесена по обширной территории, не имеющей связной инфраструктуры.

Важным фактором является компактность терминалов и антенн «Гонец», что позволяет устанавливать оборудование в различных пространственных условиях.

Услуга предоставляется с использованием абонентского терминала «Гонец», работающего в необслуживаемом режиме. Терминал стыкуется с контроллером системы пользователя и выполняет автоматическую передачу М2М данных через спутниковую сеть «Гонец».

Для обеспечения сбора и передачи данных предлагается использовать спутниковый телеметрический терминал «Гонец Д1-М». Терминал «Гонец Д1-М» предназначен для установки на транспортное средство.

Он регистрирует местоположение, скорость и направление движения ТС. Навигационная задача может решаться в глобальной навигационной системе ГЛОНАСС или в глобальной системе позиционирования GPS, а также одновременно в двух системах. Терминал может использоваться на любых видах стационарных и подвижных объектов и транспортных средств. На данный момент терминал получил широкое распространение в сфере морского транспорта, однако функционально может быть использован в сфере воздушного транспорта

Экспериментальная бортовая система будет представлять собой: спутниковый терминал Гонец Д1-М с антеннами спутниковой и сотовой связи. Для обеспечения работы системы необходимо подключение к бортовой сети постоянного тока 12В [4].

После включения питания терминал осуществляет поиск спутников ГЛОНАСС и GPS, определяет свое местоположение, скорость, время, напряжение на входах, снимает показания с датчиков и устанавливает соединение с сервером.

При установлении соединения терминал с заданной периодичностью передает мониторинговую информацию на сервер. В зонах, где нет покрытия сети GSM, данные будут передаваться в сети Иридиум по каналу SBD, а также они могут быть продублированы при появлении сигнала GSM. Если соединение с сервером по каким-либо причинам не установлено, вся информация сохраняется в энергонезависимую память терминала и передается, как только восстановится связь.

Маршрут движения фиксируется в виде отдельных точек во времени, в которых записывается вся информация, поступающая на терминал от датчиков и дополнительного оборудования. Точка маршрута сохраняется при возникновении хотя бы одного из следующих событий: отклонение от заданного угла направления движения, истечение времени периода постановки точки при движении, возникновение события на аналоговых и дискретных входах, а также изменение статуса устройства.

Данные о положении объекта в пространстве и сведения о состоянии работы летательного аппарата собираются и отправляются единым пакетом данных через сети GSM или Гонец в диспетчерский центр [5].

В данной работе были рассмотрены преимущества внедрения спутниковой навигационной системы Гонец в авиационную сферу с целью мониторинга воздушных судов. Малогабаритные характеристики терминала, аутентификация абонентов при доступе к каналу, стопроцентная зона покрытия территории Российской Федерации – все это говорит о преимуществах использования данной системы, которая обеспечивает бюджетную персональную связь на любой местности.

Для обеспечения мониторинга ВС предлагается использовать СЗС «Гонец Д1-М», используемая в настоящее время в сфере морского транспорта. Данная система позволит обеспечить непрерывный мониторинг воздушного судна в любой точке России.

### Библиографические ссылки

1. Применение систем спутникового мониторинга транспортных средств, для обеспечения эффективности логистических процессов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rae.ru/forum2012/21/2998> (дата обращения 12.08.2018).
2. Применение ГЛОНАСС/GPS мониторинг транспорта [Электронный ресурс]. URL: [W8http://gigabaza.ru/doc/49862.html](http://gigabaza.ru/doc/49862.html) (дата обращения: 12.08.2018).
3. Мониторинг Транспорта [Электронный ресурс]. URL: <http://monitoringtransporta.ru> (дата обращения: 12.08.2018).
4. Громаков Ю. А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи. М. : Эко-Трендз, 1997. 239 с.
5. Система спутниковой связи Иридиум [Электронный ресурс]. URL: <http://www.marsat.ru/Technologies-Iridiumnetwork> (дата обращения: 12.08.2018).

### References

1. Primenenie sistem sputnikovogo monitoringa transportnyh sredstv, dlja obespechenija jeffektivnosti logisticheskikh processov [Application of satellite vehicle monitoring systems to ensure the efficiency of logistics processes]. Available at: <http://www.rae.ru/forum2012/21/2998> (accessed: 12.08.2018). (In Russ.)
2. Primenenie GLONASS/GPS monitoring transporta [The use of GLONASS/GPS monitoring of transport] Available at: [W8http://gigabaza.ru/doc/49862.html](http://gigabaza.ru/doc/49862.html) (accessed: 12.08.2018). (In Russ.)
3. Monitoring Transporta [Transport Monitoring] Available at: <http://monitoringtransporta.ru> (accessed: 12.08.2018). (In Russ.)
4. Gromakov U. A. Standarty i sistemy podvizhnoj radiosvjazi [Mobile radio standards and systems] Moscow, Eco-Trendz Publ., 1997. P. 239. (In Russ.)
5. Sistema sputnikovoj svjazi Iridium [Iridium satellite communication system] Available at: <http://www.marsat.ru/Technologies-Iridiumnetwork> (accessed: 12.08.2018). (In Russ.)



УДК 621.396.932.1

## ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ОТКАЗОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЕЙ ПИЛОТАЖНО-НАВИГАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ САМОЛЕТОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БОРТОВЫХ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Р. А. Акзигитов\*, Н. И. Стаценко, Н. С. Писарев

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

*Успешное выполнение возложенных на ПНК задач возможно лишь при надежном его функционировании. Основным элементом ПНК является вычислитель. Поэтому, говоря о безотказности всего комплекса, в первую очередь имеют в виду безотказность бортового вычислителя.*

*Целью данной работы поставлено исследование методов предупреждения отказов вычислителей ПНК.*

*Ключевые слова: пилотажно-навигационное оборудование, предупреждение отказов, системы управления.*

## WARNING FAILURE CALCULATORS FLIGHT CONTROL AND NAVIGATION SYSTEMS OF CIVIL AIRCRAFT WHEN THE USE OF ON-BOARD DIGITAL CONTROL SYSTEMS

R. A. Akzigitov\*, N. I. Statsenko, N. S. Pisarev

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

*Successful implementation of the tasks assigned to NCP is possible only with its reliable functioning. The main element of the NCP is the calculator. Therefore, speaking about the reliability of the whole complex, first of all we mean the reliability of the on-Board computer.*

*The aim of this work is to study the methods of prevention of failures of NCP calculators.*

*Keywords: flight and navigation equipment, failure prevention, control systems.*

**Введение.** В современной трактовке система считается отказоустойчивой (толерантной или нечувствительной к неисправностям), если ее организация предусматривает устранение последствий неисправностей или отказов элементов и программного обеспечения за счет использования аппаратной, информационной и алгоритмической избыточности.

В настоящее время хорошо разработаны частные методы анализа, синтеза и проектирования избыточных технических систем, основанные на аппарате теории вероятностей, массового обслуживания. Значительные успехи в этой области, безусловно, достигнуты в теории кодирования. Однако использование избыточности при проектировании законов управления исследовано явно недостаточно.

Методы автоматизированного управления полетом ВС базируются на теории управления движущимися объектами. Среди большого количества различных методов автоматизации процессов управления полетом ВС следует выделить методы (и синтезированные на их основе законы управления), предназначенные для построения отказоустойчивых (толерантных) систем управления [1].

**Методы обеспечения толерантности.** Существуют два основных способа обеспечения толерантности САУП:

– резервирование, т. е. добавление технических устройств и связей к исходной системе подобных ее

устройствам и связям, таким образом, чтобы алгоритм управления оставался неизменным;

– алгоритмическое обеспечение отказоустойчивости, т. е. возможное преобразование структуры исходной системы, добавление к ней устройств и связей таким образом, что видоизменяется алгоритм управления системой.

Указанные два способа справедливы как при аппаратной, так и при программной реализации системы. В случае программной реализации при первом способе предполагается резервирование одинаковыми программами, при втором видоизменение (реконфигурация) программы с целью реализации отказоустойчивого алгоритма управления. В настоящее время в отечественных и зарубежных САУП, как правило, находит практическое применение первый способ обеспечения отказоустойчивости [2].

В качестве примера можно указать, что информационные, преобразующие, вычислительные устройства аналоговой САУП типа АБСУ154 трижды резервированы. Средства контроля построены по мажоритарному принципу, в качестве детекторов отказов системы контроля используются кворум элементы [3].

Внедрение цифровых систем управления полетом позволяет реализовать на практике второй способ обеспечения отказоустойчивости/связанный с видоизменением алгоритма управления (закона управления) системой. Данный путь является наиболее пер-

спективным, так как он требует лишь алгоритмической, а не аппаратной избыточности. Для САУП, у которых задачи снижения массы и габаритов особенно актуальны, высокая степень аппаратной избыточности нежелательна и может стать недопустимой. В связи с этим задача разработки новых нетрадиционных пока методов алгоритмического обеспечения отказоустойчивости САУП является весьма актуальной [4].

Рассматривается постановка и суть задачи алгоритмического обеспечения отказоустойчивости линейной системы вида (1):

$$\begin{cases} \dot{x}^0 = A^0(t)x^0 + B^0(t)u^0, \\ y^0 = C^0(t)x^0, x^0(t=0) = x_0^0, \end{cases}$$

где  $x^0 \in R^{n_0}$  вектор состояния системы; формула вектор внешних воздействий, компонентами которого могут быть управляющие и возмущающие воздействия;  $y^0 \in R^{k_0}$  вектор выходных координат;  $A^0(t)$ ,  $B^0(t)$ ,  $C^0(t)$  матрицы параметров, зависящие в общем случае от времени (верхний индекс 0 характеризует указанные векторы и матрицы при отсутствии отказов в системе).

Необходимо для данного множества отказов  $\Sigma = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_L\}$  преобразовать структуру и параметры САУП к виду (2):

$$\begin{cases} \dot{x} = S(t)x + D(t)u^0, \\ y = H(t)x, \end{cases}$$

где  $x \in R^m$ ,  $u^0 \in R^{m_0}$ ,  $y \in R^k$ ,  $S(t)$ ,  $D(t)$ ,  $H(t)$  – матрицы соответствующих размерностей, при которых система была бы инвариантной к отказам на заданном отрезке времени  $[0, T]$ .

Можно выделить два вида методов алгоритмического обеспечения отказоустойчивости САУ: прямые и адаптивные.

Прямые методы позволяют синтезировать САУ, структура и параметры регулятора которой  $(S_{21}, S_{22}, D_2, H)$  зависят от отказа  $\sigma \in \Sigma$  причем их изменения происходят при поступлении информации об отказе  $\sigma$ . Каждому отказу соответствует своя структура системы.

**Вывод.** Указанные два вида методов алгоритмического обеспечения отказоустойчивости обладают, в общем случае, различными компенсирующими возможностями. Применительно к системам управления полетом имеются существенные затруднения при

практической реализации адаптивных методов, связанные, прежде всего, с требованиями по быстродействию. Это объясняется тем, что в классических методах адаптации время, потребное для идентификации изменений динамики объекта, как правило, существенно превышает время затухания переходных процессов. В связи с этим внимание исследователей направлено, в основном, на разработку прямых методов.

Нерешенной на сегодняшний день остается задача синтеза толерантных законов управления полетом применительно к отказам самих вычислителей САУП.

### Библиографические ссылки

1. Сухих Н. Н., Олягкок П. В., Головченко В. П. Предупреждение отказов вычислителей пилотажно-навигационных комплексов самолетов гражданской авиации при использовании бортовых цифровых систем управления. СПб. : Академия гражданской авиации, 2005. 24 с.
2. Пилотажно-навигационные комплексы [Электронный ресурс]. URL: <https://studfiles.net/preview/2216407/> (дата обращения: 16.09.2018).
3. Техническое обслуживание и ремонт АЭС и ПНК [Электронный ресурс]. URL: <https://lektsii.org/12-36007.html> (дата обращения: 16.09.2018).
4. Кочетков Е. П. Метод предупреждения отказов. Система методов. М. : Наука, 2015. 215 с.

### References

1. Suhiih N. N., Olarak P. V., Golovchenko V. P. *Preduprezhdenie otkazov vychislitelej pilotazhno-navigacionnyh kompleksov samoletov grazhdanskoj aviacii pri ispol'zovanii bortovyh cifrovyh sistem upravleniya*. [Prevention of failures of calculators of flight and navigation systems of civil aviation aircraft when using on-board digital control systems]. Saint-Petersburg Academy of civil aviation, Publ., 2005. 24 p.
2. Pilot navigation systems. Available at: <https://studfiles.net/preview/2216407/> (accessed: 16.09.2018).
3. Maintenance and repair of nuclear power plants and NCP. Available at: <https://lektsii.org/12-36007.html> (date accessed: 16.09.2018).
4. Kochetkov E. P. *Metod preduprezhdeniya otkazov. Sistema metodov*. [Method of preventing failures. System of methods]. Science, Publ., 2015. 215p.

© Акзигитов Р. А., Стаценко Н. И., Писарев Н. С., 2018

УДК 629.7(075.8)

## ПРИВОД КОЛЕСА ШАССИ ВЕРТОЛЕТА

О. П. Батку, И. Я. Шестаков

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

*Рассмотрено перспективное направление повышения эффективности эксплуатации авиационной техники путем использование электромеханических силовых установок.*

*Ключевые слова: электромеханический привод, зубчатое колесо, вентильно-индукторный привод, вертолет.*

## WHEEL DRIVE CHASSIS OF THE HELICOPTER

O. P. Batku, I. Y. Shestakov

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

*The perspective direction of increase of efficiency of operation of the aircraft equipment by use of Electromechanical power plants.*

*Keywords: electromechanical drive, gear wheel, a valve-inductor engine, helicopter.*

Все более актуальным в мире, и несомненно, в авиации становятся задачи энергосбережения, продления ресурса сложного оборудования, а также экология.

Маневрирование вертолета по аэродромной площадке до места взлета или стоянки происходит с помощью несущего винта работающего в режиме малого газа. Однако руление связано с большим количеством ограничений. Учитываются ограничения по направлению и скорости ветра. Регламентированы скорость на рулении в зависимости от состояния грунта и окружающей обстановки. Тяга несущего винта также имеет ряд ограничений. Должны учитываться центробежные силы, и, как следствие, юз и возможные опрокидывания вертолета. При маневрировании вертолета по ВПП уровень шума от работающих двигателей, например, Ми-8 составляет 97 дБ, Ми-2 – 112 дБ.

При сгорании топлива в двигателе в атмосферу поступают разнообразные вредные вещества: окиси углерода, различные углеводороды, ацетилен, этан, толуол, окислы азота и серы и т. д.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности эксплуатации авиационной техники является использование электромеханических силовых установок [1–5]. С помощью них многие недостатки современной авиации могут быть устранены путем установки бесколлекторных мотор-редукторов в колеса шасси вертолета. Это позволит устранить вышеперечисленные недостатки, за счет того, что двигатель несущего винта будет работать только в режиме взлета и посадки, а маневрирование вертолета будет происходить за счет мотор-редуктора колеса шасси.

Мотор-редуктор может работать в двух режимах:  
– режим двигателя, когда ведущим звеном являются колеса передних стоек;  
– режим генератора, на задней стойке, при передвижении по ВПП.

Предполагается, что двигатель-генератор будет запитываться от бортовой системы питания. При расчете должны учитываться: скольжение колес, неравномерность распределения нагрузки на стойки шасси.

В задачу входит рассчитать планетарную передачу в габариты колес стоек.

### Библиографические ссылки

1. Надариа Ц. Г., Шестаков И. Я., Фадеев А. А. Привод колеса шасси самолета // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24, № 3. С. 109–112.
2. Асаутов М. Л. Загрязнения окружающей среды при авиатранспортных процессах : учеб. пособие для студентов вузов. СПб. : Университет гражданской авиации, 2019. С. 7–8.
3. Надариа Ц. Г., Шестаков И. Я., Фадеев А. А. Малогабаритный многофункциональный мотор-редуктор в колесе шасси самолета // Решетневские чтения : материалы XIX международной науч.-практ. конф. посвящ. 55-летию Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. ак. М. Ф. Решетнева (10–14 нояб. 2015, Красноярск) / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2015. Т. 1, № 19. С. 36–37.
4. Шасси, спецификация [Электронный ресурс]. URL: <http://superjet.wikidot.com/wiki:rrj-shassy> (дата обращения: 10.07.2018).
5. Руководство по летной эксплуатации вертолета Ми-8. 3-е изд. М. : Воздушный транспорт, 1988.

**Reference**

1. Nagaria C. G., Shestakov I. Ya., Fadeev A. A. Drive Wheel landing gear // Vestnik of the Moscow aviation Institute. 2017. T. 24, № 3. P. 109–112.
2. Asautov M. L. Environmental Pollution at air transport processes: Textbook for University students. SPb.: University of civil aviation, 2019. P. 7–8.
3. Nagaria C. G., Shestakov I. Ya., Fadeev A. A. Small-sized multi-function gear motor in the wheel of the aircraft chassis // Reshetnev readings: materials of XIX international scientific. prakt. Conf. Dedicate 55-anniversary Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev (10–14 Nov. 2015, Krasnoyarsk) / Sib. State Aerospace Un-ty. Krasnoyarsk, 2015. T. 1, № 19. P. 36–37.
4. Chassis, specification. Available at: <http://superjet.wikidot.com/wiki:rj-shassy> (accessed: 10.07.2018).
5. Manual flight operation of the helicopter Mi-8. 3rd edition, Moskov. “Air transport”, 1988.

© Batku O. P., Shestakov I. Y., 2018

УДК 656.7.076

## ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ЗАКУПКИ В СИСТЕМЕ АВИАЦИИ МЧС

С. В. Балалаев\*, Т. А. Смирнова, А. Р. 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: balals@mail.ru

*Рассмотрены различные варианты моделей закупок и найдена наиболее оптимальная как для всего МЧС, так и для его авиационных подразделений. Предложены идеи оптимизации и повышения эффективности закупочной деятельности.*

*Ключевые слова: государственные закупки, авиация МЧС России, Федеральный закон № 44, Федеральный закон № 223, централизованная модель, децентрализованная модель, смешанная модель, единая информационная система (ЕИС).*

## STATE PURCHASES IN THE AVIATION SYSTEM OF THE MINISTRY OF EMERGENCY SITUATIONS

S. V. Balalaev\*, T. A. Smirnova, A. R. Akzigitov

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

*Various variants of procurement models are considered and the most optimal for both the entire Ministry of Emergency Situations and its aviation units is found. Ideas of optimization and increase of efficiency of purchasing activity are offered.*

*Keywords: public procurement, aviation EMERCOM of Russia, Federal Law No. 44, Federal Law No. 223, centralized model, decentralized model, mixed model, unified information system, UIS.*

По данным информационного агентства «ТАСС», 165,8 млрд рублей бюджетных средств было направлено на нужды Министерства Российской Федерации по чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС России) в 2017 году [1].

МЧС России вырабатывает и реализует государственную политику в области гражданской обороны, а также защиты населения и территорий от ЧС. Эффективное выполнение данных функций напрямую зависит от рациональности и результативности осуществления государственных закупок. Проблема нерационального использования финансов является одной из наиболее важных. Оптимизация закупочной деятельности МЧС России позволит снизить затраты и перенаправить сэкономленные денежные средства на нужды подразделений МЧС, в том числе авиационных.

В данной статье будут рассмотрены нормативные акты, изменение которых оказали влияние на деятельность Министерства Российской Федерации по чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. Список этих нормативных актов включает в себя:

– Федеральный закон Российской Федерации от 05 апреля 2013 года № 44-ФЗ;

– Постановление Правительства РФ от 23.01.2015 г. № 36;

– Федеральный закон от 18.07.2011 № 223-ФЗ.

Совсем недавно изменилась система государственных закупок в Российской Федерации, так как с 31 декабря 2017 года, вступила в силу новая поправка Федерального закона Российской Федерации от 05 апреля 2013 года № 44-ФЗ, которая регламентирует контрактную систему в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд [2].

Наиболее оптимальной для совершения госзакупки МЧС России является смешанная модель, объединяющая в себе достоинства двух других. Смешанная модель считается наиболее эффективной для организаций,купающих продукцию разнообразную, а также для организаций, с обширным географическим разбросом, таких как МЧС России. Она подразумевает разделение полномочий. Региональные отделения, самостоятельно производят большинство закупок, в то время как наиболее сложными и значимыми занимается централизованный пункт. К недостаткам можно отнести отсутствие ясности в том, какие именно закупки должны осуществляться централизованно, а какие подразделениями. Этот недостаток можно устранить, разработав нормативный документ.

В целях оптимизации процесса государственных закупок был запущен процесс перевода госзакупок в электронную форму. Так, Постановлением Правительства РФ от 23.01.2015 г. № 36 в соответствии

с федеральным законом № 44, для участия в аукционных закупках необходимо регистрация в единой информационной системе (ЕИС), это предназначено для обеспечения свободного и безвозмездного доступа к точной и всеобъемлющей информации о контрактной системе в сфере закупок, а также для формирования, хранения и обработки такой информации. Существует строгий регламент порядка размещения информации на ЕИС который формируется Федеральным законом от 05.04.2013 № 44-ФЗ, Федеральным законом от 18.07.2011 № 223-ФЗ, а также соответствующими подзаконными актами [4].

Далее данные из единой информационной системы будут передаваться на электронные площадки, поэтому необходимость проходить аккредитацию на каждой из площадок пропадает, что упрощает проведение государственных закупок. Но в свою очередь возникает ряд проблем, связанных с отсутствием контроля над проведением этих закупок. Одна из них – это проблема «посредничество».

Также, со вступлением в силу закона от 18.07.2011 № 223-ФЗ (с учетом новой редакции № 223-ФЗ, 2018 года), регламентирующего организацию закупок товаров, работ, услуг отдельными видами юридических лиц, произойдут изменения, и затронут они главным образом поправки, которые будут направлены на поддержание среднего и малого бизнеса.

В соответствии с Федеральным законом № 223, с января 2018 года годовой объем закупок у субъектов малого предпринимательства, увеличен до 15 % и расширен перечень заказчиков, обязанных проводить такие закупки. Принятые решения позволят увеличить количество компаний, желающих участвовать в тендерах, что в свою очередь увеличит эффективность государственных закупок. Также, имеются недостатки, и одним из них является «деофшоризации». Для решения этой проблемы необходимо установить запрет на участие в торгах поставщиков, зарегистрированных вне территории Российской Федерации, что позволит в разы увеличить эффективность финансового положения страны [5].

Таким образом, для оптимизации системы государственных закупок МЧС России, целесообразен переход от централизованной модели госзакупок к смешанной. При этом необходимо, чтобы централизованный пункт, помимо организации наиболее сложных и значимых закупок, осуществлял контроль качества и исполнения региональными отделениями возложенных на них полномочий. Особое внимание необходимо уделить контролю над соблюдением законодательства РФ при размещении госзаказов. Переход к смешанной модели также подразумевает проведение обучения для служащих, а в дальнейшем периодическое проведение курсов повышения квалификации. В дальнейшем, когда региональные отделения начнут осуществлять часть государственных закупок для своих подразделений самостоятельно, станет возможным выявление групп товаров и услуг, приобретение которых более эффективно при размещении заказа централизованно.

## Библиографические ссылки

1. О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд [Электронный ресурс] : федер. закон Российской Федерации № 44-ФЗ от 05 апреля 2013 года. URL: <http://www.gov-zakupki.ru/zakon/44-fz-id126> (дата обращения: 22.03.2018).
2. О размещении заказов на поставки товаров, выполнение работ, оказание услуг для государственных и муниципальных нужд [Электронный ресурс] : федер. закон Российской Федерации № 94-ФЗ от 21 июля 2005 года. URL: [https://otc.ru/academy/articles/10012-018\\_veb](https://otc.ru/academy/articles/10012-018_veb) (дата обращения: 22.03.2018).
3. Обзор значимых поправок начала 2018 года в законодательство в сфере закупок по Федеральным законам 44-ФЗ и 223-ФЗ [Электронный ресурс]. URL: <https://help-tend.ru/stati/2052-10-znachimyykh-izmenenij-zakonodatelstva-o-zakupkakh-v-2018-godu> (дата обращения: 22.03.2018).
4. Изменения в регулировании закупок по 44-ФЗ и 223-ФЗ в 2017–2019 годах [Электронный ресурс]. URL: <https://zakon.ru/Conference/Conference/5297/> (дата обращения: 22.03.2018).
5. Гайдаровский форум 2018 «Россия и мир: цели и ценности» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ranepa.ru/images/News/2018-01/23-01-2017-gf-pres-demidova.pdf> (дата обращения: 22.03.2018).

## References

1. RF Federal law “On the contract system for procurement of goods, works and services for state and municipal needs” of April 5, 2013, № 44 Available at: <http://www.gov-zakupki.ru/zakon/44-fz-id126> (accessed: 22.03.2018). (In Russ.)
2. RF Federal law “About placement of orders for deliveries of goods, performance of works, rendering services for the state and municipal needs” of June 21, 2005 № 94 Available at: [https://otc.ru/academy/articles/10012-018\\_veb](https://otc.ru/academy/articles/10012-018_veb) (accessed: 22.03.2018). (In Russ.)
3. Obzor znachimyyh popravok nachala 2018 goda v zakonodatel'stvo v sfere zakupok po Federal'nym zakonom 44-FZ i 223-FZ [Review of significant amendments of the beginning of 2018 to the procurement legislation under Federal laws 44-FZ and 223-FZ] Available at: <https://help-tend.ru/stati/2052-10-znachimyykh-izmenenij-zakonodatelstva-o-zakupkakh-v-2018-godu> (accessed: 22.03.2018). (In Russ.)
4. Izmenenija v regulirovanii zakupok po 44-FZ i 223-FZ v 2017-2019 godah [Changes in procurement regulation under 44-FZ and 223-FZ in 2017–2019]. Available at: <https://zakon.ru/Conference/Conference/5297/> (accessed: 22.03.2018).
5. Gajdarovskij forum 2018 “Rossija i mir: celi i cennosti” [p 2018 Gaidar forum “Russia and world: mission and values”]. Available at: <https://zakon.ru/Conference/Conference/5297/> (accessed: 22.03.2019).

УДК 656.7

## ЗАМЕНА РЕСУРСНЫХ АВИАЦИОННЫХ КОМПОНЕНТОВ С ПОМОЩЬЮ СППР

Д. С. Герасимова\*, А. А. Палухин

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

*Актуальность статьи обусловлена тем, что в гражданской авиации большой поток информации обрабатывается персоналом вручную, на основе опыта и знаний. Однако ошибки, связанные с человеческим фактором, встречаются не так уж редко. Для их минимизации разрабатывается система поддержки принятия решений (СППР) в области замен ресурсных компонентов на воздушном судне.*

*Ключевые слова: гражданская авиация, система поддержки принятия решений.*

## REPLACEMENT OF THE RESOURCE OF AIRCRAFT COMPONENTS USING DSS

D. S. Gerasimova\*, A. A. Palukhin

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

*The relevance of this article is due to the fact that a large flow of information is processed by staff manually, based on experience and knowledge. However, errors associated with the human factor are not so rare. To minimize them, a decision support system (DSS) is developed to replace the resource components.*

*Keywords: civil aviation, decision support system.*

В гражданской авиации обеспечение безопасности полетов (БП) является приоритетным. Для достижения максимально возможного уровня БП необходимо, чтобы вся система в целом работала безупречно. Основная задача управления БП на воздушном транспорте Российской Федерации сводится к разработке мер по предотвращению существующей тенденции по аварийности в гражданской авиации путем создания постоянно действующей системы управления БП.

Методология этих мер предполагает, что решение проблем, связанных с контролем летной деятельности экипажей и БП ВС, зависит от правильной организации системы контроля и анализа ошибок в летной деятельности экипажа. Однако деятельность технического персонала и работников планирования также оказывает влияние на состояние воздушного судна.

Остановимся более подробно на деятельности работников планирования, так как эта работа не поддается большой огласке, но не менее важна. В обязанности отдела планирования входит множество задач, связанных с самостоятельным принятием решением, непосредственно влияющих на состояние воздушного судна: формирование предварительного плана работ на будущие сутки/неделю/месяц, отслеживание работ выдаваемых оператором, формирование и выдача карт-нарядов, ведение журналов выдачи и приемки карт, проверка рейсов, оперативная выдача в работу дефектов и их согласование с линейками, планирование замен ресурсных компонентов, выдача заданий на замену ресурсных компонентов, оформление заявок

на закупку этих компонентов, предоставление отчетов о состоянии компонентов на воздушном судне и другие операции.

Все вышеперечисленные работы осуществляются людьми вручную или с использованием технических средств, но, как правило, основное решение человек принимает самостоятельно, основываясь на прошлом опыте. Конечно, данный подход не может исключать наличия ошибок. Однако использование программ, которые могут включить в себя «имеющийся опыт» и выдавать готовые решения в тех или иных ситуациях – значительно минимизировало бы ошибки персонала, связанные с невнимательностью, отсутствием опыта, большой загрузкой и другими факторами [1–3].

Системы поддержки принятия решений (СППР) – компьютерная автоматизированная система, целью которой является помощь людям, принимающим решение в сложных условиях для полного и объективного анализа предметной деятельности. СППР возникли в результате слияния управленческих информационных систем и систем управления базами данных. Для анализа и выработки предложений в СППР используются разные методы. Ими могут быть: информационный поиск, интеллектуальный анализ данных, поиск знаний в базах данных, рассуждение на основе прецедентов, имитационное моделирование, эволюционные вычисления и генетические алгоритмы, нейронные сети, ситуационный анализ. Данные системы поддержки принятия решений хорошо зарекомендовали себя в отрасли авиаперевозок и управления воздушным движением УВД [4–5].

Установление ресурса вызвано тем, что в процессе эксплуатации ЛА их детали и агрегаты подвергаются естественному износу и старению, претерпевают физические и химические изменения. Эти изменения могут достигать такой величины, при которой летные характеристики АТ заметно ухудшаются и безопасность полета не может быть гарантированной.

К ресурсным авиационным компонентам относят наиболее важные и сложные, а также подвергающиеся частной нагрузке, компоненты ВС: двигатели, элементы конструкции шасси, генераторы, пожарные и кислородные баллоны, аккумуляторы, трапы и прочее. На каждом из них есть свой определенный ресурсный интервал, через который необходимо производить работы по ПЛГ. Не соблюдение в сроках выполнения работ, хотя бы одного компонента, приводит к нарушению летной годности ВС и приостанавливает его эксплуатацию.

В рамках настоящей работы над системой поддержки принятия решений (СППР) при замене ресурсных компонентов выделены следующие этапы:

- организация сбора базы данных;
- обработка информации;
- оценка текущих показателей эффективности работы персонала;
- установление причин, оказывающих наибольшее влияние на невыполнение замен, просрочек ресурсных компонентов;
- отладка программы.

В дальнейшей статье авторами рассмотрена возможность использования СППР в рамках замен ресурсных компонентов. СППР выполнена с возможностью самообучения. Предполагается внедрение данного продукта в производство, в качестве вспомогательного средства для работы персонала при замене ресурсных компонентов.

#### Библиографические ссылки

1. Униченко Е. Г. Разработка методов повышения уровня безопасности полётов воздушных судов путем улучшения качества функционирования систем информационного обеспечения УВД : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.14 ; [Место защиты: Моск. гос. техн. ун-т гражд. авиации]. Москва, 2008. 130 с.: ил. РГБ ОД, 61 09-5/1195.
2. Щетинин А. В. Разработка элементов системы управления безопасностью при производстве полетов гражданских воздушных судов : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.22 [Место защиты: Моск. гос. техн. ун-т гражд. авиации]. Москва, 2008. 165 с.: ил. РГБ ОД, 61 09-5/430.
3. Малышева Т. А. Организационно-методическое обеспечение системы поддержки принятия решений в области регулярности полетов воздушных

судов гражданской авиации : дис. ... канд. техн. наук: 05.02.22 [Место защиты: Моск. гос. техн. ун-т гражд. авиации]. Москва, 2007. 200 с.: ил. РГБ ОД, 61 07-5/5361.

4. Ларичев О. И., Петровский А. Б. Системы поддержки принятия решений. Современное состояние и перспективы их развития // Итоги науки и техники. Сер. Техническая кибернетика. М. : ВИНТИ, 1987. Т. 21. С. 131–164.

5. Сараев А. Д., Щербина О. А. Системный анализ и современные информационные технологии // Тр. Крымской акад. наук. Симферополь : СОНАТ, 2006. С. 47–59.

#### References

1. Unichenko E. G. Razrabotka metodov povysheniya urovnya bezopasnosti poletov vozdushnykh sudov putem uluchsheniya kachestva funktsionirovaniya sistem informatsionnogo obespecheniya UVD [Development of methods to improve the level of aircraft safety by improving the quality of air traffic management information support systems] : dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.02.14 ; Mesto zashchity: Mosk. gos. tekhn. un-t grazhd. Aviatsii. Moskva, 2008. 130 s.: il. RGB OD, 61 09-5/1195.
2. Shchetinin A. V. Razrabotka elementov sistemy upravleniya bezopasnostyu pri proizvodstve poletov grazhdanskikh vozdushnykh sudov. [Development of elements of safety management system in civil aircraft operations] : dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.02.22 ; [Mesto zashchity: Mosk. gos. tekhn. un-t grazhd. aviatsii]. Moskva, 2008. 165 s.: il. RGB OD. 61 09-5/430.
3. Malysheva T. A. Organizatsionno-metodicheskoye obespecheniye sistemy podderzhki prinyatiya resheniy v oblasti regulyarnosti poletov vozdushnykh sudov grazhdanskoy aviatsii : dis. ... kand. tekhn. nauk [Organizational and methodological support of decision-making support system in the field of regularity of civil aviation aircraft flights: PhD thesis] 05.02.22 ; [Mesto zashchity: Mosk. gos. tekhn. un-t grazhd. aviatsii]. Moskva, 2007. 200 s.: il. RGB OD. 61 07-5/5361.
4. Larichev O. I., Petrovskiy A. B. Sistemy podderzhki prinyatiya resheniy. Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy ikh razvitiya [Decision support systems. Current state and prospects of their development.]. Itogi nauki i tekhniki. Ser. Tekhnicheskaya kibernetika. T. 21. M. : VINITI, 1987. P. 131–164.
5. Sarayev A. D., Shcherbina O. A. Sistemnyy analiz i sovremennyye informatsionnyye tekhnologii [System analysis and modern information technologies]. Trudy Krymskoy Akademii nauk. Simferopol : SONAT, 2006. P. 47–59.



УДК 656.7

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ПОСРЕДСТВОМ GPS-ТРЕКЕРА

Э. В. Горбунов\*, Д. А. Андреев, С. О. Майнашева, А. В. Кравченко, Н. П. Овсянников

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

\*E-mail: eric.gorbunov@bk.ru

*Рассматривается работа GPS-трекера с непрерывным мониторингом положения воздушного судна (ВС) в качестве дополнительного оборудования для повышения культуры безопасности полетов на вертолетах в воздушном пространстве.*

*Ключевые слова: GPS, трекер, вертолет, район поиска, эффективность, дополнительное оборудование.*

## INCREASE OF EFFICIENCY OF CONTINUOUS MONITORING OF AIRCRAFT BY MEANS OF GPS-TRACKER

E. V. Gorbunov\*, D. A. Andreev, S. O. Maynasheva, A. V. Kravchenko, N. P. Ovsyannikov

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

\*E-mail: eric.gorbunov@bk.ru

*The article deals with the work of a GPS tracker with continuous monitoring of the position of the aircraft as additional equipment to enhance the safety culture of helicopters in airspace.*

*Keywords: GPS, tracker, helicopter, search area, efficiency, additional equipment.*

В настоящее время, в связи с низкой культурой безопасности полетов в коммерческой авиации на некоторых типах вертолетов, в частности Ми-8, остро стоит проблема непрерывного мониторинга положения ВС не только в воздушном пространстве, но и определения его места положения при аварийной посадке или крушении для быстрого отыскания места посадки и оказания помощи людям.

Практика показала, что в аварийной ситуации имеющиеся на борту Ми-8 два комплекта радиомаяков выдают сигнал оповещения в аварийно-спасательные службы, что приводит к увеличению времени поиска ВС и резко снижает шансы экипажа и пассажиров к спасению. Так, например, 02.09.2018 г. в Братском районе Иркутской области произошло крушение вертолета Ми-8РА – 25502. Связь с воздушным судном была потеряна в 14-00 по местному времени. Поиски начались в 15-47 по местному времени и продолжались сутки. АРМ (автоматический радиомаяк) не сработали. Анализ отказа связи, срабатывания АРМ на борту вертолетов данного типа показал, что эти средства нельзя считать надежными с одной стороны, а с другой стороны эти средства не обеспечивают постоянного мониторинга положения ВС.

В данной статье рассмотрены причины отказа АРМ их конструктивные особенности и т. д. Мы рассматриваем, прежде всего, ситуацию, когда авария или катастрофа происходит в северных, труднодоступных районах Сибири и автоматическое оповещение аварийных служб с четким определением места положения воздушного судна становится решающим фактором быстрого поиска и спасения людей.

Выходов из положения всегда несколько от повышения надежности работы существующей аппаратуры до применения новейших разработок. Одной из таких разработок является использование технологии SPOT Tracse. Это оборудование имеет встроенный датчик вибрации/ускорения.

При отсутствии вибрации устройство переходит в режим ожидания и не передает отметки о местоположении. Это может произойти в условиях спокойного равномерного полета при отсутствии турбулентности.

На воздушных судах настоятельно рекомендуется использовать режим «Dock mode» SPOT Tracse технологии. В этом режиме встроенный датчик вибрации отключается, и для определения отсутствия перемещения используется GPS. Устройство продолжает определять координату раз в 2,5 минуты.

Вероятность успешного выполнения отправки одного сообщения SPOT Messenger прогнозируется в течение 20 минут при условии доступности сети (рис. 1). Вот почему, SPOT Messenger запрограммирован на автоматическую отставку несколько сообщений в каждом режиме, обеспечивая вам превосходную итоговую надежность.

Работает SPOT через сеть низкоорбитальных спутников Globalstar. Координату определяет по GPS. Над районам полета всегда есть спутник(и), но так как у спутников нет «памяти» на сообщение от мессенджера, то для того, чтобы «приземлить» сигнал, в прямой видимости от спутника в данный момент должна быть включена базовая станция.

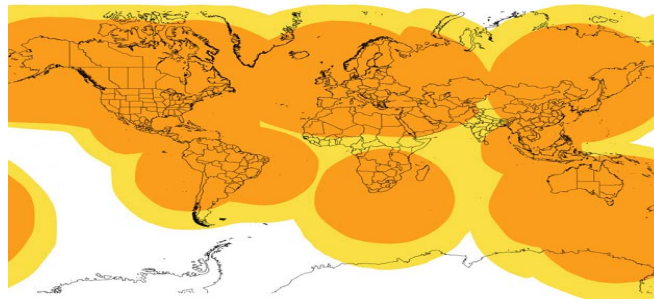


Рис. 1. Зона покрытия SPOT Trace:

- – вероятность успешной отправки одного сообщения в течение 20 минут составляет 96 % или выше; ● – ослабление сигнала или отсутствие покрытия в течение 20 минут

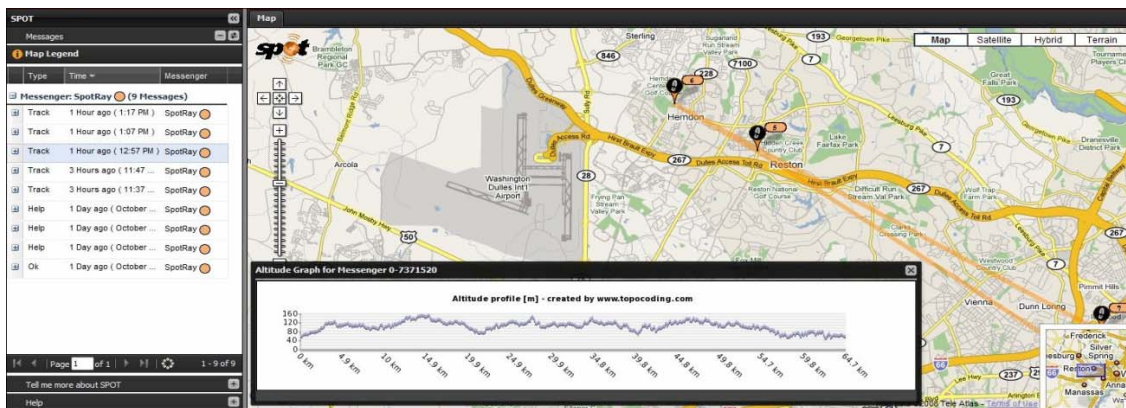


Рис. 2. Работа приложения SPOT Messenger для отслеживания положения ВС по маршруту.

В заключение можно сказать, что использование штатных АРМ при возникновении ЧС не обеспечивает исключительную надежность доставки сигнала о местоположении ВС в аварийно-спасательные центры, и в качестве дополнительного оборудования GPS – трекер идеально подходит для наиболее точного определения местоположения без задержек, тем самым сужая район поиска ВС и сокращая времена спасение людей. Использование данного устройства экономически целесообразно и эффективно для авиакомпаний, а также частных пилотов.

#### Библиографические ссылки

1. Бородайко В. Л., Ильина О. П. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации. Globalstartechnology [Электронный ресурс]. URL: <http://present5.com/vychislitelnye-sistemy-seti-i-telekommunikacii-chast-ii-lektor> (дата обращения: 05.09.2018).
2. Electronic text book FindmeSPOT [Электронный ресурс]. URL: <https://www.findmespot.com/en/index.php?cid=128> (дата обращения: 05.09.2018).
3. Electronic textbook AOPA [Электронный ресурс]. URL: <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2014/july/28/spot-simplifies-with-new-trace-tracker> (дата обращения: 05.09.2018).
4. Electronic textbook Globalstar [Электронный ресурс]. URL: <https://www.globalstar.com/support/coverage-maps> (дата обращения: 05.09.2018).

5. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии : монография. В 2 т. Т. 1 / Сибирская государственная геодезическая академия. М. : ФГУП «Картгеоцентр», 2005. 334 с.

#### References

1. Borodaiko V. L., Ilina O. P. *Vychislitel'nye sistemy, seti i telekommunikatsii* [Computing systems, networks and telecommunications. Globalstar technology]. Available at: <http://present5.com/vychislitelnye-sistemy-seti-i-telekommunikacii-chast-ii-lektor> (accessed: 05.09.2018).
2. Electronic textbook Find me SPOT. Available at: <https://www.findmespot.com/en/index.php?cid=128> (accessed: 05.09.2018).
3. Electronic textbook AOPA. Available at: <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2014/july/28/spot-simplifies-with-new-trace-tracker> (accessed: 05.09.2018).
4. Electronic textbook Globalstar. Available at: <https://www.globalstar.com/support/coverage-maps> (accessed: 05.09.2018).
5. Antonovich K. M. *Ispol'zovanie sputnikovyykh radionavigatsionnykh sistem v geodezii* [Use of satellite radio navigation systems in geodesy. Part 1]. Moscow, "Kartgeotsentr" Publ., 2005. 334 p. (In Russ.).

© Горбунов Э. В., Андреев Д. А., Майнашева С. О., Кравченко А. В., Овсянников Н. П., 2018

УДК 006.067

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛАБОРАТОРИИ  
АВИАЦИОННОЙ МЕТРОЛОГИИ ООО «АЭРОПОРТ ЕМЕЛЬЯНОВО»  
НА ОСНОВЕ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА**

М. А. Деунежева

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 совершенствования метрологического обеспечения лаборатории авиационной метрологии инженерно-авиационной службы ООО «Аэропорт Емельяново» на основе риск-ориентированного подхода в соответствии с требованиями международного стандарта ISO/IEC 17025:2017.*

*Ключевые слова: риск-ориентированный подход, метод уровней защиты, калибровка, анализ состояния измерений, техническая компетентность.*

**IMPROVEMENT OF METROLOGICAL SUPPORT OF AIRCRAFT METROLOGY LABORATORY  
OF LLC "AIRPORT EMELYANOVO" BASED ON RISK-ORIENTED APPROACH**

M. A. Deunezheva

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

*The work deals with the improvement of metrological support for the aviation metrology laboratory of the engineering and aeronautical service of LLC "Airport Emelyanovo" on the basis of a risk-oriented approach in accordance with the requirements of the international standard ISO / IEC 17025:2017*

*Keywords: risk-oriented approach, method of protection levels, calibration, analysis of a condition of measurements, technical competence.*

Емельяново – международный аэропорт федерального значения города Красноярска, узловой аэропорт региональных и международных авиаперевозок, крупнейший аэропорт Центральной и Восточной Сибири, один из крупнейших аэропортов страны по объёму выполняемых международных грузовых рейсов.

Специальные средства измерения используются инженерно-техническим составом организации «Аэропорт Емельяново» при ремонте, регламентных работах и для обслуживания авиационной техники при выполнении полётов. От исправности и точности показаний специальных средств измерений, т. е. от качества их калибровки зависит качество выполняемых работ при ремонтах и обслуживании авиатехники, а, следовательно, и безопасность полётов. В обязанности лаборатории авиационной метрологии входит проведение калибровки средств измерений таким образом, чтобы выполнялись требования действующих правовых, организационно-методических и нормативных документов [1].

На формирование достоверности калибровки влияет точность измерительного контроля, полнота контроля проверяемых параметров, временные показатели калибровки, надёжность калибруемых и образцовых средств измерений, методика операций калибровки, способы регистрации и обработки измерительной информации, наличие системы самоконтроля [2; 3].

С целью повышения достоверности результатов калибровки международными организациями по аккредитации ILAC и IAF разработан проект стандарта ISO/IEC 17025: 2017 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий», который предусматривает внедрение риск-ориентированного подхода. В основе стандарта ISO/IEC 17025 лежит модель менеджмента качества ISO 9001 с учетом специфики метрологических организаций. В частности, стандарт оперирует такими отсутствовавшими в ISO 9001 понятиями, как аккредитация лаборатории национальными регулирующими органами и область технической компетенции лаборатории. Выполнение требований стандарта ISO/IEC 17025 также означает соответствие стандарту ISO 9001 [4].

Для повышения точности и исправности работы оборудования предлагается комплексная систематическая работа по выявлению нежелательных рисков в лаборатории авиационной метрологии ИАС ООО «Аэропорт Емельяново».

Анализ уровней надёжности средств защиты (метод LOPA) – одна из методик, применяемых для оценки уровней целостности безопасности при рассмотрении систем безопасности и автоматизированных систем [5].

Метод LOPA используют для оценки средств управления и эффективность их применения. Испол-

зование метода может дать информацию о достаточности используемых мер управления и снижения возникновения риска. Основан метод на определении уровня защиты, предотвращающие неблагоприятный исход, для этого проводится расчет последствий.

Процесс LOPA проводится группой экспертов в соответствии со следующей процедурой:

1) установление исходных причин нежелательного результата и поиск информации об их частотах и последствиях;

2) выбор отдельной пары причина-следствие;

3) определение уровней защиты, которые препятствуют переходу от причины к нежелательному последствию, и анализ их результативности;

4) определение независимых уровней защиты (IPL) (не все уровни защиты являются независимыми уровнями защиты);

5) количественная оценка вероятности отказа каждого независимого уровня защиты (IPL);

6) объединение частоты исходной причины с вероятностями отказа всех независимых уровней защиты (IPL) и вероятностями всех условных модификаторов (пример условного модификатора: должен ли присутствовать 14 человек, чтобы на него было оказано воздействие) для определения частоты возникновения нежелательного последствия. Для частот и вероятностей применяются десятичные порядки;

7) сравнение расчетного уровня риска с допустимыми уровнями риска для определения необходимости дополнительной защиты.

Записи лаборатории авиационной метрологии ИАС ведутся и поддерживаются в рабочем состоянии для предоставления свидетельства соответствия требованиям и результативности системы менеджмента качества. Текущие протоколы калибровок средств измерений и другие записи хранятся по месту их использования.

Таким образом, предложенный метод анализа уровней защиты позволит определить частоту рисков событий, а также разработать защитные меры, что позволит уменьшить количество рисков выхода из строя оборудования.

Применение метода анализа уровней защиты для оценки качества работы оборудования в лаборатории ЛАМ ИАС ООО «Аэропорт Емельяново», необходимо потому, что достоверность результатов лабораторий является одной из важнейших характеристик качества. Выявление рисков событий на ранних стадиях работы оборудования является важной и ответственной процедурой.

#### Библиографические ссылки

1. ГОСТ Р 8.879–2014. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Методики калибровки средств измерений. Общие требования к содержанию и изложению [Электронный ресурс]. URL: <http://gostexpert.ru> (дата обращения 07.09.2018).

2. Лаврентьева Е. А., Жирнова Е. А. Анализ готовности лаборатории авиационной метрологии инженерно-авиационной службы ООО «Аэропорт Емельяново» к прохождению инспекционного контроля // Решетневские чтения : материалы XX Междунар. науч. конф. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. Т. 1, № 20. С. 499–501.

3. МИ 2427-2016 ГСИ. Оценка состояния измерений в испытательных, измерительных и лабораториях производственного и аналитического контроля [Электронный ресурс]. URL: <http://gostexpert.ru> (дата обращения: 05.02.2018).

4. Новая версия ISO/IEC 17025: сайт [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nca.kz/info/news/opublikovana-novaya-versiya-iso-iec-17025/> (дата обращения: 20.02.2018).

5. Захарова Н. В., Петровская Ю. А., Петровская Е. А. Комплексная оценка рисков методом FMEA // Актуальные проблемы авиации и космонавтики [Электронный ресурс] : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Дню космонавтики (10–15 апреля 2016 г., Красноярск) : в 2 т. Т. 2. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016.

#### References

1. GOST R 8.879–2014. State system for ensuring the uniformity of measurements (ICG). Methods of calibration of measuring instruments. General requirements for content and presentation. Available at: <http://gostexpert.ru>. Ver. from the screen (accessed: 07.09.18).

2. Lavrentieva E. A., Zhirnova E. A. Analysis of the readiness of the Aviation Metrology Laboratory of the Engineering and Aeronautical Service of LLC “Airport Emelyanovo” to pass inspection inspection // Reshetnevskiy chteniya : materialy XX Mezhdunar. nauch. konf. / pod obshch. red. Yu. Yu. Loginova ; Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2016. T. 1, № 20. P. 499–501.

3. MI 2427–2016. GSI. Otsenka sostoyaniya izmereniy v ispyatel'nykh, izmeritel'nykh i laboratoriyakh proizvodstvennogo i analiticheskogo kontrolya. Available at: <http://gostexpert.ru> (accessed: 05.02.2017).

4. New version of ISO / IEC 17025: site. Available at: <http://www.nca.kz/info/news/opublikovana-novaya-versiya-iso-iec-17025/> (accessed: 20.02.2018).

5. Zakharova N. V., Petrovskaya Yu. A., Petrovskaya E. A. Complex risk assessment by the FMEA method, Actual problems of aviation and cosmonautics [Electronic resource] : materials XII Intern. scientific-practical. Conf., dedicated to the Day of Cosmonautics (April 10–15, 2016, Krasnoyarsk) : in 2 tons of T. 2 / under the general. Ed. Yu. Yu. Loginova ; Sib. state. aerospace. un-t. Krasnoyarsk, 2016.

© Деунезева М. А., 2018

УДК.656.7.022; 656.7.05

## БОРТОВАЯ РАДИОЛОКАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПОСАДКИ ВЕРТОЛЕТА НА НЕПОДГОТОВЛЕННУЮ ПЛОЩАДКУ

Д. В. Дмитриев\*, И. А. Акзигитова, Ю. В. Огородникова

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

*По статистике одной из основных причин аварий вертолетов является низкая надежность средств для обеспечения посадки на неподготовленную посадочную площадку (ПП) как в дневное время суток, так и в ночное при плохой визуальной видимости. В некоторых случаях при хороших летных условиях, но запыленной земной поверхности ПП, возникает аварийная ситуация для жизни экипажа. В настоящее время большинство вертолетов могут быть оборудованы спутниковыми навигационными системами и бортовыми радиовысотмерами, обеспечивающими при маневрировании точное определение координат ПП. Однако данные системы не могут обеспечить пилотов необходимой информацией о состоянии рельефа ПП и о возможных посторонних объектах на ней.*

*Ключевые слова: вертолет, надежность, гражданская авиация, воздушное судно, посадка.*

## ON-BOARD RADAR SYSTEM OF HELICOPTER LANDING ON AN UNPREPARED SITE

D. V. Dmitriev\*, I. A. Akzigitova, J. V. Ogorodnikova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
\*E-mail: gerundiy48@gmail.com

*According to statistics, one of the main causes of helicopter accidents is the low reliability of means to ensure landing on an unprepared landing site (LS) both during the day and at night with poor visual visibility. In some cases, under good flight conditions, but the dusty ground surface of the LS, there is an emergency for the life of the crew. Currently, most of the helicopters can be equipped with satellite navigation systems and airborne radio altimeters, providing when maneuvering precise positioning LS. However, these systems can not provide pilots with the necessary information about the state of the relief of the LS and possible foreign objects on it.*

*Keywords: helicopter, reliability, civil aviation, aircraft, landing.*

Одним из самых сложных этапов пилотирования вертолета является посадка на неподготовленную площадку. Эта задача сопровождается повышенным риском аварии и человеческих жертв. Такие тяжелые условия пилотирования существуют в военной авиации, когда необходимо посадить вертолет на неподготовленную или неразведанную площадку, например, высадка, эвакуация, доставка боеприпасов и грузов в боевых условиях. Условия недостаточной видимости являются одной из ключевых проблем при посадке на неподготовленные ПП. Под условиями недостаточной видимости (УНВ) понимается слабая или нулевая оптическая видимость за кабиной обстановки, обусловленная любым из следующих факторов или их сочетанием: слабая освещенность, неблагоприятные метеорологические условия (туман, метель и т. д.), поднимаемый винтом вертолета вихрь твердых частиц. Последний из перечисленных факторов представляет собой особую опасность [1].

Критическим показателем, снижающим видимость, является то, что воздушная струя от несущего винта поднимает твердую взвесь при посадке на сухой или заснеженный грунт. Это может привести

к неправильной оценке пилотом положения вертолета относительно земли. Также из-за этого могут остаться незамеченными препятствия в зоне посадки, например, большие камни, статичные и движущиеся объекты. Термин «пыльный вихрь» описывает это явление при посадке или взлете на сухой поверхности. Подобные же условия при посадке или взлете на заснеженной поверхности описываются термином «снежный вихрь» [2].

Согласно данным Управления инспекции по безопасности полетов Федерального агентства воздушного транспорта РФ в период с 2001 по первую половину 2014 гг. события при посадке стали причиной 6 катастроф и 24 аварий гражданских вертолетов.

Посадка вертолета в УНВ опасна тем, что вынуждает пилота полагаться на собственные ощущения и бортовые навигационные приборы, данных от которых зачастую оказывается недостаточно. Однако, еще проходя обучение, пилоты учатся при посадке полагаться в основном на внешнюю визуальную информацию, самостоятельно просматривая выбранную зону посадки на предмет опасности. При этом наземные объекты используются ими в качестве ориенти-

ров для управления пространственным положением воздушного судна. Приобретенные навыки становятся особенно важными и необходимыми при посадке или маневрировании вблизи различных препятствий, таких как деревья, линии электропередач, мачты и т. д. Пилоты вынуждены постоянно контролировать пространственное положение вертолета из-за присущей технике неустойчивости. Но при управлении вертолетом в тяжелых метеоусловиях, например, в снегопад или песочную бурю, наземные объекты-ориентиры не позволяют пилотам использовать визуальный способ управления. Из-за отсутствия визуального метода у пилота резко возрастает зависимость от собственных интуитивных ощущений. Однако в необычных гравитационно-инерциальных условиях, как, например, в воздухе, информация, передаваемая вестибулярным аппаратом, может неправильно идентифицироваться мозгом. Это в свою очередь приводит к дополнительным физическим нагрузкам на пилота и может иметь потенциально опасные последствия – в таких условиях пилот может испытывать кратковременную пространственную дезориентацию [3].

Дезориентация может принимать различные формы: пилот не осознает бокового уклона вертолета; у пилота создается ложное ощущение бокового уклона, движения или поворота вертолета, хотя в действительности ВС находится в состоянии висения. Иллюзия движения может происходить во всех шести степенях свободы движения тела, то есть пилоту может казаться, что вертолет линейно перемещается по декартовым осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$  (иллюзия линейного движения) или поворачивается вокруг любой из трёх взаимно перпендикулярных осей (рыскание, тангаж, крен). Технологические решения проблемы безопасной посадки вертолета на неподготовленную площадку в УНВ находятся на различных этапах готовности. На сегодняшний день в мире активно ведутся разработки по созданию систем посадки вертолета, однако на данный момент не существует готового оборудования для массового производства [4]. Системное решение по обеспечению безопасной посадки должно решать две задачи: 1) обеспечивать ситуационную осведомленность о пространственном положении вертолета; 2) обеспечивать ситуационную осведомленность о состоянии зоны посадки.

Из-за отсутствия аналогов на российском рынке, предлагается использовать радары W-диапазона и лидары зарубежного производства. Радары W-диапазона – это активная радиолокационная система (РЛС) миллиметрового диапазона с рабочей частотой 77–94 ГГц, которая может осуществлять эффективное сканирование сквозь пыльный вихрь. Лидары, несмотря на то, что они имеют более высокое затухание в пыльном вихре, дожде и тумане, чем РЛС W-диапазона, при сканировании зоны посадки на наличие препятствий могут обеспечить намного более высокое пространственное разрешение, поэтому целесообразно использовать обе системы как основную и резервную [5].

## Библиографические ссылки

1. Баскаков А. И. Исследование ослабления радиоволн в гидрометеорах и в пылевом облаке для бортовой радиолокационной системы безопасной посадки вертолета // Радиотехнические тетради. 2011. № 44. С. 45–48.
2. Сейн Хту, Баскаков А. И. Выбор оптимальной антенной базы для интерферометрической РЛС безопасной посадки вертолета // Вестник МЭИ. 2013. № 6. С. 213–218.
3. Сейн Хту, Баскаков А. И. Расчет интенсивности фоновых сигналов от поверхности земли для бортовой радиолокационной системы безопасной посадки вертолета // Радиотехнические тетради. 2011. № 46. С. 22–27.
4. Сейн Хту, Баскаков А. И. Принципы реализации бортовой радиолокационной системы безопасной посадки вертолета // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : XVII Науч.-техн. конф. студентов и аспирантов : тез. докл. В 3 т. Т. 1. М. : Изд. дом МЭИ, 2011. С. 127–128.
5. Сейн Хту, Баскаков А.И. Бортовая радиолокационная система безопасной посадки вертолета // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : XVIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов : тез. докл. в 4 т. Т. 1. М. : Изд. дом МЭИ, 2012. С. 120.

## References

1. Baskakov A. I. [The study of attenuation of radio waves in hydrometeors and dust in the cloud for on-Board radar system for the safe landing of the helicopter]. *Radiotekhnicheskie tetradi*. 2011. No. 44. P. 45–48. (In Russ.)
2. Seyn Khtu, Baskakov A. I. [Selection of the optimal antenna base for interferometric radar safe landing of the helicopter]. *Vestnik MEI*. 2013. No 6. P. 213–218. (In Russ.)
3. Seyn Htu, Baskova A. I. [Calculation of the intensity of the background signal from the earth's surface to on-Board radar system for the safe landing of the helicopter]. *Radiotekhnicheskie tetradi*. 2011. No. 46. P. 22–27. (In Russ.)
4. Seyn Khtu, Baskakov A. I. [Principles of implementation of the onboard radar system of safe landing of the helicopter]. *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika: Semnadsataya nauchnotekh. konf. studentov i aspirantov* [Electronics, electrical engineering and energy: seventeenth scientific technic. Conf. undergraduate and graduate students] Moscow, 2011. P. 127–128. (In Russ.)
5. Seyn Khtu, Baskakov A. I. [Onboard radar system for safe helicopter landing] *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika: Vosemnadsataya mezhdunarodnaya nauchnotekh. konf. studentov i aspirantov*. [Electronics, electrical engineering and energy: the Eighteenth international scientific technic. Conf. undergraduate and graduate students]. Moscow, 2012. P. 120. (In Russ.)

© Дмитриев Д. В., Акзигитова И. А.,  
Огородникова Ю. В., 2018

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОСАДОЧНЫМ МАНЕВРОМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ ДЕЙСТВИИ БОКОВОГО ВЕТРА

Д. В. Дмитриев, И. А. Акзигитова, Ю. В. Огородникова

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

*В настоящее время существует проблема безопасной посадки на шасси у легких беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в сложных метеоусловиях, когда в отсутствие человека необходимо решить задачу автоматического управления либо с борта, либо с земли. Данная статья рассматривает задачу автоматической посадки БЛА при сильном боковом ветре, которая на настоящий момент является актуальной.*

*Ключевые слова: БЛА, надежность, гражданская авиация, воздушное судно, посадка.*

## THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE LANDING MANEUVER OF UAV UNDER THE SIDE WIND EFFECT

D. V. Dmitriev, I. A. Akzigitova, Yu. V. Ogorodnikova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: gerundiy48@gmail.com

*There is a problem of safe landing on the chassis of light unmanned aerial vehicles (UAVs) in difficult weather conditions, when in the absence of a person it is necessary to solve the problem of automatic control either from the Board or from the ground. Therefore, the topic of this article reveals the problem of automatic landing of UAVs with a strong side wind, is relevant.*

*Keywords: UAV, reliability, civil aviation, aircraft, landing.*

По статистике известно, что наиболее опасными из этапов эксплуатации для летательного аппарата (ЛА) является режим непосредственной посадки, особенно при ручном управлении. Ручная посадка подразумевает под собой, что ЛА проходит ряд стадий, таких как: заход на посадку, снижение, выравнивание, выдерживание, приземление, пробег.

На этапе снижения важно сохранить угол тангажа постоянным, то есть ЛА должен пикировать с постоянным небольшим отрицательным углом тангажа.

Угол тангажа нужно уменьшить на этапе выравнивания до такой степени, чтобы он стал близок к горизонтальному. Чтобы аэродинамические рули продолжали действовать, нужна скорость относительно воздуха. Любые угловые отклонения приведут к неоправданному увеличению нагрузки на шасси в точке приземления. Поэтому большинство авиакатастроф происходят на завершающей стадии полета – посадке [1].

Для беспилотных ЛА (БПЛ) весьма актуальной задачей является реализация автоматической посадки. Вместо пилота бортовая система управления должна решать ряд задач планирования действий, оценки текущего состояния и управления исполнительными органами. При этом система автоматического управления (САУ) должна обеспечивать устойчивость, малое время отработки больших отклонений, адаптивность к воздействию возмущений и точность выхода

в заданную точку приземления. В соответствии с принятой Международной организацией гражданской авиации классификацией, различают три основные категории посадки в зависимости от параметров метеоминимумов – дальности, видимости и высоты нижней границы облаков [2].

Системы посадки I категории обеспечивают автоматический возврат ВС в район аэродрома и снижение его по глиссаде до высоты 60 м над ВПП в условиях низкой облачности. Системы посадки II категории обеспечивают автоматический возврат ВС в район аэродрома и движение его по глиссаде до высоты 30 м при еще более низкой облачности. Системы посадки III-б категории обеспечивает автоматическую посадку ВС в условиях тумана. Системы посадки III-а категории обеспечивают автоматическую посадку ВС в условиях полного отсутствия видимости и автоматическое движение по рулежной дорожке к месту стоянки. Большинство в настоящее время действующих аэродромов России оснащено системами посадки, обеспечивающими посадку по категории не выше I и лишь аэропорты первого класса Домодедово, Внуково и Шереметьево, оборудованы системами, обеспечивающими посадку по категории II.

Одной из распространенных посадок БЛА является так называемая посадка «по-самолетному» на подготовленную площадку, дополнительно оборудованную радиотехническими средствами посадки. Данная

система посадки используется для управления с земли сверхлегкими БЛА [3].

Автоматическая самолетная посадка может быть выполнена двумя способами. Первый способ, применяемый в настоящее время, состоит в использовании специальной аппаратуры, установленной на земле и на БЛА. Аппаратура, расположенная на земле формирует световой луч (радиолуч), а датчики, установленные на БЛА, вырабатывают сигналы пропорциональные отклонению центра масс аппарата от сформированного луча. Бортовой вычислитель системы посадки передает эту информацию вычислителю САУ для формирования соответствующих отклонений рулевых поверхностей аппарата. Примером такой системы посадки может служить применяемая на большинстве аэродромов ILS (Instrumental Landing System) или система посадки «Максант», предназначенная для посадки ЛА по II-IIIа категориям. Она основана на высокоточном определении трех текущих координат БЛА (курса, дальности и высоты) разностно-дальномерным способом. Для этого вокруг ВПП устанавливается не менее 4 радиомаяков, излучающих кодированные радиосигналы. Один из маяков – ведущий, остальные – переизлучающие, которые после приема сигнала от ведущего маяка излучают свои собственные кодированные сигналы. На борту БЛА устанавливается аппаратура приема всех этих сигналов и их обработки. В процессор перед полетом закладывается желаемая траектория снижения (глиссада) [4]. Вычисляемые на борту координаты БЛА относительно точки посадки позволяют определить отклонение БЛА от желаемой глиссады в каждый момент времени и на основании этого отклонения выработать команды управления БЛА для вывода его на заданную глиссаду. Тем самым выдерживается заданная траектория снижения.

Посадка «по-самолетному» на подготовленную, но необорудованную радиотехническими средствами посадки площадку с использованием только бортового комплекса измерительно-информационной аппаратуры, используется в случае управления полетом в автономном режиме без участия технических средств на земле. Этот второй способ автоматической посадки, разрабатываемый рядом фирм, состоит в использовании дифференциальных методов спутниковой навигации. Дифференциальная навигация предполагает размещение в некоторой реперной точке, координаты которой точно известны, приемника спутниковой навигации. Координаты БЛА определяются относительно этой точки. При этом погрешности в определении координат снижаются с десятков до единиц и долей метра. На основе дифференциальной спутниковой навигации может быть создана высокоточная система посадки, не требующая специальной аппаратуры. Примером работы данной системы является посадка беспилотного ЛА на корабль. В данной системе использован принцип относительной навигации, под которым понимается определение отно-

сительных (взаимных) координат и скоростей между подвижными объектами [5].

Проведенный анализ применяемых способов посадки БЛА позволяет сделать ряд выводов: основной недостаток самолетной посадки БЛА на основе использования аэродромных радиотехнических средств связан со сложностью подготовки соответствующей площадки со всей необходимой инфраструктурой. Автоматическая посадка БЛА на подготовленную, но не оборудованную площадку с использованием бортового комплекса измерительно-информационной аппаратуры является более перспективной, но опять же, как и предыдущий способ, требует относительно ровную площадку определенной длины для пробега БЛА после касания земли, а это не всегда возможно.

### Библиографические ссылки

1. Летов А. М. Динамика полета и управление. М. : Наука, 1969. 360 с.
2. Лебедев Г. Н., Ефимов А. В. Применение динамического программирования в задаче маршрутизации полета БЛА // Научный вестник СГАУ. Самара, 2011. № 3. С. 222–229.
3. Лебедев Г. Н., Елисеев В. Д., Ивашова Н. Д. «задачи автоматического управления посадочным маневром беспилотного летательного аппарата при сильном боковом ветре и подходы к ее решению // Тр. МАИ. 2013. № 70.
4. Системы автоматического и директорного управления самолетом / И. А. Михалев, Б. Н. Окоемов, И. Г. Павлина и др. М. : Машиностроение, 1974. 230 с.
5. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин и др. М. : Наука, 1983. 393 с.

### References

1. Letov A. M. *Dinamika poleta i upravlenie* [Flight dynamics and control]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 360 p.
2. Lebedev G. N., Efimov A. V. [Application of dynamic programming in the UAV flight routing problem]. *Nauchnyy vestnik SGAU*, 2011. No. 3. P. 222–229 (In Russ.)
3. Lebedev G. N., Eliseev V. D., Ivashova N. D. [Formulation of the problem of automatic control of the landing maneuver of an unmanned aerial vehicle with a strong side wind and approaches to its solution]. *Trudy MAI*, 2013. No. 70. (In Russ.)
4. System automatic and Director control plane / I. A. Mihalev, B. N. Okoemov, I. G. Pavlina et al. Moscow, 1974. P. 230.
5. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov* [Mathematical theory of optimal processes] / L. S. Portnyagin et al. Moscow, Nauka Publ. 1983. 393 p.

© Дмитриев Д. В., Акзигитова И. А.,  
Огородникова Ю. В., 2018



УДК629.7.08

## ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ УЗЛОВОГО АЭРОПОРТА

Н. В. Козарь, А. В. Кацура, Д. Е. Строков, А. А. Кацура, А. А. Громова

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

*Рассмотрена возможность оптимизации управления технологическими процессами узловых аэропортов с точки зрения системы массового обслуживания. Выполнено формирование рекомендаций оптимизации по управлению технологическими процессами.*

*Ключевые слова: аэропорты, оптимизация, технологические процессы.*

## THE OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES CONTROL OF HUB AIRPORT

N. V. Kozar, A. V. Katsura, D. E. Strokov, A. A. Katsura, A. A. Gromova

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

*The authors consider the optimization of technological processes control of hub airport. The recommendations of the optimization of technological processes control are given.*

*Keywords: airports, optimization, technological processes*

С позиции теории систем узловой аэропорт (хаб) представляет собой сложную динамическую стохастическую систему, в которую поступают существенно нестационарные потоки воздушных судов (ВС), пассажиров и др. Выраженные циклические колебания интенсивности поступающих потоков обусловлены волновым характером расписания узлового аэропорта, предполагающим организацию так называемых «волн» массовых прибытий – отправок рейсов, в пределах которых выделяют три временных интервала, первый из которых соответствует «волне» (комплекс) прибытия рейсов, второй – периоду трансфера пассажиров и их багажа на стыковочные рейсы, третий – «волне» (комплекс) отправления рейсов.

В работе В. А. Романенко [1; 2] Оптимизация управления технологическими процессами узлового аэропорта как системы массового обслуживания с нестационарными потоками и частичной взаимопомощью каналов. Были представлены и подробно рассмотрены задачи параметрической оптимизации СМО:

- 1) задача минимизации числа каналов;
- 2) задача минимизации времени пребывания в системе.

Сформулированы две упомянутые выше задачи оптимизации с различными критериями, решения которых можно рассматривать как некоторые предельные случаи решения многокритериальной задачи, когда значимость одного из критериев полностью преобладает над значимостью другого. Первая задача, в которой в роли критерия оптимальности выступает минимум численности аэропортовых средств обслуживания, соответствует ситуации, когда аэропортовое

предприятие своей приоритетной целью ставит обеспечение экономичности перевозок. Вторая задача, где критерием является минимальное время пребывания в аэропорту, соответствует ситуации, когда аэропортом в качестве более важной выбрана цель сокращения временных затрат на перевозку.

Сокращение числа каналов достигается ценой роста времени пребывания заявки в системе [3]. В результате решения задачи 1 результатом является существенная экономия потребляемого числа каналов. Аналогичный показатель для задачи 2 значительно выше почти в два раза. Таким образом, оптимизация численности обслуживающих каналов позволяет почти в два раза сократить время, в течение которого требуется задействовать максимальное число каналов.

Сокращение числа каналов достигается ценой роста времени пребывания заявки в системе. Сравнение результатов решения задач 1 и 2, говорит о том, что в первом случае наблюдаются семь временных интервалов, а во втором – только один интервал, в течение которых среднее виртуальное время пребывания заявки в системе превышает 11 мин. Суммарная продолжительность таких интервалов в задаче 1 составляет 54 мин, в задаче 1 – лишь 19 мин. Как и следовало ожидать, решение задачи 1 приводит к несколько большей загрузке каналов, по сравнению с задачей 2. В целом уровень загрузки может считаться удовлетворительным, а различия в загрузке для обеих задач незначительными [4; 5].

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие рекомендации в адрес производственных подразделений аэропорта:

– в случае устойчиво повторяющихся колебаний интенсивности прилётов и вылетов представляется целесообразным выработать определённую программу управления численностью обслуживающих средств и персонала и их перераспределением как между различными операциями, так и между индивидуальным и групповым обслуживанием в пределах одной операции;

– управление перераспределением средств между индивидуальным и групповым обслуживанием позволит эффективно влиять как на потребную численность средств, так и на временные характеристики процесса технического и коммерческого обслуживания ВС в аэропорту;

– если приоритетной целью аэропорта является сокращение времени простоя ВС на техническом и коммерческом обслуживании, то представляется целесообразным максимально возможное число ВС обслуживать группами из двух средств. Выбор указанной цели требует от аэропорта повышения общей численности средств, что неизбежно влечёт снижение качества их использования между максимумами интенсивности комплексов. Ограничить увеличение численности средств можно, применив во время пиков интенсивности управление, предполагающее повышение доли индивидуально обслуживаемых ВС;

– если приоритетной целью аэропорта является сокращение мгновенной численности используемых средств и персонала с ограничением времени простоя ВС, то программа управления должна быть более сложной. Между комплексами для обслуживания ВС средства желательно выделять попарно. На начальном этапе комплекса, предполагающем рост интенсивности потока ВС, введению «в дело» каждого дополнительного средства должен предшествовать сравнительно короткий (5–15 мин.) период, когда для обслуживания вновь прибывших ВС средства выделяются не парами, а индивидуально. Для конечного этапа комплекса с наблюдающимся снижением интенсивности зафиксировать краткосрочные интервалы с высокой долей индивидуального обслуживания на практике вряд ли возможно, поэтому здесь целесообразно использовать только групповое обслуживание. Во время пиков интенсивности рационально применять управление, предполагающее повышение доли индивидуально обслуживаемых ВС.

Приведённые результаты не только подтверждают правомерность постановки сформулированных оптимизационных задач и работоспособность алгоритма их решения, но и позволяют сформировать практические рекомендации по повышению эффективности управления ресурсами для такой перспективной группы аэропортов, как узловые аэропорты с их нестационарными потоками рейсов и колеблющейся интенсивностью обслуживания.

#### Библиографические ссылки

1. Васильева И. А., Романенко В. А., Хвостова Т. В. Оптимизация параметров системы наземного обслу-

живания воздушных судов аэропорта на базе имитационной модели с нечётким регулятором // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16, № 1. С. 7–19.

2. Потапов И. В., Романенко В. А. Проблемы совместной оптимизации параметров узлового аэропорта и веерной схемы перевозок / Региональная научно-практическая конференция, посвящённая 50-летию первого полёта человека в космос (14–15 апреля 2011, г. Самара). Самара: Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета, 2011. 298 с.

3. Романенко В. А. Оптимизация управления технологическими процессами узлового аэропорта как системы массового обслуживания с нестационарными потоками и частичной взаимопомощью каналов. Управление большими системами / Сборник трудов. Вып. 36. М.: ИПУ РАН, 2012. 315 с.

4. Ярошевич Н. Ю., Вязовская В. В. Формирование узловых аэропортов в Российской Федерации: оценка перспектив / Транспорт Российской Федерации. 2011. № 4 (35). С. 59–62.

5. Приложение 14. Аэродромы. Т. 1. Проектирование и эксплуатация аэродромов. ИКАО, 2016. 100 с.

#### References

1. Vasil'eva I. A., Romanenko V. A., Khvostova T. V. [Optimization of parameters of system of land service of aircrafts of the airport on the basis of imitating model with the indistinct regulator]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*. 2017. No. 1. P. 7–19. (In Russ.)

2. Potapov I. V., Romanenko V. A. *Problemy sovместnoy optimizatsii parametrov uzlovogo aeroporta i veerной skhemy perevozok*. [Problems of joint optimization of parameters of the nodal airport and fan scheme of transportations.] Samara: *Izdatel'stvo Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2011. 298 p. (In Russ.)

3. Romanenko V. A. *Optimizatsiya upravleniya tekhnologicheskimi protsessami uzlovogo aeroporta kak sistemy massovogo obsluzhivaniya s nestatsionarnymi potokami i chastichnoy vzaimopomoshch'yu kanalov. Upravlenie bol'shimi sistemami* [Optimization of management of technological processes of the nodal airport as the systems of mass service with non-stationary streams and partial mutual aid of channels. Management of big systems]. Moscow: IPU RAN Publ. 2012. 315 p. (In Russ.)

4. Yaroshevich N. Yu., Vyazovskaya V. V. [Formation of the nodal airports in the Russian Federation: assessment of prospects]. *Transport Rossiyskoy Federatsii*. 2011. No. 4. P. 59–62. (In Russ.)

5. Annex 14, Aerodromes – Vol. I. Aerodrome Design and Operations. ICAO Publ., 2016. 100 p.

© Козарь Н. В., Кацура А. В., Строков Д. Е., Кацура А. А., Громова А. А., 2018

УДК 629.73.015:621.86

## ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ КОНТЕЙНЕР ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В. А. Колосов, А. Н. Коркин, С. Н. Лозовенко\*, А. В. Перфилов, А. В. Цайтлер

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
\*E-mail: lozov@iss-reshetnev.ru

*Рассмотрен изотермический контейнер для транспортирования космических аппаратов, конструктивно выполненный из теплоизоляционных плит с низким коэффициентом теплопроводности. Использование изотермического контейнера позволит обеспечить заданные комфортные условия по температуре воздуха для космического аппарата в процессе транспортирования.*

*Ключевые слова: изотермический контейнер, теплоизоляционная плита, низкий коэффициент теплопроводности, комфортные условия, космический аппарат.*

## HEAT-INSULATED CONTAINER FOR SPACECRAFT TRANSPORTATION

V. A. Kolosov, A. N. Korokin, S. N. Lozovenko\*, A. V. Perfilov, A. V. Tsaytler

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
\*E-mail: lozov@iss-reshetnev.ru

*Article describes the heat-insulated container for the spacecraft transportation which made of heat-insulating board with low heat conduction coefficient. Use of the heat-insulated container will provide comfortable temperature conditions for the spacecraft during its transportation.*

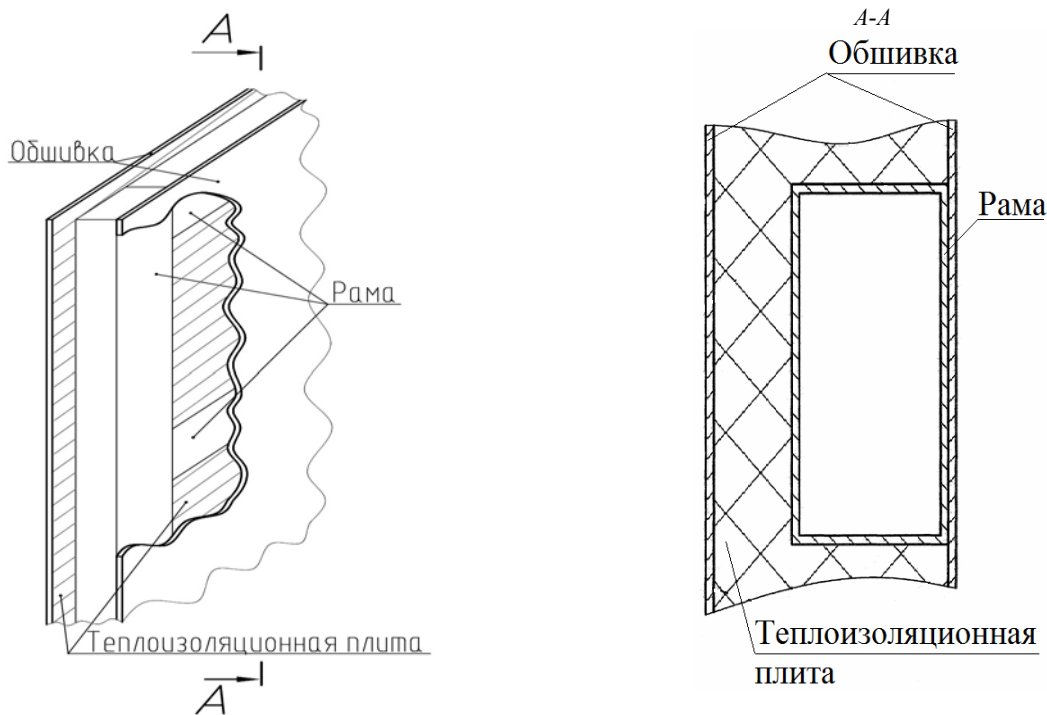
*Keywords: heat-insulated container, heat-insulating board, low heat conduction coefficient, comfortable conditions, spacecraft.*

Одним из этапов жизненного цикла космического аппарата является транспортирование от завода-изготовителя до технического комплекса космодрома (далее – ТКК) [1]. В целях защиты космического аппарата от воздействия негативных факторов окружающей среды и динамических нагрузок транспортирование космического аппарата до ТКК выполняется в изотермическом контейнере, в котором обеспечиваются комфортные условия для космического аппарата по температуре, влажности, чистоте воздуха и по уровню динамических нагрузок [2].

Для обеспечения комфортных условий по температуре воздуха от плюс 5 до плюс 35 °С изотермический контейнер реализовывается в теплоизолированном корпусе с активными средствами обеспечения температурного режима (воздухоохладительные и воздухонагревательные устройства), состоящем из силового основания, на опорах которого монтируется космический аппарат и крышки, плоскость стыка которых выполняется максимально герметично с возможностью многократного открытия/ закрытия [3]. С помощью воздухоохладительных и воздухонагревательных устройств воздух внутри изотермического контейнера охлаждается или нагревается соответственно в зависимости от температуры окружающего воздуха вне изотермического контейнера [4]. Теплоизоляция изотермического контейнера обеспечивает поддержание комфортных условий по температуре воздуха от плюс 5 до плюс 35 °С при работающих активных средствах

обеспечения температурного режима и сохраняет запас тепловой энергии при их перерывах в работе, например, при проведении погрузочно-разгрузочных работ с изотермическим контейнером.

В процессе исследования возможных вариантов обеспечения заданных теплофизических характеристик изотермического контейнера, основываясь на опыте эксплуатации изотермических контейнеров с теплоизоляционным материалом марки K-Flex, наклеиваемым на внутренние поверхности изотермического контейнера, в ходе которого выявлен ряд замечаний, предложен вариант конструктивного исполнения изотермического контейнера на базе теплоизоляционных панелей (см. рисунок). Теплоизоляционная панель представляет собой конструкцию, силовым элементом которой является рама, выполненная из металлического профиля. К раме закрепляется обшивка из алюминиевых листов, а к раме и обшивке приклеивается теплоизоляционный материал с низким коэффициентом теплопроводности, например, теплоизоляционная плита THERMIT XPS35 с коэффициентом теплопроводности 0,033 Вт/(м×К) [5]. После чего, к другой стороне теплоизоляционной плиты приклеивается обшивка, что образует теплоизоляционную панель. Таким образом, изотермический контейнер представляет собой сборочную конструкцию, крышка и основание которого выполнены из теплоизоляционных панелей, скрепленных между собой угловыми стойками.



Теплоизоляционная панель

Ключевыми преимуществами изотермического контейнера на базе теплоизоляционных панелей являются:

- высокие жесткостные характеристики;
- долговечность;
- простота реализации;
- низкая теплопроводность.

Описанный вариант конструктивного исполнения изотермического контейнера на базе теплоизоляционных панелей обеспечивает необходимые комфортные условия для космического аппарата в течение длительного воздействия негативных факторов окружающей среды.

#### Библиографические ссылки

1. Мобильный комплекс для транспортирования и подготовки космических аппаратов малого класса к запуску / С. Н. Лозовенко [и др.] // Решетневские чтения : материалы XIX Междунар. науч. конф. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2015. С. 561–562.

2. Возможные варианты защиты автоматических космических аппаратов от воздействия негативных факторов в процессе их транспортирования / С. Н. Лозовенко [и др.] // Исследования наукограда. Железногорск, 2015. № 3. С. 15–19.

3. Обеспечение требуемого класса чистоты воздуха внутри транспортных контейнеров в процессе транспортирования и хранения космических аппаратов / А. В. Цайтлер [и др.] // Решетневские чтения : материалы XVIII Междунар. науч. конф. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2014. С. 445–447.

4. Пат. РФ № 175886. Изотермический контейнер / Лозовенко С. Н. [и др.]. М. : ФИПС, 2017. 8 с.

5. Технические характеристики плит «THERMIT» [Электронный ресурс]. URL: [http://thermit.su/thermit\\_xps/tech\\_characteristic.htm](http://thermit.su/thermit_xps/tech_characteristic.htm) (дата обращения 04.09.2018).

#### References

1. Lozovenko S. N. [et al.] [Mobile complex for transportation and small class spacecraft preparation]. Proceedings of XIX Int. sci. conf. “Reshetnev Readings”; SibSAU. Krasnoyarsk, 2015. P. 561–562.

2. Lozovenko S. N. [et al.] [Possible variants of protection of automatic spacecraft from influence of negative factors during their transportation]. Scientific review “Issledovania naukagrada”. Zheleznogorsk, 2015. № 3. P. 15–19.

3. Tsaytler A. V. [et al.] [Providing the demanded air cleanliness class inside the transport container during transportation and storage of the spacecraft]. Proceedings of XVIII Int. sci. conf. “Reshetnev Readings”; SibSAU. Krasnoyarsk, 2014. P. 445–447.

4. Patent RF, no. 175886. [Heat-insulated container] / Lozovenko S. N. [et al.]. Moscow, FIPS, 2017.

5. Technical characteristics of heat-insulating board “THERMIT”. Available at: [http://thermit.su/thermit\\_xps/tech\\_characteristic.htm](http://thermit.su/thermit_xps/tech_characteristic.htm) (accessed: 04.09.2018).

© Колосов В. А., Коркин А. Н., Лозовенко С. Н., Перфилов А. В., Цайтлер А. В., 2018

УДК 629.7.063.6

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНОВЛЕНИЯ АЭРОНАВИГАЦИОННЫХ ДАННЫХ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ САМОЛЕТА AIRBUS A320

М. В. Коршуненко, А. С. Баринов, В. Ю. Перевертов

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

*Рассматриваются возможности повышения эффективности обновления аэронавигационных данных системы управления полетом самолета Airbus A320.*

*Ключевые слова: навигация, Airbus A320.*

## EXPLORING THE POSSIBILITIES OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF UPDATING THE AERONAUTICAL DATA OF THE AIRBUS A320 FLIGHT CONTROL SYSTEM

M. V. Korshunenko, A. S. Barinov, V. Yu. Perevertov

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

*In this paper, the possibility of increasing the efficiency of updating the aeronautical data of the flight control system of the Airbus A320 aircraft is considered.*

*Keywords: navigation, Airbus A320.*

Разработанная система обновления базы данных системы FMC Airbus A320 представляет собой локальную беспроводную сеть, состоящую из сервера и подключенных к нему бортовых компьютеров и расположенную непосредственно на территории аэродрома/аэропорта (рис. 1) [1].

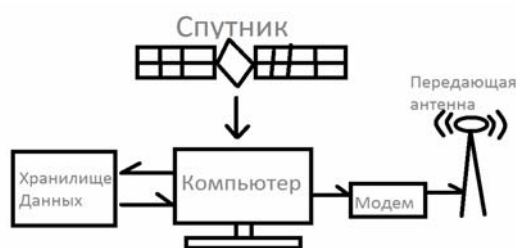


Рис. 1. Структура сервера

При подключении борта ВС в локальную сеть обмена данных аэропорта/аэродрома, компьютер запрашивает информацию у борта ВС о состоянии и актуальности баз данных устройств. При получении информации с борта о неактуальных или поврежденных БД запрашивает и передает на борт из наземного хранилища на борт необходимые БД [2].

Для эффективной работы данной системы предполагается ввести три типа обновлений баз данных: периодическое, предполетное и оперативное.

Периодическое обновление бортовых БД представляет собой периодическое обновление БД, перио-

дичность которых устанавливается Международной Организацией Гражданской авиации (ICAO). Например, обновление базы данных рельефа производится не реже чем раз в 6 месяцев, а обновление аэронавигационной информации раз в 28 дней. При данном обновлении устаревшие базы данных заменяются полностью на новые [3].

Предполетное обновление включает в себя обновление непосредственно перед полетом, запрашивается полетная информация в текущей местности.

Оперативное обновление производится в любой момент времени по запросу.

В отличие от первого типа обновления, который предусматривает полную замену БД в соответствии с требованиями ICAO строго в определенный срок, последние два типа обновления предназначены для оперативной загрузки информации актуальной на конкретный момент времени. Что позволяет обновить только необходимую часть БД [4].

Система обновления БД подразумевает два режима работы.

Первый режим работы заключается в передаче БД на борт ВС Airbus A320 по инициативе наземной службы при получении обновленных данных (рис. 2).

На наземном компьютере в автоматическом режиме производится скачивание информации из Internet либо через спутниковую связь. Затем устанавливается связь с бортовым компьютером, который выдает информацию о сроке истечения актуальности БД, при определении неактуальных баз либо их повреждении

производится их полная перезапись на актуальные и целые.

Второй режим работы заключается в передачи базы данных на борт ВС по запросу непосредственно с борта ВС Airbus A320 экипажем или автоматической системы в бортовом компьютере.

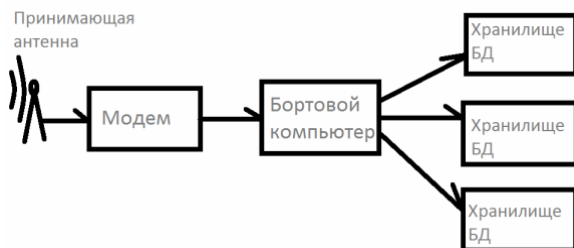


Рис. 2. Структура подключенного к сети ВС Airbus A320

Процесс передачи данных схож с предыдущим, главное отличие в том, что производится перезапись не всей БД, а той части, об обновлении которой был запрос на наземный компьютер.

Разработанная система представляет собой локальную беспроводную сеть, состоящую из сервера и подключенных к нему бортовых компьютеров и расположенную непосредственно на территории аэродрома, аэропорта или ВПП на определенном расстоянии и защищенном протоколами безопасности сети. Сети, образованной клиентами (воздушными судами, аэродромной техникой и др.) и сервером RADIUS [5].

#### Библиографические ссылки

1. Габейдулин Р. Х., Горячев Д. И., Зубкова И. Ф. Алгоритмическое и программное обеспечение автоматизированной системы планирования использования воздушного пространства в ГЦ ЕС ОрВД // Научный Вестник МГТУ ГА. 2010. № 159.

2. Гоголь В. А. Основы системы спутниковой навигации : учеб. пособие. Красноярск, 2001.

3. Постановление об утверждении федеральной целевой программы «Модернизация Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации (2009–2020 годы)» от 1 сентября 2008 г. № 652. Москва, 2008.

4. Казаков В. А., Применение линий передачи данных для ОВД в системах CNS/ATM : учеб. пособие. Ульяновск : УВАУ ГА, 2004. 13 с.

5. Казаков В. А., Системы CNS/ATM. 2-е изд., перераб. и доп. Ульяновск : УВАУ ГА, 2008. 103 с.

#### References

1. Gabeydulin R. H., Goryachev D. I., Zubkova I. F. [Algorithmic and software support of the automated system for planning airspace use in the EC of the ATM EC] *Algoritmicheskoe i programnoe obespechenie avtomatizirovannoy sistemy planirovaniya ispol'zovaniya vozdušnogo prostranstva v GTs ES OrVD. Nauchnyy vestnik MGTUGA*. 2010. No. 159.

2. Gogol' V. A. *Osnovy sistemy sputnikovoy navigatsii: Uchebnoe posobie* [Basics of the satellite navigation system : Textbook]. Krasnoyarsk, 2001.

3. Resolution on the approval of the federal target program “Modernization of the Unified Air Traffic Management System of the Russian Federation (2009–2020)” dated September 1, 2008. N 652. Available at: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102124154&rdk=&backlink=1> (accessed 30.08.2017). (In Russ.)

4. Kazakov V. A. *Primenenie liniy peredachi dannykh dlya OVD v sistemakh SNS/ATM: ucheb. posobie* [Application of data transmission lines for ATS in CNS]. *Ulyanovsk : UVAU GA publ*, 2004. 13 p.

5. Kazakov V. A., *Sistemy CNS/ATM: ucheb. posobie* [CNS / ATM systems: training. allowance] . *Ulyanovsk : UVAU GA publ*, 2008. 103 p.

© Коршуненко М. В., Баринов А. С.,  
Перевертов В. Ю., 2018

УДК 629.7/621.01

## АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА СЕТЕВЫХ ГРАФИКОВ К ПРОИЗВОДСТВЕННОМУ ПЛАНИРОВАНИЮ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Т. А. Легкова, О. Г. Бойко, Д. А. Андреев

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

*Рассмотрены возможности использования метода сетевого планирования для организации работ по техническому обслуживанию воздушных судов в системе гражданской авиации. Сделан прогноз о перспективах применимости метода.*

*Ключевые слова: система технического обслуживания, работы первого ранга, сетевой график, планирование по методу критического пути, производственное планирование.*

## APPLYING OF THE CRITICAL PATH SCHEDULING METHOD FOR PLANNING OF AIRCRAFT MAINTENANCE SERVICES

T. A. Legkova, O. G. Boyko, D. A. Andreev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: ktur.legko@gmail.com

*The paper considers an algorithm of applying the critical path scheduling method for planning of aircraft maintenance services organization in civil aviation system.*

*Keywords: aircraft maintenance, first rank works, network graph, critical path scheduling method, master production scheduling.*

Производственное планирование в предприятиях, занимающихся техническим обслуживанием воздушных судов, предполагает постоянный поиск путей взаимодействия большого числа различных служб и систем. Для успешной работы авиакомпаний необходимо соблюдать баланс между периодами летной и технической эксплуатации самолетов, причем не допускаются простои техники на базах из-за отсутствия сертифицированного персонала, необходимого обслуживания, просрочки выполнения периодических работ и т. д. [1].

Техническое обслуживание воздушных судов, планирование работ и коммерческих рейсов являются примерами систем, в которых существенную роль играют последовательность отдельных этапов работ и их взаимосвязь. Характерным для таких систем является то, что этапы работ, которые выполняются как бы независимо друг от друга, фактически взаимно обусловлены, выполнение одних не может быть начато раньше, чем будут завершены другие.

Для решения задач планирования последовательности работ в таких системах используют метод сетевого планирования или сетевое планирование управления.

Основным исходным материалом для сетевого планирования является список или перечень работ, в котором указана их взаимная обусловленность. Работы подразделяются на ранги. Для начала работ первого ранга не требуется выполнение никаких других работ в данном комплексе. Работы второго ранга обу-

словлены одной или несколькими работами первого ранга, и т. д. [2].

Целью данной работы является исследование процесса производственного планирования работ по техническому обслуживанию самолетов флота авиакомпании NordStar Airlines Таймыр, с целью поиска организационных, временных и трудовых резервов, на основе данных авиапредприятия ТС Техник.

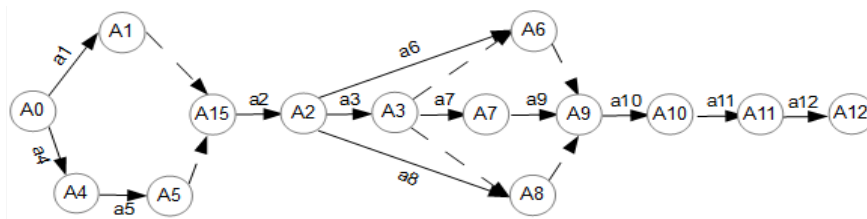
Для наглядности работы метода сетевых графиков рассмотрим план работ на один самолет в течение одного простоя на линейной станции технического обслуживания.

Выделим 6 типов работ:

- 1) работы без указанных трудозатрат – это условные работы, которые мы вводим для логической связи, а также работы, требующие затрат временных ресурсов, но выполняемые сторонними организациями (например, летная эксплуатация воздушного судна);
- 2) линейные работы, здесь обслуживание самолета перед вылетом и после приземления;
- 3) плановые работы, перенос которых на другой простой в данный момент невозможен, здесь Ramp-check;
- 4) плановые работы, выполнение которых зависит от налета, здесь 750FH;
- 5) работы, для выполнения которых необходим ангар и привлечение сторонних организаций – здесь внутренняя уборка самолета (Internal Cleaning);
- 6) некритические работы по устранению дефектов (DR).

Анализ плана работ по одному простоя самолета Boeing 737-800

Работа/событие	Обозначение	Опирается на работы	Трудозатраты Мh, чел.-часы	Продолжительность $t_i$ , ч
Приземление самолета	A <sub>0</sub>	–	–	–
Разгрузка самолета, выход пассажиров и экипажа	a <sub>1</sub>		0	0,5
АА	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub> , a <sub>5</sub>	1,5	1
Буксировка в ангар	a <sub>3</sub>	a <sub>2</sub>	0	1
Получение ИТП плана на смену, карт, оборудования и расходного материала	a <sub>4</sub>		0	0,25
Доставка ИТП и оборудования к ВС	a <sub>5</sub>	a <sub>4</sub>	0	0,25
750 FH	a <sub>6</sub>	a <sub>2</sub> ,a <sub>5</sub>	0,21	1,21
Internal Cleaning (необходим ангар)	a <sub>7</sub>	a <sub>2</sub> ,a <sub>3</sub> ,a <sub>5</sub>	0,5	4
DR	a <sub>8</sub>	a <sub>2</sub> ,a <sub>5</sub>	1	2
Буксировка из ангара на стоянку	a <sub>9</sub>	a <sub>3</sub> ,a <sub>7</sub>	0	1
RAMP	a <sub>10</sub>	a <sub>4</sub> ,a <sub>9</sub>	1,64	2
BD	a <sub>11</sub>	a <sub>4</sub> ,a <sub>10</sub>	1,5	1
Вылет	a <sub>12</sub>	a <sub>11</sub>	0	
Состояние полета	A <sub>12</sub>	–	–	–



Сетевой график выполнения работ на самолете Boeing 737-800 в течение одного простоя

Создадим перечень работ и упорядочим их в соответствие с рангами работ и их взаимной обусловленностью (см. таблицу). В таблице обозначены работы  $a_i$  – процессы, приводящие к определенному результату и события  $A_i$  – факт завершения предыдущих работ.

На основе структурной таблицы построен сетевой график (см. рисунок). Пунктирными линиями обозначена связь между событиями, которые не связаны фактическими работами.

Если соединить сетевой график с осью времени, то получается временной сетевой график, где проекции длины каждой стрелки будут соответствовать времени выполнения этой работы. На таком графике наглядно можно выделить критический путь как совокупность наиболее уязвимых участков, которые должны укладываться во временной план с наибольшей четкостью [3].

Что касается остальных «некритических» работ, то каждая из этих работ имеет известные временные резервы и может быть закончена с некоторым запозданием без ущерба для срока выполнения всего комплекса работ [4–5].

Использование временного сетевого графика при планировании на различные сроки позволяет решить такие вопросы как:

- поиск способов оптимизации планирования полетов и технического обслуживания,
- выявление ожидаемых проблемных мест, требующих изменения планов полета, договоров со сто-

ронными организациями, решение вопросов обеспечения необходимого оборудования и квалифицированного персонала для выполнения конкретных работ, оперативное корректирование планов технического обслуживания со снижением риска пропустить критические работы.

Таким образом, использование возможностей построения сетевых временных графиков позволит выполнить анализ эффективности планирования работ, определить временные резервы в системе технического обслуживания воздушных судов, разработать алгоритмы для согласования работ связанных служб по данным авиационного предприятия.

Библиографические ссылки

- Абрамова И. Г. Управление производственными процессами на инновационном предприятии. Самара : Самар. гос. аэрокосм. ун-т., 2014. 277 с.
- Кабков В. П. Исследование операций и системный анализ. М. : МГТУ ГА, 2005. 95 с.
- Волкова В. Н. Теория систем и системный анализ. М. : Юрайт, 2012. 678 с.
- Курмаз М. В. Нахождение критического пути в сетевом планировании в условиях нечеткого задания времени // Известия ТРТУ. Таганрог : Изд-во ТРГУ, 2005. № 3(47). С. 18–21.
- Тихомиров В. И. Организация, планирование и управление производством летательных аппаратов : учебник для вузов. М. : Машиностроение, 1978. 496 с.



### References

1. Abramova I. G. *Upravleniye proizvodstvennymi protsessami na innovatsionnom predpriyatii* [Management of production processes at an innovative enterprise]. Samara, Samara State Aerospace University, 2014. 277 p.
2. Kabkov V. P. *Issledovaniye operatsiy i sistemnyy analiz* [Operations research and system analysis]. Moscow, The Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2005. 95 p.
3. Volkova V. N. *Teoriya sistem i sistemnyy analiz* [System theory and system analysis]. Moscow, Urait Publ., 2012. 678 p.
4. Kurmaz M. V. *Nakhozheniye kriticheskogo puti v setevom planirovanii v usloviyakh nechetkogo zadaniya vremeni* [Finding the critical path in network planning in conditions of fuzzy task of time]. *Izvestiya TRTU*. Taganrog: TRGU Publ. 2005. No. 3(47). (In Russ.)
5. Tikhomirov V.I. *Organizatsiya, planirovaniye i upravleniye proizvodstvom letatel'nykh apparatov* [Organization, planning and management of the aircraft industry]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1978. 496 p.

© Легкова Т. А., Бойко О. Г.,  
Андреев Д. А., 2018

УДК 656.7

## МЕТОД ПОДДЕРЖАНИЯ ЛЕТНОЙ ГОДНОСТИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ С БОРТОВЫМ ЦИФРОВЫМ КОМПЛЕКСОМ В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНО НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Д. В. Липатов

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

*Рассматриваются задачи нового этапа освоения Российской Арктики и Крайнего Севера, которые не могут быть решены без обеспечения бесперебойного межарктического воздушного сообщения.*

*Ключевые слова: GPS, эффективность, дополнительное оборудование.*

## METHOD OF MAINTAINING AIRWORTHINESS OF AIRCRAFT WITH ON-BOARD DIGITAL COMPLEX IN EXTREMELY LOW TEMPERATURES

D. V. Lipatov

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

*The tasks of the new stage of development of the Russian Arctic and the Far North cannot be solved without ensuring uninterrupted inter-Arctic air communication*

*Keywords: search area, efficiency, additional equipment.*

Задачи нового этапа освоения Российской Арктики и Крайнего Севера не могут быть решены без обеспечения бесперебойного межарктического воздушного сообщения как между городами и населенными пунктами Севера страны, так и с основными узловыми центрами Сибири, Урала и других регионов. [1] Необходимость обеспечения постоянного базирования современных воздушных судов, способность безопасной и надежной работы авиатехники в самых тяжелых условиях Заполярья и Сибири при отсутствии ангарных мощностей – наиболее важное требование, предъявляемое к воздушным судам наряду с их экономическими показателями. Однако решение этих задач потребует гораздо более широкого применения именно тех воздушных судов, которые наиболее приспособлены к условиям эксплуатации в условиях низких и экстремально низких температур. В то же время необходимо отметить, что за последние 25 лет произошло почти полное вытеснение самолетов советского и российского производства западной авиатехникой. Эксплуатация современных ВС в условиях низких и экстремально низких ( $-40^{\circ}\text{C}$  и ниже) температур наружного воздуха при длительном безангарном времени стоянки приводит к увеличению параметра потока отказов в ряде систем: гидравлической, шасси, системах электрогенерации, силовых установок и особенно систем авионики и водяной системе, тем самым создавая проблему поддержания требуемого уровня летной годности воздушных судов (ВС). Опыт 25-летней эксплуатации ВС западного производства в нашей стране показывает, что проблемы

адаптации к условиям низких и особо низких температур в Сибири, Якутии, Крайнем Севере и в Арктике не решены как в практическом, так и в общесистемном плане, анализ и классификация факторов, ограничивающих эксплуатацию цифровых воздушных судов в условиях экстремально низких температур;

– выполнение комплекса работ по климатическим испытаниям воздушных судов в условиях экстремально низких температур [2];

– выполнение теплофизических оценок по результатам испытания ВС, находящегося на открытой стоянке в условиях экстремально низких температур с определением температурно-временных параметров в зонах уязвимости;

– отработка моделей и расчетных методов оценивания надежности цифровых воздушных судов в условиях экстремально низких температур;

– отработка рекомендаций и перспективных решений обеспечения надежности эксплуатации воздушных судов отечественного и иностранного производства для условий экстремально низких температур [3].

### Библиографические ссылки

1. Униченко Е. Г. Разработка методов повышения уровня безопасности полётов воздушных судов путем улучшения качества функционирования систем информационного обеспечения УВД : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.14 ; [Место защиты: Моск. гос. техн. ун-т гражд. авиации]. М., 2008. 130 с.: ил. РГБ ОД, 61 09-5/1195.

2. Щетинин А. В. Разработка элементов системы управления безопасностью при производстве полетов гражданских воздушных судов : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.22 ; [Место защиты: Моск. гос. техн. ун-т гражд. авиации]. М., 2008. 165 с.: ил. РГБ ОД, 61 09-5/430.

3. Малышева Т. А. Организационно-методическое обеспечение системы поддержки принятия решений в области регулярности полетов воздушных судов гражданской авиации : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.22 ; [Место защиты: Моск. гос. техн. ун-т гражд. авиации]. М., 2007. 200 с.: ил. РГБ ОД, 61 07-5/5361.

#### References

1. Unichenko E. G. *Razrabotka metodov povysheniya urovnya bezopasnosti poletov vozdushnykh sudov putem uluchsheniya kachestva funktsionirovaniya sistem informatsionnogo obespecheniya UVD* [Development of

methods to improve the level of aircraft safety by improving the quality of air traffic management information support systems PhD tehn. diss]. Mosow, MGTU GA Publ., 2008. 130 p.

2. Shchetinin A. V. *Razrabotka elementov sistemy upravleniya bezopasnostyu pri proizvodstve poletov grazhdanskikh vozdushnykh sudov*. [Development of elements of safety management system in civil aircraft operations PhD tehn. diss]. MGTU GA Publ., 2008. 165 p.

3. Malysheva T. A. *Organizatsionno-metodicheskoye obespecheniye sistemy podderzhki prinyatiya resheniy v oblasti regulyarnosti poletov vozdushnykh sudov grazhdanskoy aviatsii : dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk*. [Organizational and methodological support of decision-making support system in the field of regularity of civil aviation aircraft flights: PhD thesis PhD tehn. diss] MGTU GA Publ., 2007. 200 p.

© Липатов Д. В., 2018

УДК 629.7.08

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АЭРОПОРТА КРАСНОЯРСК

К. В. Макиенко, А. В. Кацура, Д. Е. Строков, А. А. Кацура, А. А. Громова

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

*Авторами проведен обзор по существующим системам электрооборудования в различных аэропортах, в том числе в ООО «Аэропорт Красноярск». Выполнены расчеты по экономической выгоде замены галогенных ламп на светодиодные лампы на взлётно-посадочной полосе ООО «Аэропорт Красноярск».*

*Ключевые слова: аэропорт, электрооборудование, взлётно-посадочная полоса.*

## INCREASE IN EFFICIENCY OF OPERATION OF THE AIRPORT KRASNOYARSK

K. V. Makienko, A. V. Katsura, D. E. Strokov, A. A. Katsura, A. A. Gromova

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

*The authors have carried out the review on the existing systems of electric equipment at various airports, including LLC “Krasnoyarsk Airport”. Calculations for an economic benefit of replacement of halogen lamps by LED lamps on a runway of LLC “Krasnoyarsk Airport” are executed.*

*Keywords: airports, electric equipment, Krasnoyarsk airport.*

Энергоэффективность и энергосбережение являются важнейшими общегосударственными задачами. Одно из направлений государственной политики – внедрение энергосберегающих технологий в освещение.

Освещение транспортных объектов должно соответствовать ряду общих требований:

– независимость эксплуатации от погодных условий, в том числе интенсивные осадки, порывы сильного ветра;

– источник света должен генерировать интенсивный поток света, то есть обеспечивать высокую яркость освещения;

– надежность и долговечность, простота эксплуатации и доступность обслуживания;

– энергоэффективность.

Освещение для аэропортов делится на 3 вида:

– дизайнерское – внутреннее и наружное, включая сигнальное освещение высотных зданий вблизи аэропорта;

– техническое;

– для взлетно-посадочной полосы (ВПП).

В свою очередь, система освещения ВПП подразделяется на три подсистемы: огней сближения, боковых огней и предупреждающих аэродромных огней. В аэропорту Красноярска используются галогенные лампы. В соответствии с таблицей, суммарная стоимость галогеновых ламп на ВПП составляет 2,06 млн руб., светодиодных – 2,96 млн руб.

Далее, рассчитаем затраты электроэнергии при использовании галогеновых ламп и светодиодных. Исходя из того, что каждая галогенная лампа на ВПП в среднем горит 12 часов в день и, соответственно, 4320 часов в год, суммарные затраты электроэнергии в год составят ~580,5 МВт. С учетом стоимости 1 кВт\*ч для юридических лиц в Красноярском крае, составляющей 3,78 руб., общая сумма затрат составит ~2,19 млн руб. в год. При расчете по этой же схеме, сумма затрат для светодиодных ламп составит ~381,7 тыс. руб. в год. Таким образом, экономия составляет 1,81 млн руб. в год.

### Исходные данные

Кол-во огней, шт.	Мощность ламп, Вт	Кол-во ламп, шт.	Цена гал. ламп (руб.)	Цена свет. ламп (руб.)
1 348	30	106	593	924
	48	862	1 438	1 177
	100	24	1 228	1 391
	150	553	1 242	3 145
	105	6	1 113	1 196
	200	16	1 421	3 532

С учетом закупки новых ламп и последующей эксплуатации, суммарные затраты на первый год для галогеновых ламп – 4,25 млн руб, светодиодных 3,34 млн руб. За первый год экономия составит 0,91 млн руб. Экономия за 2 года – 2,72 млн руб., за 3 года – 4,53 млн руб.

Таким образом, проведенный анализ показал, что система освещения ВПП ООО «Аэропорт Красноярск» требует модернизации. Установлено, что замена галогеновых ламп на светодиодные снижает затраты на электроэнергию в 5,7 раз. Расчет экономической эффективности проекта показывает, что проект окупится в течение трех лет, а экономия за последующие годы составит 2,28 млн руб.

#### Библиографические ссылки

1. Юркин Ю. А. Аэродромы и аэропорты. М. : МГТУ ГА, 2000. 104 с.
2. Голубев И. С. Эффективность воздушного транспорта. М. : Транспорт, 1982. 230 с.
3. Приложение 14. Аэродромы. Т. 1. Проектирование и эксплуатация аэродромов. ИКАО, 2016. 100 с.

4. Ашфорд Н., Стентон Х. П. М., Мур К. А. Функционирование аэропорта. М. : Транспорт, 1991. 366 с.

5. Бажов Л. Б. Основы аэропортовой деятельности и обеспечения полетов : учеб. пособие. Ульяновск : УВАУ ГА, 2011. 80 с.

#### References

1. Yurkin Yu. A. *Aerodromy i aeroporty* [Airfields and airports]. Moscow, MGTU GA publ., 2000. 104 p.
2. Golubev I. S. *Effektivnost' vozduhnogotransporta* [Efficiency of air transport]. Moscow, Transort publ., 1982. 230 p.
3. Annex 14, Aerodromes Volume I, Aerodrome Design and Operations. ICAO publ., 2016. 100 p.
4. Ashford N., Stenton Kh. P. M., Mur K. A. *Funktsionirovanieaeroporta* [Functioning of the airport]. Moscow, Transort publ., 1991. 366 p.
5. Bazhov L. B. *Osnovyaeroportovoydeyatelnosti i obespecheniyapoletov* [Bases of airport activity and ensuring flights]. Ul'yanovsk : UVAU GApubl, 2011. 80 p.

© Макиенко К. В., Кацура А. В., Строков Д. Е., Кацура А. А., Громова А. А., 2018

УДК 629.7.036.3; 629.7.083.03

## МЕТОДЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Р. В. Менчиков, Е. С. Панкеев, А. А. Парпуц

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

*В настоящее время высокая стоимость ремонта современных авиационных двигателей является действительностью авиационной промышленности. Поэтому для экономичности содержания двигателей стало возможным увеличение ресурса при условии обеспечения высокого уровня надежности. Это может быть достигнуто прежде всего с помощью различных методов технической диагностики, выявляющих неисправности двигателя на ранней стадии их развития, и тем самым максимально использовать эксплуатационные возможности каждого двигателя без выполнения принудительных ремонтов.*

*Ключевые слова: методы технической диагностики, маслосистема, температура, визуально-оптический метод, радиография, феррография.*

## METHODS OF TECHNICAL DIAGNOSING OF AVIATION ENGINES

R. V. Menchikov, E. S. Pankeev, A. A. Parputs

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

*At present, the high cost of repairing modern aircraft engines is the reality of the aviation industry. Therefore, for the economy of engine maintenance, increasing of the resource became possible, if provide that a high level of reliability is ensured. We can achieve it primarily through various methods of technical diagnostics that detect engine failures at an early stage of their development, and thereby maximize the operational capabilities of each engine without performing forced repairs.*

*Keywords: methods of technical diagnostics, oil system, temperature, visual-optical method, radiography, ferrography.*

По мере разработки, отладки и проверки методов диагностирования авиационных двигателей, создаются всё более эффективные методики не только поиска возникающих неисправностей, но предотвращение предотказовых ситуации в полёте. При диагностировании двигателя по отдельным узлам и элементам методики диагностирования будут относительно простыми и не будут иметь значительных недостатков. Базовые характеристики двигателя в сравнении с эталонами изменяются в процессе эксплуатации, поэтому установление соотношения между скоростями их изменений и признаками появления неисправности является важной задачей диагностики.

За период эксплуатации авиационных двигателей созданы различные методы диагностики отказов и неисправностей. Рассмотрим наиболее распространённые из них.

**Визуально-оптический метод.** Визуальный осмотр является оперативным видом контроля технического состояния корпусов двигателя, герметичности топливной и масляной систем силовой установки, входных направляющих аппаратов и лопаток первых ступеней компрессоров и последних ступеней турбины, а также других доступных элементов двигателя и систем силовой установки. Однако наиболее нагруженными в двигателе являются первые ступени тур-

бины, камеры сгорания, последние ступени компрессора, опоры трансмиссии двигателя и другие элементы, недоступные для визуального контроля. Поэтому в данном случае применяется оптический метод, выявляющий забоины, разрывы материала, трещины, потертости, эрозионный износ, прогары, усталостные трещины, коробления, и другие дефекты на деталях двигателя. Оптическое устройство представляет собой два стекловолоконных жгута, заключенных в металлическую оплетку. Один из жгутов служит для передачи изображения, другой для подвода света к месту осмотра. Серии последовательно полученных в разное время снимков позволяют организовать анализ изменения состояния узла или элемента [5].

**Радиографический метод.** Данный метод широко применяется при оценке состояния элементов конструкции планера летательного аппарата. Для оценки состояния деталей и узлов двигателя он используется реже. Это связано с трудностями по подготовке двигателя (частичная разборка для введения трубки с изотопом и размещения пленки), большим временем выдержки при получении снимка, проявления пленки, сложностью анализа снимков и необходимостью проверки работы двигателя после сборки. На данный момент существуют три вида метода радиографии, отличающиеся друг от друга расположением источника

излучения по отношению к исследуемым деталям. Наибольшее распространение получил вид, когда источник излучения вводится внутрь двигателя по его оси, а пленка располагается на внешней поверхности двигателя. В двух других случаях источник излучения располагается сбоку двигателя. В качестве аппаратуры применяются установки, использующие рентгеновские лучи и радиоактивные изотопы. Значительное влияние на качество изображения оказывает взаимное расположение источника излучения, диагностируемого узла, рентгеновской пленки и время выдержки. Каждый из этих параметров должен быть соответствующим образом подобран [4; 5].

**Метод оценки температурного состояния.** Температурные напряжения и их колебания при эксплуатации являются одним из источников повреждений элементов конструкции двигателя. Предупреждение разрушений от термических воздействий возможно на основе контроля действительного температурного состояния детали или горячей среды, омывающей эту деталь. Однако, для диагностирования лопаток турбины данная оценка не является эффективной, особенно если лопатка имеет внутренние каналы и отверстия на поверхности для прохождения охлаждающей среды, когда распределение температуры на поверхности имеет значительные градиенты на участках с размерами менее одного миллиметра. Градиенты температур на таких участках лопатки могут быть обнаружены и определены с помощью радиационных пирометров. Он измеряет фактическую температуру лопаток турбины, зависящую не только от температуры газа, но и от температуры охлаждающего воздуха и эффективности всей системы охлаждения лопаток. В качестве диагностической информации используют максимальную, минимальную и среднюю температуры, а также распределение температур в наиболее опасных сечениях. Средняя температура лопаток характеризует работоспособность системы охлаждения. Повышение температуры позволяет обнаружить обрывы дефлекторов, уменьшение расхода охлаждающего воздуха вследствие засорения каналов и т. п. Среднемаксимальная температура лопаток служит для оценки состояния наиболее теплонапряженных ее участков (входные, выходные кромки) [3–5].

**Диагностирование деталей авиационного двигателя, омываемых маслом (трибодиагностика).** Часть отказов авиадвигателей связана с нарушением работы узлов трения из-за недопустимых износов. При этом продукты износа уносятся маслом, циркулирующим в двигателе, а их наличие и концентрация могут служить сигналом возникновения неисправности. Осмотры маслофильтров при ТО не всегда эффективны, так как 98 % частиц имеют размеры менее 5 мкм, а ячейки фильтрующих элементов – 7,0–14,0 мкм.

В качестве критерия при установлении технического состояния двигателя используется скорость изменения концентрации продуктов износа в смазывающем масле. Это значение получают в результате анализа проб масла, взятых из нижней точки маслосистемы двигателя через определенные промежутки времени (обычно через 50 часов) [1; 2].

Распространенность методов диагностирования авиационных двигателей можно проанализировать на

примере двигателя АИ-24 с обширной историей эксплуатации и рядом модификаций. На указанном двигателе наиболее распространенной причиной досрочного снятия с самолета является обнаружение повышенного содержания металлов в масле. Таким образом в данной ситуации находит применение в качестве метода диагностирования трибодиагностика.

Представляется возможным на основе имеющихся данных трибодиагностики по двигателю АИ-24 разработать прогнозную модель появления нарушений работы узлов трения. Эта модель может быть использована при утверждении размера увеличения ресурса во время проведения работ по исследованию технического состояния двигателя. В настоящее время работа по созданию указанной модели находится на этапе формирования тела модели.

#### Библиографические ссылки

1. Вишневикий Я. Р. Двигатель ГТД-350 как объект диагностирования в условиях авиационного предприятия // Научный вестник МГТУ ГА. 2006. № 109.
2. Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей / Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов, К. А. Малиновский и др. М. : Высш. шк., 2002. С. 139–180.
3. Диагностика и неразрушающий контроль летательных аппаратов и авиадвигателей : учеб. пособие / В. А. Пивоваров, О. Ф. Машошин, С. Г. Хрустикова и др. М. : МГТУ ГА, 2011. С. 50–70.
4. Пивоваров В. А., Машошин О. Ф. Дефектоскопия гражданской авиационной техники : учеб. пособие для вузов. М. : Транспорт, 1997. 136 с.
5. Место и роль технической диагностики в системе технической эксплуатации авиационной техники [Электронный ресурс]. URL: <https://studfiles.net/preview/2216279/> (дата обращения: 12.09.2018).

#### References

1. Vishnevskiy Ya. R. [Engine GTD-350 as the object of diagnosis in the conditions of an aviation enterprise]. *Nauchnyy vestnik MGTU GA*. 2006. No 109. (In Russ.)
2. Eliseev Yu. S., Krymov V. V., Malinovskiy K. A. *Tekhnologiya ekspluatatsii, diagnostiki i remonta gazoturbinnikh dvigateley* [Technology of operation, diagnostics and repair of gas turbine engines]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 2002. P. 139–180. (In Russ.)
3. Pivovarov V. A., Mashoshin O. F., Khrustikov S. G. *Diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol' letatel'nykh apparatov i aviadvigateley* [Diagnostics and non-destructive testing of aircraft and aircraft engines]. Moscow, MGTU GA, 2011. P. 50–70. (In Russ.)
4. Pivovarov V. A., Mashoshin O. F. *Defektoskopiya grazhdanskoy aviatsionnoy tekhniki Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Flaw detection of civil aviation equipment. Textbook for high schools]. Moscow, Transport publ., 1997. 136 p. (In Russ.)
5. *Mesto i rol' tekhnicheskoy diagnostiki v sisteme tekhnicheskoy ekspluatatsii aviatsionnoy tekhniki* [Place and role of technical diagnostics in the system of technical operation of aircraft]. Available at: <https://studfiles.net/preview/2216279/> (accessed: 12.09.2018). (In Russ.)

© Менчиков П. В., Панкеев Е. С., Парпуц А. А., 2018

УДК 629.7

## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ПИРОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА ДЛЯ МАЛОРАЗМЕРНОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Ю. А. Неверов, С. М. Шинкевич \*

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

\*E-mail: SunSonyaSh@yandex.ru

*Рассматривается информационно-измерительная система пирометрического типа для малоразмерного беспилотного летательного аппарата (БПЛА).*

*Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, информационно-измерительная система (ИИС), малоразмерный БПЛА, пирометрическая вертикаль, пирометрический тип ИИС.*

## INFORMATION-MEASURING SYSTEM OF PYROMETRIC TYPE FOR SMALL UNMANNED AERIAL VEHICLE

Yu. A. Neverov, S. M. Shinkevich \*

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

\*E-mail: SunSonyaSh@yandex.ru

*This article considers information-measuring system of pyrometric type for small-size unmanned aerial vehicle (UAV).*

*Keywords: unmanned aerial vehicle, information-measuring system (IIS), small-size UAV, pyrometric vertical, pyrometric type of IIS.*

Мини-БПЛА очень популярны в гражданской области использования, где большие размеры БПЛА аэродромного базирования часто отсутствовали из-за финансовых и юридических проблем. За границей мини-БПЛА применяются для охраны сельхозтерриторий, создании карт местности, для удаленного химико-физического анализа, контролем за всхожестью и спелостью урожая, а также обработки химическими препаратами.

Быстро развивающаяся отрасль мини- и микро-БПЛА добивается создания и развития информационно-измерительных систем (ИИС), нужных для необходимых характеристик ориентации БПЛА в пространстве, разработанных на разных физических основах. Совершенствование микросистемной техники, в особенности создание микромеханических акселерометров (ММА) и гироскопов (ММГ), делает возможным использование малогабаритных ИИС ориентации, которые обладают небольшим весом и размерами, в частности бесплатформенные системы ориентации (БСО). Необходимо искать другие методы создания систем ориентации (СО) или коррекции БСО. Таким методом в частности представляется пирометрический метод ориентации [1].

Структурная простота (рис. 1) и недорогая цена на пирометры, их высокая чувствительность, небольшая масса, способность работать при больших линейных и угловых ускорениях, малая накапливаемость погрешности измерения в течение времени и почти мгновенная готовность к работе дают возможность пользоваться пирометрическими датчиками для вычисления

характеристик ориентации мини- и микро-БПЛА. Необходимость развития пирометрических информационно-измерительных и управляющих систем мини- и микро-БПЛА является в данное время актуальной. Не менее актуальной представляется необходимость создания положений современного мини- и микро-БПЛА на базе пирометрической вертикали (ПВ), применяемых для военной и гражданской областей использования, и методологии разработки проекта такого БПЛА [2].

Принцип работы ПВ и размещение пирометров на БПЛА (рис. 2).

Принцип действия ПВ основан на измерении вертикального распределения разности температур небосвода и Земли, имеющей минимум в зените и максимум в надире, разница между которыми является температурным градиентом (grad). В ясные дни значение градиента достигает 40 град. Цельсия, а в пасмурные может снижаться до 1 град. Цельсия [3].

Исследование способов увеличения функциональных возможностей пирометрической вертикали (ПВ) привело к объединению ее в комплекс с ДУС и БСО. Данные системы эффективно снижают шумовую и систематическую погрешность сигнала системы комплексной ориентации на основе ПВ, позволяют результативно исправлять мощные тепловые помехи по линии ПВ. Метод использования пирометрической вертикали защищен патентом на полезную модель (авторами патента на изобретение пирометрической вертикали № 96950 являются Товкач С. Е. и Распопов В. Я.



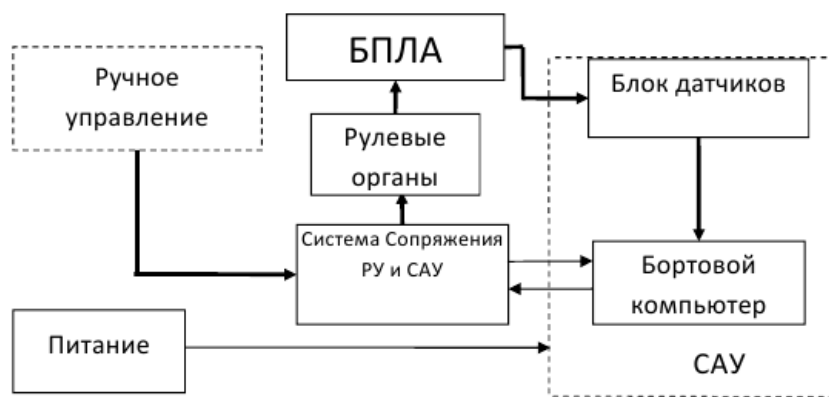


Рис. 1. Структура автоматического метода управления БПЛА

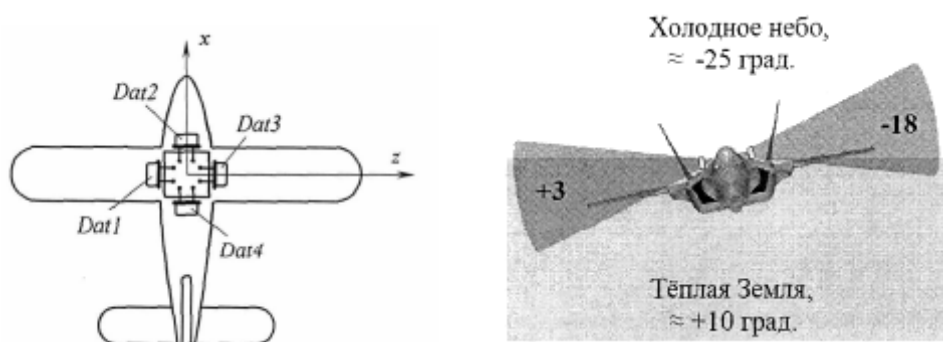


Рис. 2. Принцип работы ПВ:

*a* – принципиальная схема размещения пирометров; *б* – полёт БПЛА на уровне горизонта

Изобретение относится к устройствам для измерения углового положения летательных аппаратов (ЛА) и может быть использовано как устройство ориентации и стабилизации на малогабаритных беспилотных летательных аппаратах (БПЛА)) [4].

Для того чтобы увеличить возможности ПВ путём добавления угла курса в выбранных характеристиках ввели в конструкцию ПВ трёхосевой магнитометр, данное введение упрощает соединение ПВ в автопилотах, применяемых с БСО.

#### Библиографические ссылки

1. Бородайко В. Л., Ильина О. П. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации. Globalstartechnology [Электронный ресурс]. URL: <http://present5.com/vychislitelnye-sistemy-seti-i-telekommunikacii-chast-ii-lektor> (дата обращения: 05.09.2018).
2. Electronic textbook FindmeSPOT [Электронный ресурс]. URL: <https://www.findmespot.com/en/index.php?cid=128> (дата обращения: 05.09.2018).
3. Electronic textbook AOPA [Электронный ресурс]. URL: <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2014/july/28/spot-simplifies-with-new-trace-tracker> (дата обращения: 05.09.2018).
4. Electronic textbook Globalstar [Электронный ресурс]. URL: <https://www.globalstar.com/support/coverage-maps> (дата обращения: 05.09.2018).

5. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии : монография / Сибирская государственная геодезическая академия. В 2 т. Т. 1. М. : ФГУП «Картгеоцентр», 2005. 334 с.

#### References

1. Borodaiko V. L., Ilina O. P. *Vychislitel'nye sistemy, seti i telekommunikatsii* [Computing systems, networks and telecommunications. Globalstar technology]. Available at: <http://present5.com/vychislitelnye-sistemy-seti-i-telekommunikacii-chast-ii-lektor> (accessed: 05.09.2018).
2. Electronic textbook Find me SPOT. Available at: <https://www.findmespot.com/en/index.php?cid=128> (accessed: 05.09.2018).
3. Electronic textbook AOPA. Available at: <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2014/july/28/spot-simplifies-with-new-trace-tracker> (accessed: 05.09.2018).
4. Electronic textbook Globalstar. Available at: <https://www.globalstar.com/support/coverage-maps> (accessed: 05.09.2018).
5. Antonovich K. M. *Ispol'zovanie sputnikovyykh radionavigatsionnykh sistem v geodezii* [Use of satellite radio navigation systems in geodesy. Part 1]. Moscow, «Kartgeotsentr» Publ., 2005. 334 p. (In Russ.)

© Неверов Ю. А., Шинкевич С. М., 2018

## РАБОТА СИСТЕМЫ СМАЗКИ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Ю. В. Огородникова\*, В. В. Лукасов, 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: grand\_espada24@mail.ru

*Рассматривается масляная система авиационного двигателя как одна из основных систем летательного аппарата, обеспечивающая безопасность полета. Рассмотрены ее характеристики, принцип работы и разновидности.*

*Ключевые слова: маслосистема, летательный аппарат, отказ, трение, функции системы.*

## THE OPERATION OF THE LUBRICATION SYSTEM OF AIRCRAFT ENGINE

J. V. Ogorodnikova\*, V. V. Lucasov, D. V. Dmitriev

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

\*E-mail: grand\_espada24@mail.ru

*This article discusses the oil system of the aircraft engine, as one of the main systems of the aircraft, ensuring flight safety. Its characteristics, operating principle and varieties are considered.*

*Keywords: oil system, aircraft, failure, friction, system functions.*

Авиационный двигатель работает в сложных условиях и требует, чтобы была высокая эффективность системы смазки трущихся поверхностей, охлаждение опор двигателя и вынос продуктов трения от соприкасающихся подвижных частей.

Между трущимися деталями авиационного двигателя (АД) существует трение, и чтобы его снизить, существуют специальные масла. Масла, применяемые для авиационных двигателей, работают в довольно жестких условиях. Температура, до которой нагревается масло в различных узлах трения, неоднородна. Наиболее высокая температура достигается между трущейся пары цилиндр-поршень. У верхнего поршневого кольца она может достигать до 300 °С [1].

Средняя температура, до которой нагревается масло, доходит до 115–125 °С.

К смазочным маслам, используемым в современных авиационных двигателях, предъявляются требования:

– масло должно надежно смазывать двигателей при всех режимах работы. При работе на выбранном масле износ двигателя не должен превышать установленных величин.

– масло не должно сильно подвергаться изменению своих свойств в процессе эксплуатации.

Система смазки авиационного двигателя выполняется таким образом, чтобы обеспечить надежную смазку трущихся деталей при любых эволюциях. Кроме того, система смазки обеспечивает защиту элементов двигателя от коррозии. Если в маслосистеме происходит кратковременный сбой подачи масла, то это приводит к быстрому перегреву двигателя, раз-

рушению подшипников, заклиниванию ротора ТРД, обрыву шатунов поршневого двигателя. Неисправность маслосистемы в полете может привести к особой ситуации в полете, такой как останов или пожар двигателя.

Маслосистема обычно включает бак, для размещения необходимого запаса масла, радиатор, охлаждающий масло, насосы, подающих масло во внутреннюю систему смазки и откачивающих горячее масло из двигателя через радиатор в бак, сливной кран, термометров, манометры, фильтры и трубопроводы.

В современной авиации получили распространение две основные схемы маслосистемы: одноконтурная и двухконтурная [2]. В маслосистеме первой схемы масло циркулирует по пути: бак – двигатель – радиатор – бак. В маслосистеме второй схемы масло движется: двигатель – радиатор – двигатель, из бака идет только подпитывающая, необходимая для пополнения расхода часть масла. Маслосистема первого типа находит свое применение преимущественно на самолетах с реактивными двигателями, а второй тип – на самолетах с турбовинтовыми двигателями.

Система смазки турбореактивного двигателя значительно проще, чем поршневого или турбовинтового двигателя, так как у него меньше элементов смазки; прокачка масла через турбореактивный двигатель в 5–7 раз меньше, чем через поршневой. Поэтому маслосистема смазки турбореактивного двигателя имеет небольшие размеры и иногда включается в конструкцию двигателя; в некоторых случаях такие системы не нуждаются в дополнительном охлаждении масла с помощью радиатора [3].

В современных двигателях применяется комбинированная система смазки, в которой часть деталей смазывается под давлением – распылением (туман), а другая часть – разбрызгиванием или самотеком [4].

Объясняется это следующими причинами.

Во-первых, при смазке разбрызгиванием количество масла, подводимого к наиболее нагруженным деталям двигателя (коренным подшипникам, подшипникам кривошипных головок шатунов и т. д.), не обеспечивает их надежной смазки, а главное – надежного отвода тепла, выделяющегося при трении в этих деталях.

Во-вторых, при снижении, планировании, наборе высоты, а также при выполнении фигур высшего пилотажа (спортивная и военная авиация) масло в картере перемещается, что приводит к нарушению нормальной смазки двигателя, так как часть цилиндров и шеек вала начинает получать масло в избыточном количестве, а часть остается без смазки.

Основные опоры смазываются из форсунок, подшипники и шестеренки приводов смазываются масляным туманом, шестеренки редукторов ТВД – струями масла [5].

Маслосистема на сегодняшний день всех типов АД обеспечивает нормальную, устойчивую, безотказную и безопасную работу. Но создаются новые двигатели с лучшими характеристиками, что приводит к более жестким условиям и требует постоянного совершенствования и модернизации маслосистем.

#### Библиографические ссылки

1. Масляные системы реактивных двигателей самолетов [Электронный ресурс]. URL: <http://privetstudent.com/referaty/aviatsiya/540-maslyanye-sistemy-reaktivnyh-dvigatelay-samoletov.html> (дата обращения: 08.09.2018).

2. Маслосистема двигателя [Электронный ресурс]. URL: [https://studopedia.ru/18\\_7571\\_maslosistema-dvigatelya.html](https://studopedia.ru/18_7571_maslosistema-dvigatelya.html) (дата обращения: 08.09.2018).

3. Топливная система и масляная система самолёта [Электронный ресурс]. URL: <https://lektsiopedia.org/lek-33896.html> (дата обращения: 08.09.2018).

4. Яновский Л. С. Горюче-смазочные материалы для авиационных двигателей. Казань : Мастер Лайн, 2002. 400 с.

5. Яновский Л. С. Инженерные основы авиационной химмотологии. Казань : Изд-во Казан. ун-та, 2005. 714 с.

#### References

1. *Maslyanye sistemy reaktivnyh dvigatelej* [Aircraft jet engine oil systems] (In Russ.). Available at: <http://privetstudent.com/referaty/aviatsiya/540-maslyanye-sistemy-reaktivnyh-dvigatelay-samoletov.html> (accessed: 08.09.2018).

2. *Toplivnaya sistema i maslyanaya sistema samolyota* [Aircraft fuel system and oil system] Available at: <https://lektsiopedia.org/lek-33896.html> (accessed: 08.09.2018). (In Russ.)

3. *Maslosistem advigatelya* [The oil system of the engine] Available at: [https://studopedia.ru/18\\_7571\\_maslosistema-dvigatelya.html](https://studopedia.ru/18_7571_maslosistema-dvigatelya.html) (accessed: 08.09.2018). (In Russ.)

4. Yanovskiy L. S. *Goryuche-smazochnye materialy dlya aviatsionnykh dvigateley* [Fuels and lubricants for aircraft engines]. Kazan, Master Layn, 2002. P. 200.

5. Yanovskiy L. S. *Inzhenernye osnovy aviatsionnoy khimmotologii* [Engineering basics of aviation chemistry]. Kazan, Kazan Publ., 2005. P. 714.

© Огородникова Ю. В., Лукасов В. В.,  
Дмитриев Д. В., 2018

УДК 629.7

**ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО РЕГИОНАЛЬНОГО САМОЛЕТА РОССИИ**

Е. Е. Сяков, А. В. Афанасьева, В. В. Лукасов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
 Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
 E-mail: tupolev5k@gmail.com

*Приведены летно-технические характеристики описываемых региональных самолетов, их анализ и выявления лучшего из них.*

*Ключевые слова: самолет, региональные самолеты.*

**THE CHOICE OF THE OPTIMAL REGIONAL AIRCRAFT OF RUSSIA**

E. E. Syakov, A. V. Afanaseva, V. V. Lukasov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
 E-mail: tupolev5k@gmailcom

*The article presents the flight-technical characteristics of the described regional aircraft, their analysis and the identification of the best of them.*

*Keywords: Aircraft, regional airplanes.*

От южных морей до полярного края раскинулись наши леса и поля... А ведь и вправду Россия самая большая страна в мире, ее протяженность с севера на юг превышает 4000 км, а с запада на восток приближается к 10 000 км. В ней сочетается большое количество природных зон: арктические пустыни, тундра, лесотундра, тайга, смешанные и широколиственные леса, лесостепь, степь, пустыня, полупустыня, тропики и субтропики [1–3].

Необходимость региональных самолетов, связана с тем, что они могут взлетать с коротких и неподготовленных взлетно-посадочных полос, особенно на севере Сибири и на Дальнем Востоке.

Чтобы преодолевать большие расстояния в отсутствии дорог необходим воздушный транспорт – региональный самолет. Рассмотрим несколько типов воздушных судов, которые были в эксплуатации ранее и используются в наши дни.

Летно-технические характеристики региональных самолетов представлены в таблице.

Долгое время лучшим региональным самолетом был Ан-2. На данный момент его выпуск прекращен. В настоящее время эксплуатация такого самолета экономически невыгодна. Стоимость керосина за одну тонну начинается от 51 тыс. руб., а стоимость бензина с 52 тыс. руб. Многие Ан-2 уже давно выработали свой ресурс и не подлежат ремонту. Их эксплуатация закончилась за исключением нескольких экземпляров. Появилась необходимость в создании региональных самолетов на новой технологической основе [4].

На замену Ан-2 разрабатывается и запускается в серийное производство самолет ТВС-2ДТ. Он представляет собой лёгкий цельнокомпозитный многоцелевой биплан, в конструкциях и аэродинамических характеристиках схож с Ан-2.

**Сравнительная характеристика**

Показатели	Ан-2	ТВС-2ДТ	Рысачок	Л-410
Пассажировместимость	12	9	10	19
Максимальная полезная нагрузка, кг	1 500	3 000	1 570	1 615
Силовая установка	АИШ-62ИР	Honeywell TPE331-12UA	Walter M601F	Walter M601E
Мощность, л.с.	1 000	1 100	2x760	2 x 750
Крейсерская скорость, км/ч	180	300	390	380
Дальность полета с макс. нагрузкой, км	780	1 300	1 990	1 380
Практический потолок, м	4200	6 000	6 000	4 200
Максимальная длина разбег, м	235	80	370	830
Максимальная длина пробега, м	225	150	350	840
Расход топлива в крейсерском полёте, л/час	195	160	–	270
Собственная масса, кг	3350	2 859	3 850	4 150

Современный биплан превосходит предшественника по всем параметрам, кроме пассажироместимости. У ТВС-2ДТ меньше длина пробега, что позволяет взлетать с еще более коротких полос, а масса полезной нагрузки превосходит Ан-2 в два раза. Он более экономичен не только по замене вида топлива, но и расхода. Одним из преимуществ является собственная масса самолета, при которой он может садиться на менее плотный грунт и неподготовленные аэродромы [1].

Кроме ТВС-2ДТ в России используется региональные самолеты чешского производства L-410 и самолет российского производства Рысачок.

Рассмотрим многоцелевой, двухмоторный самолёт – L-410. Предназначен для эксплуатации на неподготовленных грунтовых, травяных, снежных площадках, а также на аэродромах с короткими взлетно-посадочными полосами [5–7]. По сравнению с Ан-2, обладает большей безопасностью и комфортом. Более просторный салон для пассажиров. Может принять почти в два раза больше людей, чем другие перечисленные самолеты.

Сравнивая L-410 с ТВС-2ДТ можно заметить, что первый превосходит второго по некоторым признакам: пассажироместимость, крейсерская скорость, дальность полета и его безопасность – наличие двух двигателей.

Рысачок – лёгкий многоцелевой двухмоторный турбовинтовой российский самолёт. Имеет простую конструкцию, изготовленную из алюминиевых сплавов, – моноплан с низким расположением крыла [5]. У Рысачка более высокая, чем у Ан-2, крейсерская скорость, скороподъемность, большая дальность и продолжительность полета при той же нагрузке. На борту установлено современное оборудование, благодаря которому самолет можно использовать днем и ночью в любых метеоусловиях. Это воздушное судно предназначено, в первую очередь, для использования в качестве выпускного учебного самолета в летных училищах гражданской авиации России. Рысачок может продолжить полет при отказе одного из двигателей. Он превосходит все остальные региональные воздушные суда в крейсерской скорости и дальности полета.

Из рассматриваемых типов воздушных судов для рейсов по Сибири и дальнего Востока наиболее подходящим по своим характеристикам является самолет ТВС-2ДТ. Это максимальная полезная нагрузка, максимальная длина разбега, максимальная длина пробега, расход топлива в крейсерском режиме, собственная масса. Кроме этого, он лучше справляется с тяжелыми погодными условиями России. И это единст-

венный самолет, который может решать задачи сопоставимые с возможностями на данный момент не выпускающегося Ан-2.

### Библиографические ссылки

1. Авиация России [Электронный ресурс]. URL: <http://aviation21.ru/tvs-2dts-lyogkij-celnokompozitnyj-mnogocelovoj-samolyot> (дата обращения: 18.02.2018).
2. Национальный аэрокосмический журнал взлет [Электронный ресурс]. URL: <http://www.take-off.ru/item/2491-tvs-2dts-debyutiruet-na-maks-2017> (дата обращения: 03.05.2017).
3. Россия [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Россия> (дата обращения 14.09.2009).
4. Уголок неба [Электронный ресурс]. URL: <http://www.airwar.ru/enc/craft/an2.html> (дата обращения: 14.09.2009).
5. Уголок неба [Электронный ресурс]. URL: <http://www.airwar.ru/enc/la/rysachok.html> (дата обращения: 03.05.2013).
6. Пилот гид [Электронный ресурс]. URL: <https://pilotgid.ru/samolety/samolet-let-410.html> (дата обращения: 25.06.2018).
7. Airlines Inform [Электронный ресурс]. URL: <https://www.airlines-inform.ru/commercial-aircraft/L-410.html> (дата обращения: 17.07.2018).

### References

1. Aviatsiya Rossii [Aviation of Russia] Available at: <http://aviation21.ru/tvs-2dts-lyogkij-celno-kompozitnyj-mnogocelovoj-samolyot> (accessed: 18.02.2018). (In Russ.)
2. Natsional'nyy aerokosmicheskiy zhurnal vzlet [National Aerospace Journal take off]. Available at: <http://www.take-off.ru/item/2491-tvs-2dts-debyutiruet-na-maks-2017> (accessed: 18.02.2018). (In Russ.)
3. Russia [Russia] Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Россия> (accessed: 14.09.2009). (In Russ.)
4. Ugolok neba [The corner of the sky]. Available at: <http://www.airwar.ru/enc/craft/an-2.html> (accessed: 14.09.2009). (In Russ.)
5. Ugolok neba [The corner of the sky]. Available at: <http://www.airwar.ru/enc/la/rysac-hok.html> (accessed: 03.05.2013). (In Russ.)
6. Pilot Gid [Pilot Guide]. Available at: <https://pilotgid.ru/samolety/samolet-let-410.html> (accessed: 25.06.2018). (In Russ.)
7. Airlines Inform. Available at: <https://www.airlines-inform.ru/commercial-aircraft/L-410.html> (accessed: 17.07.2018).

© Сяков Е. Е., Афанасьева А. В., Лукасов В. В., 2018

УДК 006.067

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛАБОРАТОРИИ  
АВИАЦИОННОЙ МЕТРОЛОГИИ ООО «АЭРОПОРТ ЕМЕЛЬЯНОВО»  
НА ОСНОВЕ ПРОЦЕССНОГО ПОДХОДА**

Е. А. Терина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: Tka4encokristin@mail.ru

*Рассматриваются вопросы совершенствования метрологического обеспечения лаборатории авиационной метрологии инженерно-авиационной службы ООО «Аэропорт Емельяново» на основе процессного подхода в соответствии с требованиями международного стандарта ISO/IEC 17025:2017.*

*Ключевые слова: калибровка, анализ состояния измерений, техническая компетентность, достоверность результатов, процессный подход.*

**IMPROVEMENT OF METROLOGICAL SUPPORT OF LABORATORY OF AVIATION METROLOGY  
OF LLC “YEMELYANOVO AIRPORT” ON THE BASED ON THE PROCESS APPROACH**

E. A. Terina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: Tka4encokristin@mail.ru

*The work deals with the improvement of metrological support for the aviation metrology laboratory of the engineering and aeronautical service of LLC “Airport Emelyanovo” on the basis of a process approach in accordance with the requirements of the international standard ISO / IEC 17025: 2017*

*Keywords: calibration, analysis of a condition of measurements, technical competence, reliability of results, process approach.*

В настоящее время лаборатории авиационной метрологии инженерно-авиационной службы ООО «Аэропорт Емельяново» имеет аттестат аккредитации на право калибровки специальных средств измерений, что является показателем высокого уровня выполняемых калибровочных работ в области обеспечения единства измерений, базирующегося на беспристрастности, объективности и достоверности результатов измерений, выполняемых в процессе калибровок. Специальные средства измерения используются инженерно-техническим составом организации «Аэропорт Емельяново» при ремонте, регламентных работах и для обслуживания авиационной техники при выполнении полётов.

В ноябре 2016 года прошли заседания технических комитетов и Генеральной ассамблеи международных организаций по аккредитации ILAC и IAF, разработан новый стандарт ISO/IEC 17025:2017 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий». В течение трех лет предлагается перейти на новую версию основополагающего стандарта в сфере аккредитации и оценки соответствия для российских калибровочных и испытательных лабораторий.

Целью работы является анализ соответствия метрологического обеспечения лаборатории авиационной

метрологии инженерно-авиационной службы ООО «Аэропорт Емельяново» требованиям ISO/IEC 17025:2017.

В ходе определения фактического состояния проверяемых характеристик организации калибровочной деятельности лаборатории авиационной метрологии было установлено, что компетентность лаборатории в части выполнения калибровочных работ вполне соответствует требованиям Российской системы калибровки и ГОСТ ИСО/МЭК 17025–2009. Так, например, основные характеристики политики в области качества организации и выполнения калибровочных работ в лаборатории, которые включают в себя: задачи системы качества (обеспечение заданных в нормативной и методической документации требований к калибровке СИ; обеспечение полноты и правильности проведения калибровки СИ; обеспечение достоверности и требуемой точности результатов измерений) соответствуют требованиям РД РСК 02–2014 «Порядок организации деятельности Российской системы калибровки» и ГОСТ ИСО/МЭК 17025–2009.

Процессный подход был разработан и применяется с целью создания горизонтальных связей в организациях. Подразделения и сотрудники, задействованные в одном процессе, могут самостоятельно координировать работу в рамках процесса и решать возник-

кающие проблемы без участия вышестоящего руководства. Процессный подход к управлению позволяет более оперативно решать возникающие вопросы и воздействовать на результат. Процессный подход меняет понятие структуры организации. Основным элементом становится процесс. В соответствии с одним из принципов процессного подхода организация состоит не из подразделений, а из процессов.

Стандарт ISO/IEC 17025:2017 устанавливает процессный подход, эффективную концепцию по совершенствованию работы лаборатории. Переход от функционального управления к процессному требует от сотрудников постоянной совместной работы, несмотря на то, что они могут относиться к различным подразделениям.

При внедрении процессного подхода важно придерживаться следующих принципов:

1. Принцип взаимосвязи процессов. Организация представляет собой сеть процессов. Процессом является любая деятельность, где имеет место выполнение работ. Все процессы организации взаимосвязаны между собой;

2. Принцип востребованности процесса. Каждый процесс должен иметь цель, а его результаты должны быть востребованы. У результатов процесса должен быть свой потребитель внутренний или внешний.

3. Принцип документирования процессов. Деятельность по процессу необходимо документировать. Это позволяет стандартизовать процесс и получить базу для изменения и дальнейшего совершенствования процесса;

4. Принцип контроля процесса. Каждый процесс имеет начало и конец, которые определяют границы процесса. Для каждого процесса в рамках заданных границ должны быть определены показатели, характеризующие процесс и его результаты;

5. Принцип ответственности за процесс. В выполнении процесса могут быть задействованы различные специалисты и сотрудники, но отвечать за процесс и его результаты должен один человек.

Особую роль при реализации процессного подхода в лаборатории уделяется контролю достоверности результатов, в частности лаборатория должна иметь в распоряжении стратегию о том, как использовать различные методы мониторинга.

Данный мониторинг должен быть запланирован, рассмотрен и включать следующие методы:

а) применение стандартных образцов или материалов с целью контроля качества;

б) использование альтернативных приборов, которые были откалиброваны для обеспечения прослеживаемости результатов;

в) функциональная проверка (испытания) измерительного и испытательного оборудования;

г) использование контрольных или рабочих стандартов с контрольными картами, где это применимо;

д) промежуточные проверки измерительного оборудования;

е) повторные тесты или калибровки с использованием тех же или разных методик;

ж) повторная проверка или повторная калибровка сохраненных объектов;

з) корреляция результатов для разных характеристик объекта;

и) анализ полученных результатов;

к) внутрилабораторные сравнения;

л) тестирование образцов, отобранных слепым методом.

Внедрение принципов процессного подхода и мониторинга позволяет значительно повысить достоверность получаемых результатов калибровки, эффективность работы и уровень корпоративной культуры. Реализация принципа процессного подхода позволяет вести непрерывный мониторинг соответствия лаборатории авиационной метрологии ИАС ООО «Аэропорт Емельяново» технической компетентности и возможности получения достоверных обоснованных результатов калибровки.

### Библиографические ссылки

1. Вишняков О. Процессно-ориентированный подход в управлении организацией. 2008.

2. Лаврентьева Е. А., Жирнова Е. А. Анализ готовности лаборатории авиационной метрологии инженерно-авиационной службы ООО «Аэропорт Емельяново» к прохождению инспекционного контроля // Решетневские чтения : материалы XX Междунар. науч. конф. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. Т. 1, № 20. С. 499–501.

3. ISO/IEC 17025:2017. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nca.kz> (дата обращения: 09.09.18).

4. Ефимов В. В. Размышления о процессном подходе. 2004.

5. Репин В. В. Процессный подход на практике // Стандарты и качество. 2004. № 1.

### References

1. Vishnyakov O. Process-oriented approach in the management of the organization. 2008.

2. Lavrent'eva E. A., Zhirnova E. A. «Analiz gotovnosti laboratorii aviatsionnoy metrologii inzhenerno-aviatsionnoy sluzhby LLC "Airport Yemelyanovo" k prokhozheniyu inspektsionnogo kontrolya» // *Materialy XX Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XX Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2016. Vol. 1, № 20. P. 499–501 (in Russ.)

3. ISO / IEC 17025: 2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Available at: <http://www.nca.kz> (accessed: 09.09.18).

4. Efimov V. V. Reflections on the process approach. 2004.

5. Repin V. V. Process approach in practice. Standards and quality. 2004. No. 1.

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СРЕДЫ НА ПОЛЕТ ДПЛА

И. К. Турсунгалиев, Ш. Р. Урдуханов, Е. А. Степанцов, Г. Д. Коваленко

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

*Исследуется влияние аномальных явлений среды на управляющее воздействие ДПЛА (дистанционно пилотируемый летательный аппарат). Беспилотный летательный аппарат (БПЛА) – разновидность летательного аппарата, управление которым не осуществляется пилотом на борту.*

*Ключевые слова: дистанционно пилотируемый летательный аппарат, карусельный маятник, магнитное поле, энергонапряженные объекты.*

## ANALYSIS OF INFLUENCE OF ENVIRONMENT ON REMOTELY PILOTED AIRCRAFT

I. K. Tursungaliyev, S. R. Urdukhonov, E. A. Stepantsov, G. D. Kovalenko

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

*In this article, we investigate the influence of implicit environmental phenomena on the control effect of the UAV (remotely piloted aircraft). Unmanned aerial vehicle (UAV) – a type of aircraft, the management of which is not carried out by the pilot on board.*

*Keywords: remotely piloted aircraft, carousel pendulum, magnetic field, energy-stressed objects.*

Под БПЛА понимают дистанционно управляемые летательные аппараты, применяемые для проведения воздушной разведки и нанесения ударов. Наиболее известным примером БПЛА является американский Predator [1]. Как известно, управление в этом случае осуществляется радиолучом, который подвержен внешним влияниям, в том числе аномальным магнитным воздействиям [2]. Нами исследовались подобные влияния с помощью маятниковых систем.

Объектом исследования стал карусельный маятник. Во время изучения его движения мы обнаружили

отклонение траектории, вызванное некой силой. Мы предполагаем, что результаты изучения этой силы помогут создать более безопасную систему управления ДПЛА.

Эксперимент проводился с апреля по июнь 2018 года в следующих координатах: широта 55.983; долгота 92.898. Была собрана простейшая установка (см. рисунок), с помощью которой было выявлено отклонение. Мы полагали, что отклонение маятника связано с кориолисовым ускорением, вызванным вращением Земли.

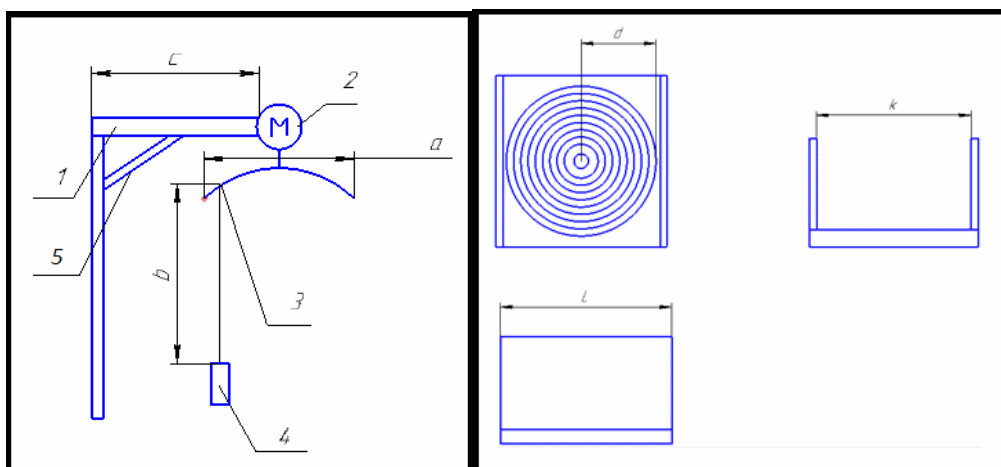


Схема установки:

1 – крепление установки (балка); 2 – электродвигатель; 3 – коромысло; 4 – лазер; 5 – ребро жесткости;  
 $a = 140$  мм;  $c = 766$  мм;  $b = 891$  мм (леска 20 кгw4xпро),  $L = 491$  мм;  $k = 485$  мм;  $d = 239$  мм



На мишени для установки были параллельно закреплены две боковые стенки, изготовленные из гетонакса, фольгированного медью, это позволяет изолировать внешние полевые воздействия на лазер.

Мы запускали установку и выжидали некоторое время, пока вращение не станет стабильным, после чего, производили видеofиксацию. Аналогичная процедура проделывалась и для обратного вращения. Из готового видеоматериала извлекались кадры нескольких положений точки лазера и совмещались в одну диаграмму.

В таблице приведены отклонения  $\Delta R$  при различных направлениях вращения маятника, вызванные аномальной силой. Используются данные эксперимента, проведенного 29.05.18.

#### Отклонения при вращении

		29.05.18	29.05.18	29.05.18	
1		$n_{\text{ср}}$	$R_{\text{ср}}$ м	$V = 39R_{\text{ср}} / n_{\text{ср}}$ м/с	
1	N	28,25	0,17	0,2347	$\Delta V_7 = 0,0174$
	W	24,6	0,16	0,2537	
2	N	28,25	0,17	0,2347	
	W	25,3	0,17	0,2621	$\Delta V_7 = 0,0469$
3	N	28	0,16	0,2229	
	W	28	0,16	0,2229	$\Delta R_2 = 0,01$
4	N	26,5	0,15	0,2208	$\Delta R_1 = 0,02$
	W	24,6	0,167	0,2548	
5	N	26	0,15	0,2250	
	W	26	0,17	0,255	
6	N	27,25	0,157	0,2247	
	W	25,6	0,168	0,2559	
7	N	29,25	0,163	0,2173	
	W	24	0,16	0,2152	$\Delta R_5 = 0,01$
8	N	29	0,17	0,2286	
	W	24,6	0,16	0,2537	$\Delta R_8 = 0,01$

Примечание:  $n_{\text{ср}}$  – среднее число оборотов в минуту,  $R_{\text{ср}}$  – средний радиус,  $V$  – линейная скорость.

В работе показано, что отклонения различных управляющих сигналов, таких как радиоволны, электромагнитное излучение, 4G-5G сигнал, спутниковый сигнал, имеют ту же природу, что и в данной установке. Не исключено, что причиной этих отклонений могут быть тонкие поля [3], это напрямую связано с приемом сигнала ДПЛА.

Таким образом, обнаруженные отклонения должны учитываться при создании современных систем управления для ДПЛА, потому что их влияние может стать причиной некорректного приема сигнала с управляющего устройства.

#### Библиографические ссылки

1. История MQ-1 Predator [Электронный ресурс]. URL: <http://avia.pro/blog/mq-1-predator> (дата обращения: 15.07.2018).
2. Общие виды и характеристики беспилотных летательных аппаратов : справочное пособие / А. Г. Гребеников, А. К. Мялица, В. В. Парфенюк и др. Харьков, 2008.
3. Коваленко Г. Д. Миростройство за пределами менталитета. Красноярск, 2015.

#### References

1. History of MQ-1 Predator. Available at: <http://avia.pro/blog/mq-1-predator> (accessed: 15.07.2018).
2. Grebenikov A. G., Myalitsa A. K., Parfenyuk V. V. [General views and characteristics of unmanned aerial vehicles: reference book]. Khar'kov, 2008.
3. Kovalenko G.D. *Miroustroystvo za predelami mentaliteta* [The world order outside the mentality]. Krasnoyarsk, 2015.

© Турсунгалиев И. К., Урдуханов Ш. Р., Степанцов Е. А., Коваленко Г. Д., 2018



**Секция**

**«ТЕХНОЛОГИЯ И МЕХАТРОНИКА  
В МАШИНОСТРОЕНИИ»**

УДК 621.91.01

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РОТАЦИОННОГО ТОЧЕНИЯ МНОГОГРАННЫМИ РЕЗЦАМИ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ

А. С. Бинчуров<sup>1,2\*</sup>, Н. С. Индаков<sup>2</sup>, Ю. И. Гордеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Аэрокосмический колледж

Сибирского государственного университета 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: mexanix@mail.ru

*Получены новые данные о влиянии технологических (глубины резания,  $t$ ; продольной подачи,  $S_{пр}$ ; круговой подачи,  $S_{кр}$ ; скорости резания,  $V_p$ ) и конструктивных факторов (геометрических и кинематических параметров инструмента) на качество обработки. Расчетными и экспериментальными методами исследованы особенности процесса ротационного точения многогранными резцами (РТМР) и установлен характер влияния режимов резания на интенсивность деформационных процессов резания и показатели шероховатости обработанной поверхности. Полученные полуэмпирические зависимости позволяют при назначении режимов резания прогнозировать параметры шероховатости  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ .*

*Ключевые слова: ротационное точение, многогранный ротационный резец, лезвие, конструктивная подача, круговая подача, производительность и качество обработки.*

## INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF ROTARY TURNING BY MULTIFACETED CUTTERS ON QUALITY OF SURFACE

A. S. Binchurov<sup>1,2\*</sup>, N. S. Indakov<sup>2</sup>, Y. I. Gordeev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Aerokosmic College of 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: mexanix@mail.ru

*New data on the effect of technological modes (depth cutting,  $a_{mf}$ ; longitudinal feed,  $f_n$ ; azimuthal feed,  $f_{az}$ ; cutting speed,  $V_r$ ) and constructive factors (geometric and kinematic parameters of the tool) on quality of treatment. By calculated and experimental methods features of the process of turning the rotary multifaceted cutters (RTMC) were investigated. Influence of cutting conditions on the intensity of deformation processes and roughness of the treated surface were installed. The resulting semi-empirical equations allow the appoint the cutting modes to predict the roughness parameters  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ .*

*Keywords: rotational turning, multifaceted rotary cutter, blade, constructive feed, circular pitch, productivity and quality of treatment.*

Предлагаемый метод ротационного точения многогранными резцами является новым и, по-видимому, весьма перспективным (рис. 1). В основу метода заложен принцип срезания слоя материала, при котором стружка сходит вдоль режущей кромки, рабочие участки которой постоянно обновляются за счет вращения многогранного резца, что обеспечивает более благоприятные условия для теплоотвода из зоны резания, исключает необходимость применения СОТС, обеспечивает гарантированное дробление стружки [1–3]. Характерной особенностью данного метода, позволяющего реализовать указанные преимущества, является наличие конструктивной подачи на грани профиля резца и его вращение. Известно, что использование приводного инструмента позволяет реализо-

вать высокие скорости резания, не зависимо от технических характеристик станков и габаритов заготовки.

Очевидно, что качество обработки зависит от конструктивно технологических параметров процесса. Для эффективного практического использования нового метода ротационного точения многогранными резцами необходимо проведение детальных теоретических и экспериментальных исследований по определению и назначению указанных параметров. Качество обработанной поверхности определяется шероховатостью поверхности и состоянием материала поверхностного слоя.

Качество обрабатываемой поверхности зависит от многих технологических параметров обработки при РТМР (режимы резания, геометрические параметры

режущего инструмента, кинематика ротационного точения многогранными резцами и др.). На рис. 2 приведены зависимости шероховатости поверхности в зависимости от параметров режимов резания [4].

На основе обработки экспериментальных данных получены полуэмпирические зависимости параметров шероховатости обработанной поверхности от режимов резания:

$$Ra = 6,01 \frac{S_{np}^{0,2701} \cdot S_{кр}^{0,4679}}{V_p^{0,3081} \cdot t^{0,0548}}; Rz = 41,52 \frac{S_{np}^{0,2471} \cdot S_{кр}^{0,3583}}{V_p^{0,3733} \cdot t^{0,0721}};$$

$$R_{max} = 251,89 \frac{S_{np}^{0,2208} \cdot S_{кр}^{0,594} \cdot t^{0,02}}{V_p^{0,6775}}. \quad (1)$$

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить характер влияния режимов резания при РТМР на показатели шероховатости обработанной поверхности. Полученные полуэмпирические зависимости позволяют при назначении режимов резания прогнозировать параметры шероховатости (устанавливать режимы резания с оптимальным сочетанием «производительность – качество обработки»).

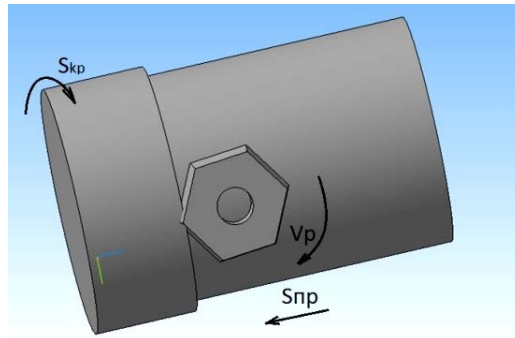


Рис. 1. Схема ротационного точения многогранными резцами

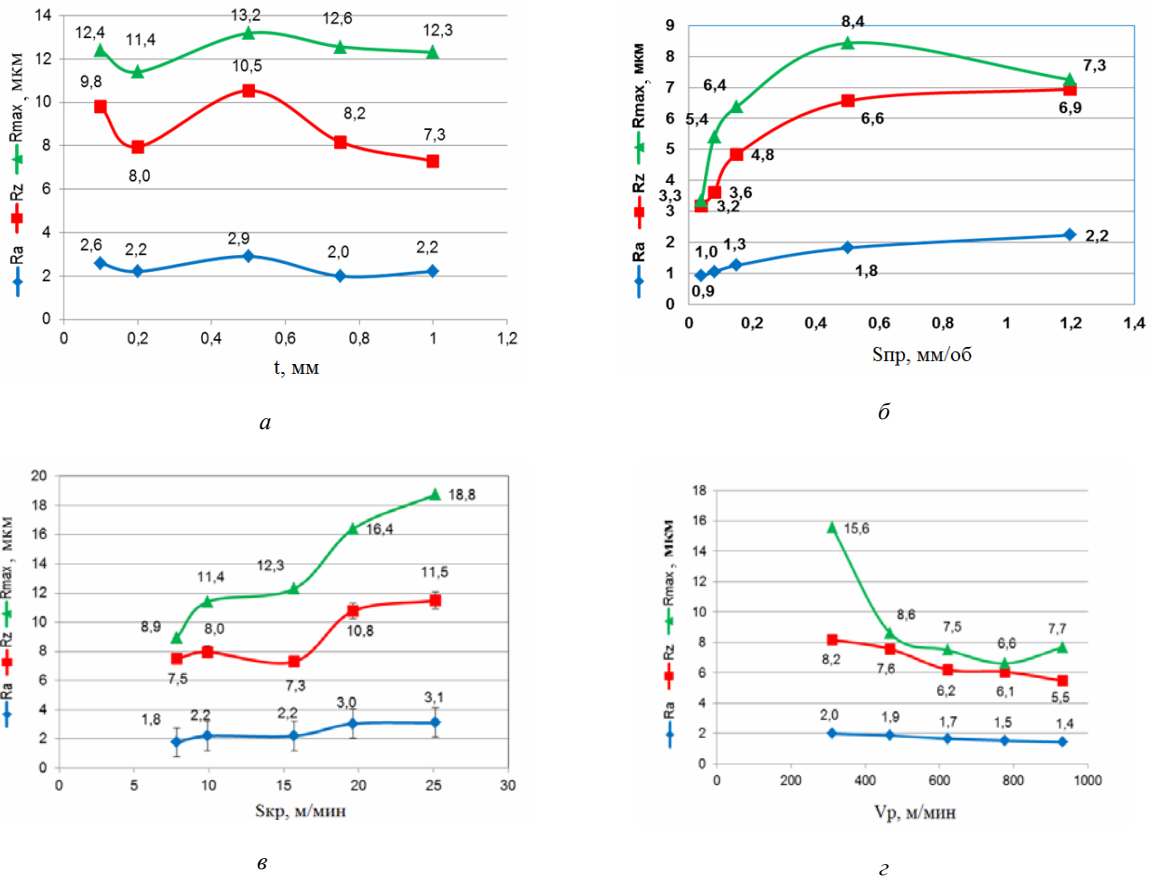


Рис. 2. Влияние режимов резания на шероховатость поверхности:

$a$  – глубины резания  $t$ ;  $b$  – продольной подачи  $S_{np}$ ;  $в$  – круговой подачи  $S_{кр}$ ;  $г$  – скорости резания  $V_p$ ;

Наибольшее влияние на формирование высотных параметров шероховатости  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $R_{max}$  оказывают круговая подача  $S_{кр}$  и скорость резания  $V_p$ , чуть менее значимым фактором является продольная подача,  $S_{np}$ .

Глубина резания  $t$  РТМР практически не оказывает существенного влияния на изменение параметров шероховатости

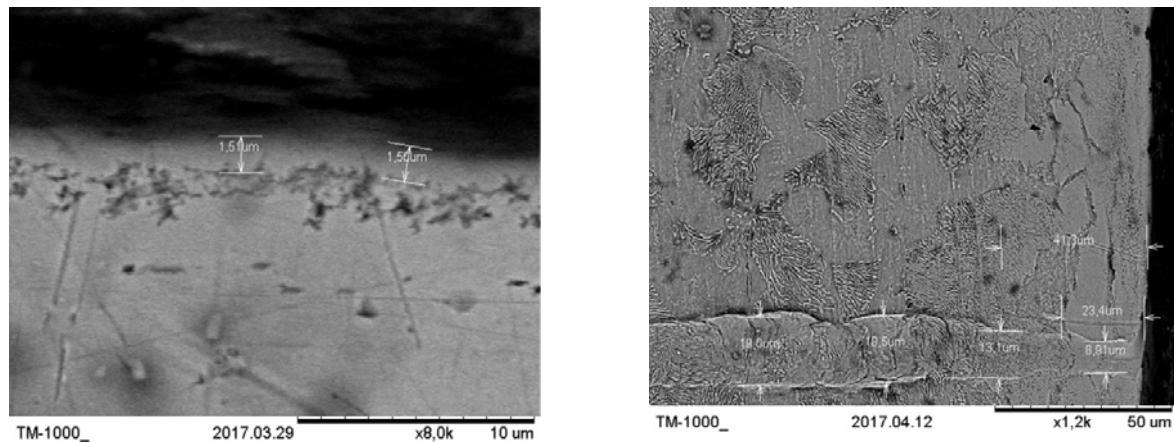


Рис. 3. Степень  $\Delta H$  и глубина  $h$  наклепа поверхностного слоя

Одним из важнейших показателей качества обработанной поверхности является состояние поверхностного слоя, которое определялось через степень и глубину наклепа по методу косого среза путем измерения микротвердости по глубине наклепанного слоя (рис. 3).

Микротвердость измерялась царапанием алмазным наконечником по ГОСТ 21318–75. Полученное после измерения значение глубины наклепа поверхностного слоя составляет 20 мкм, а степень наклепа возрастает на 45 % в сравнении с материалом сердцевины. Величина микротвердости поверхностного слоя определенная в соответствии с методикой по ГОСТ 21318–75 возрастает до 1200 ед. (по сравнению с микротвердостью сердцевины для стали 45 которая составляет 450 ед.).

Таким образом, кроме снижения шероховатости, использование высокоскоростного метода РТМР обеспечивает повышение качества обработки поверхностного слоя по показателю микротвердости.

#### Библиографические ссылки

1. Индаков Н. С., Бинчуров А. С. Исследование метода ротационного точения многогранными резцами // Станки инструмент (СТИН). 2013. № 6. С. 21–24.
2. Индаков Н. С., Бинчуров А. С. Особенности ротационного точения многогранными резцами // Вестник машиностроения. 2013. № 10. С. 56–58.

3. Индаков Н. С., Бинчуров А. С. Особенности геометрии многогранных резцов для ротационного точения // Вестник машиностроения. 2013. № 11. С. 38–41.

4. Влияние кинематических и технологических параметров ротационного точения многогранными резцами на формирование стружки и шероховатость поверхности / Н. С. Индаков [и др.] // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. № 2 (18). С. 379–387.

#### References

1. Indakov N. S., Binchurov A. S. [Research by rotational turning indexable cutters] // Machine tools (STIN). 2013. № 6. P. 21–24. (In Russ.)
2. Indakov N. S., Binchurov A. S. [Features turning rotary cutters multifaceted] // Vestnik engineering. 2013. № 10. P. 56–58. (In Russ.)
3. Indakov N. S., Binchurov A. S. [Features polyhedral geometry of the rotary cutters for turning] // Vestnik Engineering. 2013. № 11. P. 38–41. (In Russ.)
4. Indakov N. S. [et al.]. [Influence of cinematic and technological parameters of rotary turning by multifaceted cutters on chip formation and surface roughness] // Siberian Journal of Science and Technology. 2017. № 2 (18). P. 379–387. (In Russ.)

© Бинчуров А. С., Индаков Н. С., Гордеев Ю. И., 2018

УДК 621.372.83.001.24

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ АУСТЕНИТНЫХ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ И АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКОЙ

В. Ю. Гусев<sup>1</sup>, А. И. Демченко<sup>2</sup>, Р. В. Зайцев<sup>1</sup>, В. В. Ананьев<sup>1</sup>, И. А. Скачков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: vic@iss-reshetnev.ru  
Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79  
E-mail: dealig@rambler.ru

*Выполнен сравнительный анализ результатов металлографических исследований и испытаний на прочность сварных телескопических образцов тонкостенных трубопроводов из хромоникелевой аустенитной стали 12X18H10T, для исследования влияния способов сварки на формирование зон термического влияния в соединениях труб систем терморегулирования космических аппаратов.*

*Ключевые слова: лазерная сварка, автоматизированная аргонодуговая сварка, телескопическое соединение.*

## THE FEATURES OF THE FORMATION OF TELESCOPIC OF WELDED JOINTS OF THIN-WALLED PIPELINES FROM AUSTENITIC STAINLESS STEELS MADE BY LASER AND AUTOMATED ARGON-ARC WELDING

V. U. Gusev<sup>1</sup>, A. I. Demchenko<sup>2</sup>, R. V. Zaitsev<sup>1</sup>, V. V. Ananayev<sup>1</sup>, I. A. Skachkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: vic@iss-reshetnev.ru  
Siberian Federal University  
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
E-mail: dealig@rambler.ru

*A comparative analysis of the results of metallographic studies and tests on the strength of welded telescopic samples of thin-walled pipelines from chromium-nickel austenitic steel 12X18H10T has been performed to study the effect of welding methods on the formation of heat-affected zones in joints of pipes for spacecraft thermal control systems.*

*Keywords: laser welding, automated argon-arc welding, telescopic joint.*

Исследуемые способы сварки применяются при изготовлении узлов и сборочных единиц систем терморегулирования космических аппаратов, использующих в качестве рабочей среды жидкости, содержащие соединения аммиака. В связи с жесткими ограничениями по массе изделий, элементы системы состоят из тонкостенных труб диаметрами не более 5 мм и толщинами стенок в пределах 0,3–0,4 мм, изготавливаемых из хромоникелевой аустенитной стали 12X18H10T. Для упрощения сборки изделий с применением унифицированной трубной арматуры, сварка выполняется в виде нахлесточных телескопических соединений. Механические характеристики сварного соединения – прочность и пластичность – в период его формирования определяют вероятность получения бездефектного соединения в такой же степени, как прочностные и эксплуатационные характеристики – степень надёжности работы конструкции. С целью снижения размеров областей нагрева до температур, близких к температуре равновесного солидуса, применяются энергоёмкие способы сварки и технологические приёмы уменьшения погонной энергии.

В случае с орбитальной аргонодуговой сваркой в закрытых орбитальных головках, оптимальных результатов можно добиться введением в процессе сварки импульсных пауз по току.

Целью работы было исследование процесса формирования зоны термического влияния и её влияние на прочность и пластичность сварного соединения, в зависимости от способа сварки тонкостенной трубы и арматуры.

В качестве способов соединения труб с арматурой применялись:

1. Автоматизированная орбитальная аргонодуговая сварка телескопического стыкового неповоротного соединения в среде защитного газа закрытой сварочной головки.

2. Лазерная сварка телескопического стыкового поворотного соединения в среде защитного газа аргона без применения присадочного материала.

3. Импульсная автоматизированная орбитальная аргонодуговая сварка телескопического стыкового неповоротного соединения в среде защитного газа закрытой сварочной головки (рис. 1).

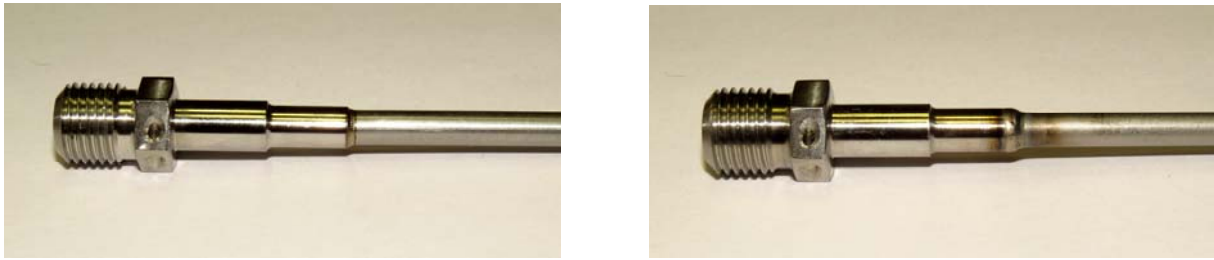


Рис. 1. Образцы соединений тонкостенной трубы с арматурой, слева направо: лазерная сварка, импульсная автоматическая аргодуговая сварка



Рис. 2. Пример разрушения образцов при механических испытаниях на разрыв, сверху вниз: импульсная орбитальная автоматическая аргодуговая сварка, лазерная сварка

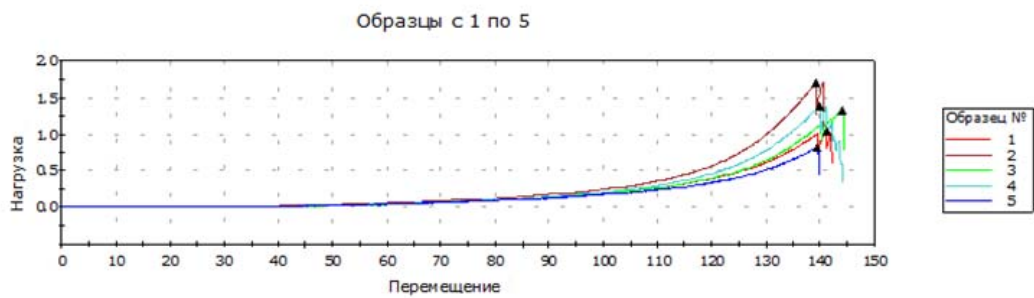


Рис. 3. Диаграмма зависимости относительного удлинения сварных соединений пяти образцов от нагрузки, до разрушения сварных соединений

**Средние результаты испытаний соединений прочности на разрыв**

№ п/п	Максимальная разрывная нагрузка [кгс]	Относительное удлинение [мкм]	Деформация при растяжении) [%]
1	238	141,13	59,72
2	248	139,21	55,05
3	246	143,97	63,56
4	374	140,01	60,36
5	381	139,55	60,56



Рис. 4. Результаты металлографических исследований сварных соединений образцов: слева направо № 1, № 3, № 5

Образец № 1 выполнен автоматизированной орбитальной аргодуговой сваркой, образцы № 2, № 3 выполнены лазерной сваркой, № 4, № 5 выполнены импульсной автоматизированной орбитальной аргодуговой сваркой.

Сварные соединения образцов были подвергнуты механическим испытаниям на разрыв (рис. 2). Разрушение образцов, выполненных лазерной сваркой произошло непосредственно по сварному шву. Разрушение образцов, выполненных автоматизированной орбитальной аргодуговой сваркой и импульсной автоматизированной орбитальной аргодуговой сваркой произошло в зоне термического влияния.

На пяти образцах проведён сравнительный анализ результатов относительного удлинения до разрушения сварных соединений (рис. 3-4). Показатель максимальной разрывной нагрузки зафиксирован на образце сварного соединения, выполненном импульсной

автоматизированной орбитальной аргодуговой сваркой.

Результаты металлографических исследований микро и макроструктуры швов и испытания прочности на разрыв соединений тонкостенных труб с арматурой, указывают на снижение влияния размеров областей нагрева до критических температур при использовании импульсных методов сварки. Формирования зоны термического влияния сварного соединения имеет более локальный характер при лазерной сварке, но, несмотря на это, максимальная разрывная нагрузка выше при импульсной автоматизированной орбитальной аргодуговой сварки, что объясняется более равномерным её распределением.

© Гусев В. Ю., Демченко А. И.,  
Зайцев Р. В., Ананьев В. В., Скачков И. А., 2018



УДК 534.014,621.802

## МЕТОД ОБОБЩЕННОЙ ФУНКЦИИ ЗАЗОРА В ПРИЛОЖЕНИИ К КОНТАКТНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯМ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

А. В. Елисеев<sup>1, а</sup>, Н. К. Кузнецов<sup>2, б</sup>, А. Н. Трофимов<sup>3, с</sup>

<sup>1,3</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>а</sup>eavsh@ya.ru, <sup>б</sup>knik@istu.edu, <sup>с</sup>trofimov\_an@irgups.ru

*Развиты элементы единого теоретического подхода к оценке динамических взаимодействий твердых тел с вибрирующей поверхностью при наличии неудерживающих связей. Разработан ряд приложений.*

*Ключевые слова: неудерживающие связи, функция зазора, вибрационное взаимодействие, вибрационное поле, измерительные средства, учет неровностей движения.*

## METHOD A GENERALIZED FUNCTION OF THE GAP IN THE APPLICATION TO THE CONTACT INTERACTION OF MECHANICAL OSCILLATION SYSTEMS

A. V. Eliseev<sup>1, а</sup>, N. K. Kuznetsov<sup>2, б</sup>, A. N. Trofimov<sup>2, б</sup>

<sup>1,3</sup>Irkutsk State Transport University,  
15, Chernyshevskogo Str., Irkutsk, 664074, Russian Federation  
<sup>2</sup>National Research Irkutsk State Technical University  
83, Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian Federation  
E-mail: <sup>а</sup>eavsh@ya.ru, <sup>б</sup>knik@istu.edu, <sup>с</sup>trofimov\_an@irgups.ru

*The article includes the results of the development and applications of a unified theoretical approach to the assessment of the dynamic interactions of solids with the vibrating surface in the presence of unilateral constraints.*

*Keywords: unilateral ties, a function of the gap, vibration interaction, the vibrational field, the sensor, granular medium, brush-commutator unit.*

**Введение.** Неудерживающие связи определяют динамические особенности широкого круга взаимодействия механических колебательных систем, являясь причиной разнообразных динамических эффектов. Развитие теоретических представлений, отражающих особенности реализации неудерживающих связей в процессах взаимодействия гранулированной среды с вибрирующей поверхностью, контроля за сохранением контакта и взаимодействие с разрывом элементов механических узлов, предполагает широкий набор математических моделей, отражающих различные аспекты взаимодействия с учетом неудерживающих связей [1–3].

Авторы предлагают единый подход к разработке математических моделей на основе обобщенной функции зазора, отражающей особенности режимов контактного взаимодействия и режимов движения без нарушения контакта

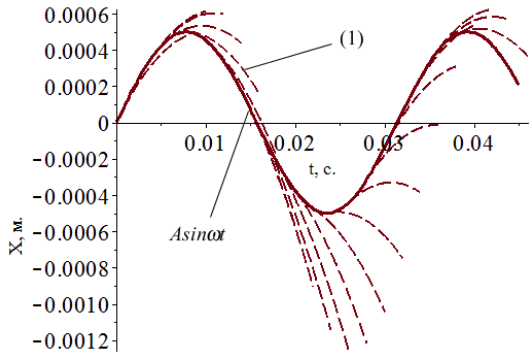
**Метод функции зазора в задачах учета неудерживающих взаимодействий.** Подход к моделированию движения с учетом неудерживающих связей на основе функции зазора включает параметризованную систему дифференциальных уравнений, функцию зазора и дифференциальные условия нарушения контакта. [4]. В таблице представлены основные

элементы подхода на примере взаимодействия материальной частицы с вибрирующей поверхностью на основе учета всевозможных форм движения частицы (рис. 1).

**Приложения.** Разработан ряд приложений метода обобщенной функции зазора. На рис. 2, а приводится расчетная схема для построения математической модели режимов непрерывного подбрасывания гранулированной среды [5–6]. С целью оценки состояния вибрационного поля в фиксированной точке рабочего органа (рис. 2, б) разработан прототип датчика для контроля динамического состояния вибрационного поля [7]. Для учета режимов движения транспортного средства разработана математическая модель, отражающая условия контактирования элементов узла двигателя транспортного средства при наличии неровностей пути [8; 9]. Расчетная схема КЩУ представлена на рис. 2, в.

**Заключение.** В рамках единого метода обобщенной функции зазора разработан ряд математических моделей для оценки вибрационных режимов технологической машины вибрационного упрочнения и режимов контактирования элементов узлов двигателя транспортного средства, предложен подход к разработке средств измерения виброрежимов.

Элементы метода функции зазора

I. Базовая модель	II. Параметрическая модель	III. Семейство возможных форм движения
$\begin{cases} \ddot{X}(t) = -g, t \geq t_0 \\ \dot{X}(t_0) = \dot{H}(t_0) \\ X(t_0) = H(t_0) \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{\partial^2 X_H(t, t_0)}{\partial t^2} = -g, t \geq t_0 \\ \left. \frac{\partial X_H(t, t_0)}{\partial t} \right _{t=t_0} = \omega A \cos(\omega t_0) \\ X_H(t, t_0) _{t=t_0} = A \sin(\omega t_0) \end{cases}$	
IV. Функция зазора:	V. Дифференциальные условия отрыва $k$ -го порядка:	
$R_H(t, t_0) = X_H(t, t_0) - H(t)$	$\begin{cases} \left. \frac{\partial^i R_H(t, t_0)}{\partial t^i} \right _{t=t_0} = 0, i < k \\ \left. \frac{\partial^k R_H(t, t_0)}{\partial t^k} \right _{t=t_0} > 0 \end{cases}$	<p>Рис. 1. Семейство форм движения с отрывом: 1 – траектория отрыва, <math>A = 0,0005</math> м, <math>\omega = 200</math> рад./с</p>

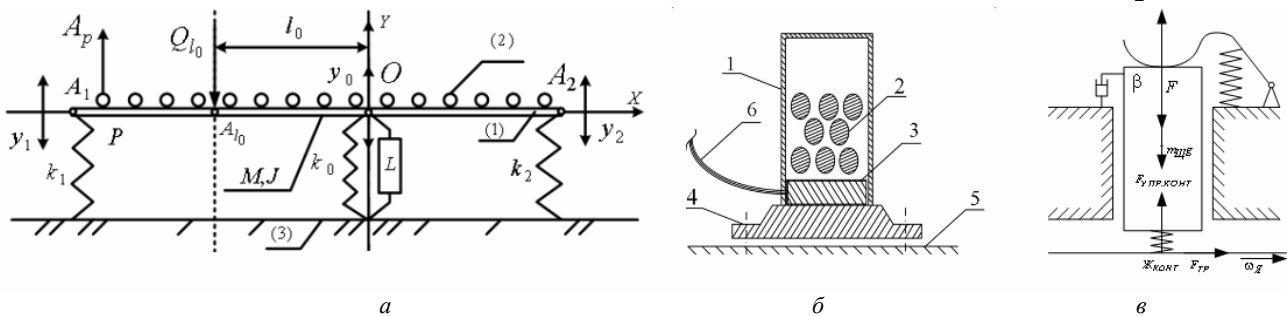


Рис. 2. Приложения:  
а – расчетная схема вибрационного стэнда; б – датчик контроля динамического состояния;  
в – расчетная схема коллекторно-щеточного узла (КЩУ) тягового двигателя

Библиографические ссылки

1. Вибрации в технике : справочник : в 6 т. / ред. совет: В. Н. Челомей (пред.). М. : Машиностроение. 1981. Т. 4. Вибрационные процессы и машины. 1981. 504 с.
2. Елисеев С. В., Артюнин А. И. Прикладная теория колебаний в задачах динамики линейных механических систем. Новосибирск : Наука, 2016. 459 с.
3. Елисеев С. В., Резник Ю. Н., Хоменко А. П. Мехатронные подходы в динамике механических колебательных систем. Новосибирск : Наука, 2011. 394 с.
4. Елисеев А. В., Сельвинский В. В., Елисеев С. В. Динамика вибрационных взаимодействий элементов технологических систем с учетом неудерживающих связей : монография // Новосибирск : Наука, 2015. 332 с.
5. Елисеев А. В., Вьонг К. Ч. Некоторые возможности управления одномерным вибрационным полем технологической машины // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Иркутск. 2016. № 1 (49). С. 33–41.
6. Неудерживающие связи в динамических взаимодействиях сыпучей среды и вибрирующей поверх-

ности: научно-методологическое обоснование технологии вибрационного упрочнения / С. В. Елисеев, В. Б. Кашуба, А. Г. Пнёв и др. // Системы. Методы. Технологии. БрГУ. Братск. 2014. № 3 (23). С. 17–31.

7. Пат. 166422 Российская Федерация, МПК G01P 15/09. Датчик для контроля динамического состояния вибрационного поля / Елисеев А. В., Елисеев С. В., Хоменко А. П. и др. ; опубли. 27.11.2016. Бюл. № 33.
8. Елисеев А. В., Орленко А. И., Ситов И. С. Математические модели контактных взаимодействий на стадиях движения с отрывом // Системы. Методы. Технологии. БрГУ. Братск, 2017. № 4 (36). С. 18–24. Doi: 10.18324/2077-5415-2017-4-18-24.

References

1. Chelomei V. N. *Vibratsii v tekhnike: spravochnik v 6-ti tomakh. T. 4. Vibratsionnye protsessy i mashiny* [Vibration technique: reference : in 6 vol. Vol. 4. Vibrating machines and processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 504 p.
2. Eliseev S. V., Artyunin A. I. *Prikladnaya teoriya kolebaniy v zadachakh dinamiki lineynykh mekhanicheskikh sistem* [Applied theory of oscillations in prob-

lems of dynamics of linear mechanical systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2016. 459 p.

3. Eliseev S. V., Reznik Yu. N., Khomenko A. P. *Mekhatronnye podkhody v dinamike mekhanicheskikh kolebatel'nykh sistem* [Mechatronic approaches in the dynamics of mechanical oscillatory systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2011. 394 p.

4. Eliseev A. V., Sel'vinskii V. V., Eliseev S. V. *Dinamika vibratsionnykh vzaimodeystviy elementov tekhnologicheskikh sistem s uchetom neuderzhivayushchikh svyazey* [Dynamics of vibrating elements of interactions of technological systems based on unilateral constraints]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2015. 332 p.

5. Eliseev A. V., Vyong K. Ch. [Some possibilities of control of one-dimensional vibration field of technological machine]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie*. 2016. No. 1 (49). P. 33–41. (In Russ.)

6. Eliseev S. V., Kashuba V. B., Pnev A. G. et al. [Not-holding ties in the dynamic interactions of the granular medium and the vibrating surface: the scientific-methodological substantiation of the technology of vibration hardening]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2014. No. 3 (23). P. 17–31. (In Russ.)

7. Eliseev A. V., Eliseev S. V., Khomenko A. P. et al. *Datchik dlya kontrolya dinamicheskogo sostoyaniya vibratsionnogo polya* [Sensor for monitoring the dynamic state of the vibration field]. Patent RF, No. 166422, 2016.

8. Eliseev A. V., Orlenko A. I., Sitov I. S. [Mathematical models of contact interactions at the stages of motion with a gap]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2017. No. 4 (36). P. 18–24. (In Russ.)

© Елисеев А. В., Кузнецов Н. К.,  
Трофимов А. Н., 2018

УДК 62.752; 621.534, 629.4.015

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СВЯЗИ КАК ФАКТОР ИЗМЕНЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

С. В. Елисеев<sup>а</sup>, К. Ч. Вьонг<sup>б</sup>, А. С. Миронов<sup>с</sup>

Иркутский государственный университет путей сообщения  
Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15  
E-mail: <sup>а</sup>eliseev\_s@inbox.ru, <sup>б</sup>trucvq1990@gmail.com, <sup>с</sup>art.s.mironov@mail.ru

*Развивается метод построения математических моделей механических колебательных систем на основе технологий структурного математического моделирования. Показано, что введение дополнительных упруго-рычажных связей может выступать в качестве средств корректировки и изменения динамического состояния систем. Предложена технология преобразований и получения аналитических соотношений, определяющих возможности формирования распределения амплитуд колебаний точек рабочих органов технических объектов.*

*Ключевые слова: передаточная функция, межпарциальные связи, рычажные связи, динамические режимы.*

## ADDITIONAL TIES AS A FACTOR OF CHANGING THE DYNAMIC PROPERTIES OF MECHANICAL OSCILLATORY SYSTEMS

S. V. Eliseev<sup>a</sup>, Q. T. Vuong<sup>b</sup>, A. S. Mironov<sup>c</sup>

Irkutsk State Transport University  
15, Chernyshevskogo Str., Irkutsk, 664074, Russian Federation  
E-mail: <sup>a</sup>eliseev\_s@inbox.ru, <sup>b</sup>trucvq1990@gmail.com, <sup>c</sup>art.s.mironov@mail.ru

*A method for constructing mathematical models of mechanical oscillatory systems is developed on the basis of structural mathematical modeling. It is shown that the introduction of additional elastic-lever ties can act as a means of correcting and changing the dynamic state of the system. The technology of transformations and obtaining analytical relations that determine the possibilities of forming the distribution of the vibration amplitude of the points of the working bodies of technical objects is offered.*

*Keywords: transfer function, inter-partial ties, lever ties, dynamic regimes.*

**Введение.** Многие машины технологического и транспортного назначения, оборудование и аппаратура различных производств, работают в условиях интенсивного динамического нагружения [1–3], что стимулирует поиск способов и средств оценки, контроля и управления динамическими состояниями технических объектов.

В качестве расчетных схем разнообразных технических объектов чаще всего используются механические колебательные системы, что позволяет создавать соответствующие математические модели, отражающие особенности динамических состояний объектов, возникающие при взаимодействиях с внешней средой, влиянии действия различных возмущающих факторов, введении дополнительных и корректирующих факторов [4; 5].

В подобного рода задачах динамики большое значение имеет выбор математических моделей с учетом их возможностей адекватного отображения особенностей и специфики динамических взаимодействий элементов. Авторами развивается метод структурного

математического моделирования, в рамках которого расчетной схеме в виде механической колебательной системы с двумя степенями свободы сопоставляется эквивалентная в динамическом отношении система автоматического управления с последующим применением технологий использования передаточных функций.

**Структурная математическая модель и технология ее построения.** Технический объект представлен в обобщенном виде как твердое тело, обладающее массой ( $M$ ) и моментом инерции ( $J$ ), которое связано с опорной поверхностью упругими элементами с жесткостями  $k_1$  и  $k_2$ . Система испытывает силовые возмущения, представляющие собой гармонические синфазные функции. Принципиальная схема технического объекта приведена на рис. 1.

Отличительной особенностью системы является введение в ее структуру рычажно-упругой связи ( $k_0$ ).

**Особенности динамических свойств.** Структурная математическая модель построена на основе технологий, изложенных в работах [4; 5].

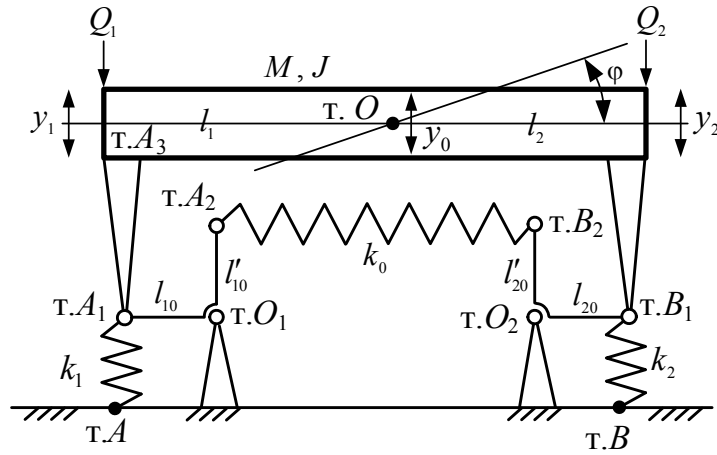


Рис. 1. Принципиальная схема технического объекта

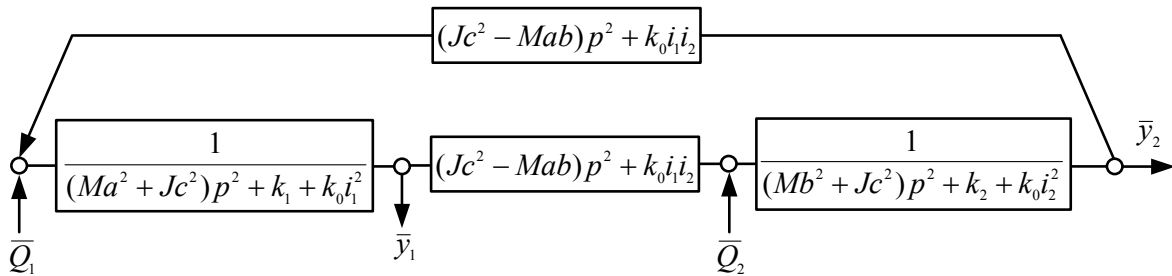


Рис. 2. Структурная математическая модель (структурная схема) системы по рис. 1

На основе структурной схемы может быть получена передаточная функция межпарциальных связей для общего случая с учетом того, что  $\bar{Q}_2 = \alpha \cdot \bar{Q}_1$  ( $\alpha$  – коэффициент связности внешних сил)

$$W_{12}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{\alpha[(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1 + k_0i_1^2 + (Jc^2 - Mab)p^2 + k_0i_1i_2]}{(Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2 + k_0i_2^2 + \alpha[(Jc^2 - Mab)p^2 + k_0i_1i_2]}$$

где  $i_1, i_2$  – передаточные отношения рычажных связей;  $k_0$  – жесткость дополнительной упругой связи;  $a, b, c$  – параметры системы

$$a = \frac{l_2}{l_1 + l_2}, \quad b = \frac{l_1}{l_1 + l_2}, \quad c = \frac{1}{l_1 + l_2}.$$

**Заключение.** Введение дополнительной связи изменяет вид межпарциальной связи, которая из инерционной трансформируется в инерционно-упругую. Такая связь на определенной частоте «обнуляется», что является новым динамическим эффектом.

В целом система при дополнительных связях приобретает более широкие возможности для реализации режимов динамических колебаний. Основное преимущество предлагаемого подхода заключается в том, что передаточная функция межпарциальных связей может быть использована для построения вибрацион-

ных полей и оценки форм распределений амплитуд колебаний точек рабочего тела ( $M, J$ ). Это достигается приравнением передаточной функции постоянной величине, в том числе, единице.

Предлагаемый подход распространяется и на случаи оценки влияния настроечных параметров системы, например, параметров рычажных связей или величины жесткости систем.

### Библиографические ссылки

1. Блехман И. И. Вибрационная механика. М. : Наука, 1994. 394 с.
2. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов / С. В. Елисеев, Ю. Н. Резник, А. П. Хоменко, А. А. Засядко. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2008. 523 с.
3. Елисеев С. В., Артюнин А. И. Прикладная теория колебаний в задачах динамики линейных механических систем. Новосибирск : Наука, 2016. 459 с.
4. Clarence W. Vibration. Fundamentals and Practice / Clarence W., De Silva. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 2000. 957 p.
5. Елисеев С. В., Резник Ю. Н., Хоменко А. П. Мехатронные подходы в динамике механических колебательных систем. Новосибирск: Наука, 2011. 384 с.

### References

1. Blekhman I. I. *Vibratsionnaya mekhanika* [Vibration mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1994. 394 p.
2. Eliseev S. V., Reznik Yu. N., Khomenko A. P., Zasyadko A. A. *Dinamicheski sintez v obobshennyikh zadachakh vibrozashityi i vibroizolyatsii technicheskikh obektov* [Dynamic synthesis in generalized problems of vibration protection and vibration isolation of technical objects]. Irkutsk : Irkutsk State University Publ., 2008. 523 p.
3. Eliseev S. V., Artyunin A. I. *Prikladnaya teoriya kolebaniy v zadachakh dinamiki lineynykh mekhanicheskikh system* [Applied theory of oscillations in tasks of linear mechanical systems]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2016. 459 p.
4. Clarence W. *Vibration. Fundamentals and Practice*. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 2000. 957 p.
5. Eliseev S. V., Reznik Yu. N., Khomenko A. P. *Mekhatronye podkhody v dinamike mekhanicheskikh kolebaniykh system* [Mechatronic approaches in the dynamics of mechanical oscillation systems]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2011. 384 p.

© Елисеев С. В., Вьюнг К. Ч.,  
Миронов А. С., 2018

## ДЕМПФЕР НА ОСНОВЕ ТРАБЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ

Д. В. Ермаков

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

*Демпферы на основе сетчатой структуры пространственного нагружения предназначены для защиты от воздействия вибрации и ударных нагрузок в опорной, подвесной и консольной схемах нагружения, воспринимают нагрузки, действующие под любым углом к его оси, и обладают повышенной статической прочностью. Для того чтобы результат работы демпферов был предсказуемым и контролируемым еще на стадии проектирования, необходимо применить возможности САПР и аддитивную технологию изготовления сетчатой структуры объемного тела.*

*Ключевые слова: аддитивная технология, 3D-принтер, двигатель-маховик, демпфер.*

## THE DAMPER BASED ON THE TRABECULAR STRUCTURE

D. V. Ermakov

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

*The dampers are based on the mesh structure of the loading space is designed to protect against vibration effects and shock loads in the supporting, hanging and cantilever load cases, see load acting at any angle to its axis and have high static strength.*

*To the result of the work the dampers were predictable and controllable even at the design stage, it is necessary to apply the capabilities of CAD system and additive technology for making mesh structure of three-dimensional body.*

*Keywords: additive technology, 3D printer, engine-flywheel, snubber.*

Одна из актуальных проблем при проектировании двигателей-маховиков для системы ориентации и стабилизации космического аппарата – снижение влияния возмущающего момента, который через посадочную плоскость двигателя-маховика передается на аппарат и вызывает резонансные явления уже на его конструкции. Для ее решения предлагается использовать демпфирующие устройства.

Демпферы на основе сетчатой структуры пространственного нагружения предназначены для защиты от воздействия вибрации и ударных нагрузок в

опорной, подвесной и консольной схемах нагружения, воспринимают нагрузки, действующие под любым углом к его оси, и обладают повышенной статической прочностью.

Однако в сетчатых демпферах (рис. 1) структура сформирована в объемное плотное тело из проволоки константной толщины и длины, т. е. жесткость амортизирующей сетчатой системы изотропна с непрогнозируемым распределением нагрузки внутри плотного тела демпфера, а это является недостатком таких устройств.



Рис. 1. Сетчато-проволочная структура

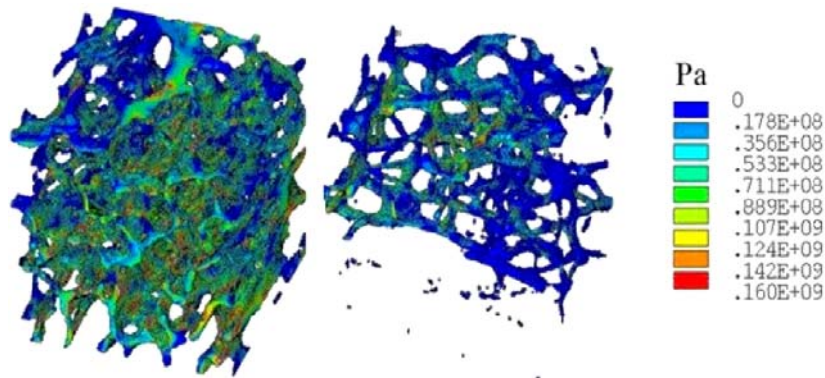


Рис. 2. Расчетная модель структуры демпфера

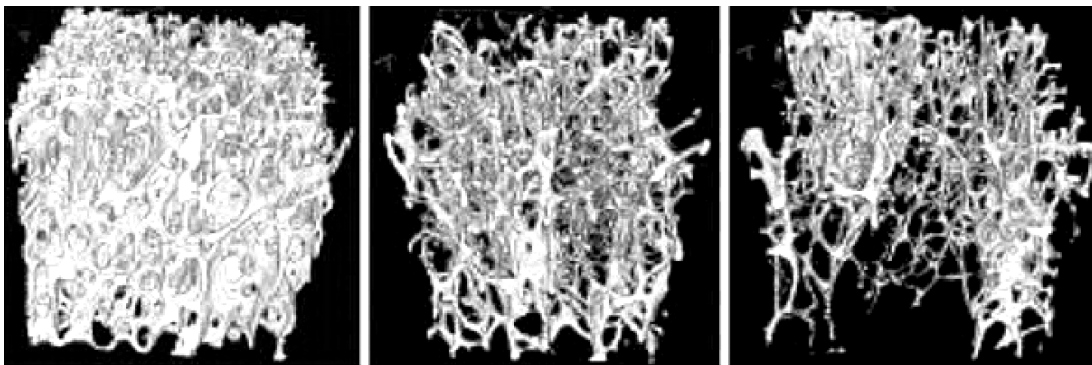


Рис. 3. Сгенерированная трабекулярная структура демпфера

Сформировав объем сетчатого тела из проволоки определенной длины и толщины, можно получить определенную плотность и жесткость самого тела. Такой подход к проектированию демпферов не позволяет объемно анализировать процесс прохождения нагрузки через плотное сетчатое тело.

Чтобы результат работы демпферов был предсказуемым и контролируемым еще на стадии проектирования, необходимо применить другой подход для формирования объемного плотного тела сетчатой структуры.

Для этого предлагается использовать современные возможности САПР и аддитивную технологию изготовления сложно сгенерированной сетчатой структуры объемного тела – демпфера с трабекулярной структурой.

За основу взяты линейно-проволочная структура существующих демпферов (рис. 1) и пористое строение костной ткани, которые с помощью трехмерного моделирования распределения нагрузки в САПР (рис. 2) генерируются в трабекулярную структуру с подобранными трабекулами взаимосвязей прохождения нагрузки (рис. 3).

Трабекула – это небольшой, микроскопический элемент структуры в виде маленького пучка, стойки или стержня, который выполняет механическую функцию, а именно: воспринимает нагрузку.

При возникновении возмущающих моментов со стороны изолируемого объекта трабекулярные

элементы воспринимают как вертикальные, так и горизонтальные нагрузки, ослабляя тем самым динамическое воздействие от него. Варьируя геометрию трабекулярной структуры возможно осуществлять настройку собственной резонансной частоты демпфера и управлять дорожками (лабиринтами трабекул) прохождения нагрузки, чего не позволяют осуществить демпферы с сетчато-проволочной структурой.

Величиной, учитывающей структурные особенности рассматриваемого демпфера, является вектор структуры. Данный вектор позволяет сформировать соотношения, способные описывать упругие свойства демпфера с учетом его строения и деформационные изменения демпфирующей структуры. Упругость демпфера зависит от пористости трабекулярной структуры, а именно от ее твердого объема в теле демпфера. При этом упругие свойства применяемого в демпфере материала обусловлены ориентацией трабекул.

Изготовить демпфер с такой сложной структурой возможно с помощью аддитивной технологии. 3D-печать позволит не только воссоздать необходимую трабекулярную структуру по сгенерированной в САПР модели с подобранным материалом, но и изготовить ее из нескольких компонентных материалов, что поможет значительно увеличить качественный функционал демпфера.



УДК 621.372.83.001.24

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВОЛНОВОДНО-РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТРАКТОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СВЯЗИ

Р. В. Зайцев, В. Ю. Гусев, В. В. Ананьев, И. А. Скачков, С. К. Злобин

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

*Рассмотрены проблемы получения качественного паяного соединения «труба–фланец» на установке автоматизированной пайки волноводно-распределительных трактов космических аппаратов связи.*

*Ключевые слова: пайка, волноводно-распределительные тракты, индукционный нагрев.*

## IMPROVING THE ACCURACY OF FABRICATION OF THE WAVEGUIDE-JUNCTION OF PATHS OF SPACECRAFT COMMUNICATION

R. V. Zaitsev, V. U. Gusev, V. V. Ananayev, I. A. Skachov, S. K. Zlobin

JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: Zaitsev@iss-reshetnev.ru

*The problems of obtaining high-quality solder connection “Pipe–Flange” on the installation of automated soldering of waveguide distribution paths of communication spacecraft are considered.*

*Keywords: soldering, waveguide-distributive tracts, induction heating.*

В настоящее время АО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева» совместно с СибГУ им. М. Ф. Решетнева разработан и внедрен комплекс автоматизированной 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.

Основными типами соединения в конструкции волноводного тракта являются соединения: «фланец–труба»; «муфта–труба».

Для пайки волноводов применяется зазор 0,1 мм на сторону. Чтобы уменьшить количество дефектов пайки и для получения гарантированного зазора в конструкции фланцев и муфт применяются специальные «выступы» рис. 1.

Данные «выступы» позволяют обеспечить равномерный зазор в 0,1 мм по всему периметру паяемого стыка. Также данная конструкция позволяет отцен-

трировать оси волноводной трубы с осью фланца (муфты).

Для соединения «фланец–труба» применяется схема сборки, представленная на рис. 2. В данном случае применяется волноводная труба с допуском на толщину стенки  $\pm 0,15$  мм, дополнительная обработка трубы не производится.

Для сборки применяются специальные прижимы (приспособление для фиксации) и удерживающие кольца. Кольцо базирует фланец в месте установки и защищает приспособление для фиксации от воздействия высоких температур, т. к. они выполняются из не магнитных материалов. При такой схеме сборки достигается максимальная точность на перпендикулярность фланца к трубе 0,3 мм и для сборки необходима длина прямого участка, на трубе, минимум 25 мм. Такая точность, получается, из-за допусков на изготовление применяемые приспособления, а также в результате постоянного воздействия высоких температур и активных флюсов.

Для соединения «фланец–труба» предлагается схема сборки, представленная на рис. 3.

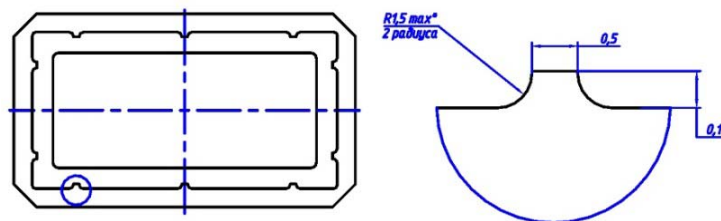


Рис. 1. Схематический вид фланца и муфты с «выступами» под пайку

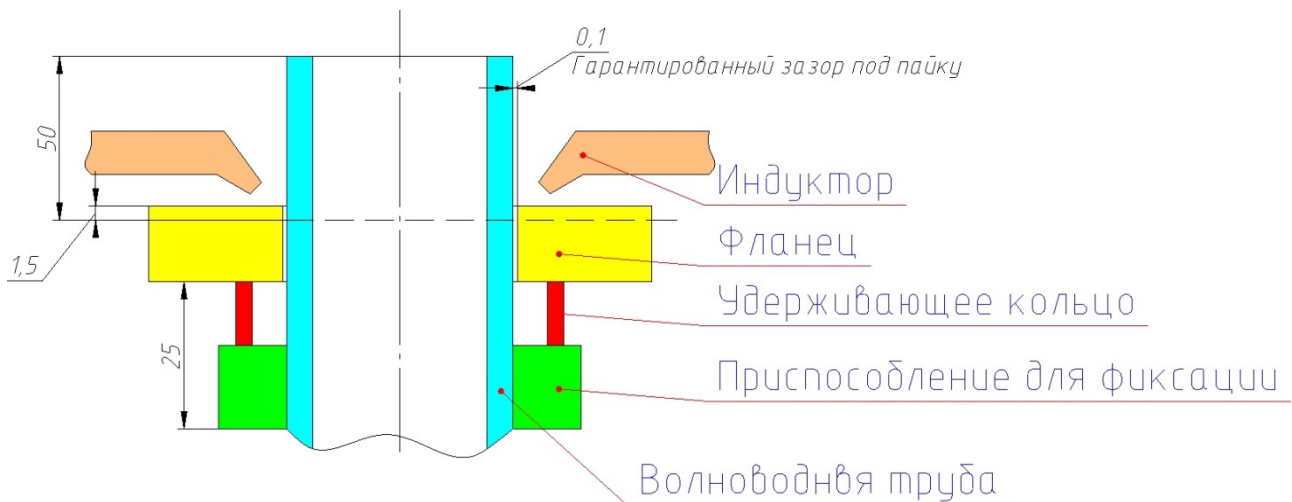


Рис. 2. Схематический вид классической схемы сборки волновода под пайку

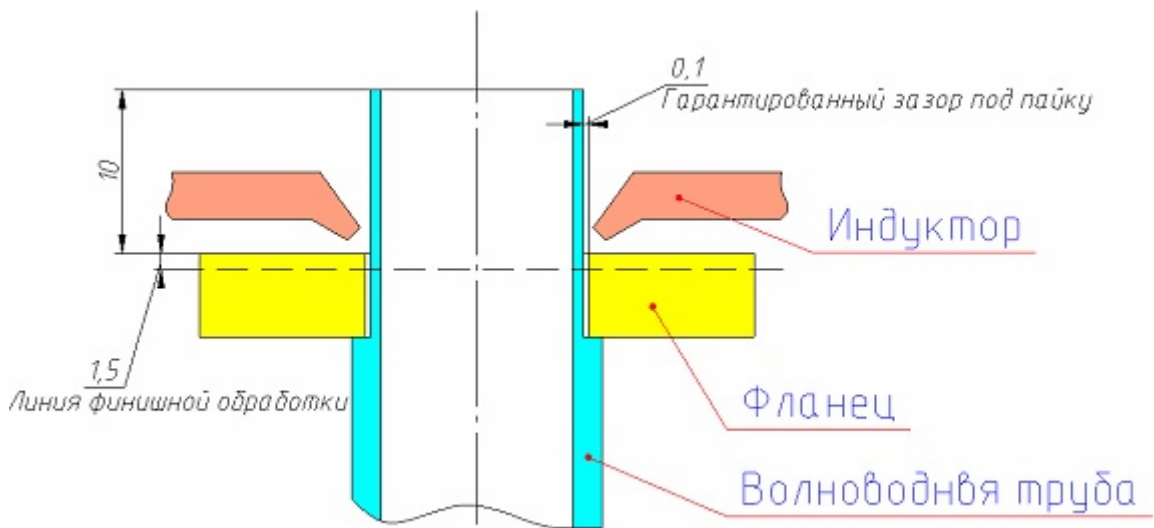


Рис. 3. Схематический вид предлагаемой схемы сборки волновода под пайку

**Результаты измерений перпендикулярности фланца к трубе на волноводах предлагаемой конструкции**

№ сборки	Требования КД, после механической обработки	Отклонение после пайки	Отклонение после механической обработки
1	0,05	0,09	0,007
2	0,05	0,09	0,05
3	0,05	0,04	0,04
4	0,05	0,06	0,001
5	0,05	0,03	0,006

Данная схема предполагает выполнить дополнительную механическую обработку волноводных труб под установку фланца, на длину 15 мм. В процессе сборки не требуется дополнительная оснастка для фиксации фланца в месте пайки.

Предлагаемая схема была проверена на образцах волноводных труб сечением 13×6,5×1,2 мм, результаты представлены в таблице.

Внедрение данной конструкции позволит повысить точность изготовления волноводов с точности 0,3 мм к 0,1 мм при пайке, и с точности 0,1 мм к 0,05 мм после механической обработки.

© Зайцев Р. В., Гусев В. Ю., Ананьев В. В., Скачков И. А., Злобин С. К., 2018

УДК 621.891

## ОПТИМАЛЬНЫЕ НАГРУЗОЧНО-СКОРОСТНЫЕ РЕЖИМЫ ТРЕНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

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: sibgau-uks@mail.ru

*Представлен алгоритм нахождения предельных и оптимальных режимов трения червячной пары с применением антифрикционного покрытия.*

*Ключевые слова: червячная пара, антифрикционное покрытие, режимы трения.*

## OPTIMAL LOADING-SPEED MODES OF FRICTION ANTI-FRICTION COATINGS

N. V. Zakharova

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

*An algorithm for finding limit and optimal modes of friction of the worm pair with the use of anti-friction coating is presented.*

*Keywords: a pair of worm, anti-friction coating, the friction modes.*

Выход из строя червячной пары, работающей с применением смазочных материалов в критических условиях на предельных по нагрузочным скоростям параметрам режимам трения обуславливается разрушением смазочной пленки вследствие высокой контактной температуры трения. Оптимальные нагрузочно-скоростные режимы червячной пары по долговечности, коэффициенту трения или другим факторам, определяющим работоспособность сопряжения, объясняются благоприятным температурным состоянием контактной поверхности трения. Для твердосмазочных покрытий температура размягчения связующего около 100 С [1]. Температура трения ( $T_{тр}$ ) является функцией от двух эксплуатационных факторов – контактного давления ( $p_{конт}$ ) и скорости скольжения ( $v$ ), следовательно, для смазочных материалов, образующих на поверхности трения смазочную пленку, должны существовать комплексные зависимости, определяющие предельные и оптимальные сочетания указанных факторов.

Применение математических методов планирования эксперимента позволяют построить матрицу в которой варьируемыми факторами являются значения контактного давления и скорости скольжения, а параметром оптимизации – температура трения. После приработки червячной пары с нанесенными антифрикционными покрытиями на основном уровне факторов в процессе одного испытания факторы  $p_{конт}$  и  $v$  измеряются по заданному закону и непрерывно регистрируется соответствующая им  $T_{тр}$  на стацио-

нарном уровне. После математической обработки полученных данных рассчитывается уравнение поверхности отклика  $T_{тр} = f(p_{конт}, v)$ , вводя в которое оптимальную по долговечности, коэффициенту трения или другому фактору, определяющему процесс трения, температуру смазочного материала, получают соответствующие зависимости вида  $p_{опт} = f(v_{опт})$ , позволяющие определить для каждой  $v$  реальной пары трения предельные и оптимальные нагрузки, или по известной нагрузке рассчитать предельную и оптимальную скорости (см. рисунок).

Для нахождения предельных режимов трения целесообразно использовать следующий алгоритм [2]:

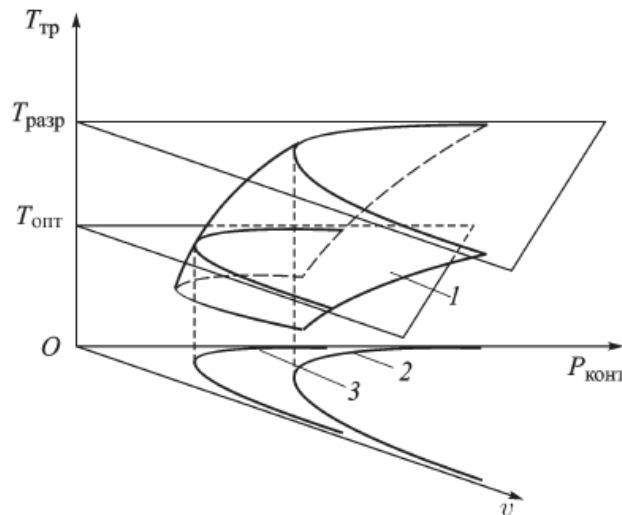
- проведение экспериментов для определения  $T_{разр}$  на предельных режимах трения при различных  $p_{1пред}$ ,  $v_{1пред}$ ;  $p_{2пред}$ ,  $v_{2пред}$  и т. д.;

- оценка и расчет диапазонов проведения планируемых экспериментов и определение зависимости  $T_{тр} = f(p, v)$ ;

- построение «изотермы»  $p_{max} = f(v_{max})$  для наибольшей в эксперименте температуры  $T_{max}$ ;

- определение направления максимального градиента  $T_{тр}$  на поверхности  $T_{тр} = f(p, v)$  и расчета зависимости  $p_{пр} = f(v_{пр})$  с учетом смещения по градиенту от  $T_{max}$  к  $T_{разр}$ .

Данный способ позволяет экспериментально определить предельные эксплуатационные режимы трения для любого сочетания контактного давления и скорости скольжения червячной пары с применением антифрикционного покрытия.



Предельные и оптимальные нагрузочно-скоростные режимы трения антифрикционных покрытий:  
 1 – температурная характеристика исследуемой червячной пары по факторам  $p_{\text{конт}}$  и  $v$ ; 2 – кривая предельных значений  $p_{\text{пред}} = f_1(v_{\text{пред}})$ ; 3 – кривая оптимальных значений  $p_{\text{опт}} = f_2(v_{\text{опт}})$

#### Библиографические ссылки

1. Сентюрихина Л. Н., Опарина Е. М. Твердые дисульфид-молибденовые смазки. М. : Химия, 1966. 152 с.
2. Хопин П. Н. Способ определения предельных и оптимальных режимов трения твердосмазочных покрытий // Ресурсосберегающие технологии машиностроения : сб. науч. трудов межвуз. науч.-техн. прог. М. : МГААТМ, 1995. С. 300–303.

#### References

1. Sentyurikhina L. N., Oparina E. M. [Solid disulfide-molybdenum lubricants]. M. : Khimiya, 1966. 152 p.
2. Khopin P. N. [The method of determining the maximum and optimal modes of friction of hard lubricant coatings]. Sb. nauch. trudov mezhvuz. nauch.-tekhn. prog. "Resursosberegayushchie tekhnologii mashinostroeniya". M. : MGAATM, 1995. P. 300–303.

© Захарова Н. В., 2018

УДК 62.752, 621:534;833; 888.6, 629.4.015;02

## ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА РАБОТУ ВИБРАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

В. Л. Лапшин<sup>1</sup>, Р. С. Большаков<sup>2</sup>, А. В. Николаев<sup>3</sup><sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет

Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

<sup>2,3</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения

Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15

E-mail: bolshakov\_rs@mail.ru

*Предлагается подход в управлении параметрами технологической машины с расчётной схемой в виде механической колебательной системы с твёрдым телом за счёт изменения соотношений между действующими силовыми возмущениями.*

*Ключевые слова: вибрационная технологическая машина, силовое возмущение, вибрационное поле.*

## INFLUENCE OF EXTERNAL DISTURBANCES OF VIBRATION TECHNOLOGICAL MACHINE WORK

V. L. Lapshin<sup>1</sup>, R. S. Bolshakov<sup>2</sup>, A. V. Nikolaev<sup>3</sup><sup>1</sup>Irkutsk National Research Technical University

83, Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian Federation

<sup>2,3</sup>Irkutsk State Transport University

15, Chernishevskiy Str., Irkutsk, 664074, Russian Federation

E-mail: bolshakov\_rs@mail.ru

*Approach in control of parameters of technological machine with design scheme in view of mechanical oscillation system with rigid body on account of ratio change between active force disturbances is offered.*

*Keywords: vibration technological machine, force disturbance, vibratory field.*

**Введение.** Вибрационные технологические машины широко используются в различных отраслях промышленности, с их помощью производятся процессы перемещения сыпучих сред, сортировка сырья, виброупрочнение деталей и др. [1–3]. Во многих случаях необходимой является настройка распределения амплитуд колебаний отдельных точек рабочего органа вибростенда, что формирует вибрационное поле. Такие формы движения создаются различного рода вибровозбудителями, входящими в структуру механической колебательной системы, рассматриваемой как расчётная схема вибростенда [4; 5].

В предлагаемом докладе рассматривается способ управления динамическим состоянием вибрационной технологической машины на основе изменения соотношения между силовыми внешними возмущениями, действующими на систему.

**Некоторые общие положения. Постановка задачи исследования.** На рисунке, *a* приведена расчётная схема технологической вибрационной машины в виде механической колебательной системы с твёрдым телом массой  $M$  и моментом инерции  $J$  на упругих опорах с жесткостями  $k_1$  и  $k_2$ . В системе действуют два внешних возмущения  $Q_1$  и  $Q_2$ , представляющие собой гармонические воздействия. Положение системы описывается в координатах  $y_1$  и  $y_2$ , связанных с неподвижным базисом.

Математическая модель системы может быть построена на основе использования уравнения Лагранжа 2-го рода и имеет вид системы из двух обыкновенных дифференциальных уравнений, что после преобразований Лапласа при нулевых начальных условиях может быть интерпретировано структурной математической моделью в виде структурной схемы (см. рисунок, *б*). Структурная математическая модель (см. рисунок, *б*) исходного объекта:  $p = j\omega$  ( $j = \sqrt{-1}$ ) – комплексная переменная; значок « $\leftarrow$ » над переменными означает их изображение по Лапласу [6].

Связность между  $Q_1$  и  $Q_2$  имеется, определяемая выражением

$$Q_2 = \alpha Q_1, \quad (1)$$

где  $\alpha$  является действительным числом, принимающим отрицательные, нулевые и положительные значения.

**Особенности динамических свойств системы при одновременном действии двух внешних возмущений.** На основе структурной схемы (см. рисунок, *б*) и с учётом коэффициента связности  $\alpha$  запишем передаточные функции системы

$$W_1(p) = \frac{\bar{y}_1}{Q_1} = \frac{(Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2 + \alpha(Jc^2 - Mab)p^2}{A(p)}, \quad (2)$$

$$W_2(p) = \frac{\bar{y}_2}{Q_1} = \frac{\alpha[(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1] + (Jc^2 - Mab)p^2}{A(p)}, \quad (3)$$

где

$$A(p) = [(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1] \times \\ \times [(Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2] - [(Jc^2 - Mab)p^2]^2, \quad (4)$$

является частотным характеристическим уравнением системы;  $a = \frac{l_2}{l_1 + l_2}$ ,  $b = \frac{l_1}{l_1 + l_2}$ ,  $c = \frac{1}{l_1 + l_2}$ ,  $l_1, l_2$  – расстояния от центра тяжести до точек приложения сил.

При возбуждении колебаний одним вибровозбудителем в системе возможен только один режим динамического гашения колебаний. Связность внешних воздействий через коэффициент  $\alpha$  может влиять на режимы динамического гашения колебаний по координатам  $\bar{y}_1$  и  $\bar{y}_2$ . Для оценки возможных форм проявления динамических эффектов может быть использована передаточная функция межпарциальных связей

$$W_{12}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{\alpha[(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1] + (Jc^2 - Mab)p^2}{(Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2 + \alpha(Jc^2 - Mab)p^2}. \quad (5)$$

Уравнение для определения коэффициента связности  $\alpha$ , обеспечивающее на одной частоте специфический режим динамического гашения колебаний по двум координатам  $\bar{y}_1$  и  $\bar{y}_2$

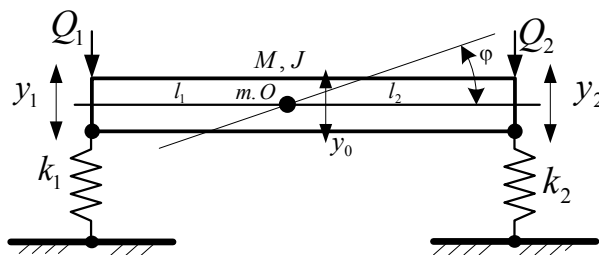
$$\alpha^2 + \alpha \frac{k_1(Jc^2 + Mb^2) - k_2(Ma^2 + Jc^2)}{k_1(Jc^2 - Mab)} - \frac{k_2}{k_1} = 0. \quad (6)$$

Уравнение (6) имеет два корня; корни уравнения могут быть отрицательными или положительными. Настраечным параметром системы может служить соотношение  $k_2/k_1 = \beta$ , при использовании корни уравнения примут вид

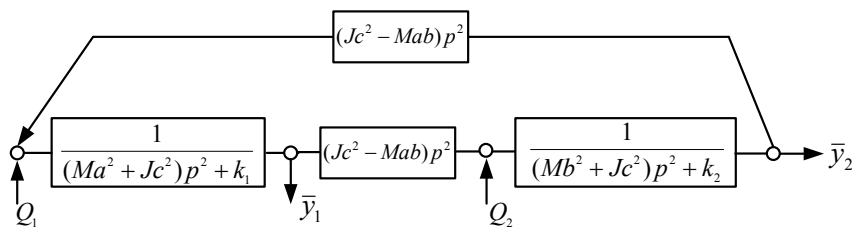
$$\alpha_{1,2} = -\frac{\rho^2(1-\beta) + (b^2 - \beta a^2)}{2(\rho^2 - ab)} \pm \\ \pm \sqrt{\frac{[\rho^2(1-\beta) + (b^2 - \beta a^2)]^2}{4(\rho^2 - ab)^2} + \beta}. \quad (7)$$

В предлагаемом подходе динамическое гашение колебаний трактуется как ситуация, в которой частота динамического гашения колебаний определяется из условия равенства нулю числителя передаточной функции. При действии одного возмущающего фактора частот динамического гашения колебаний совпадает с одной из парциальных частот. В случае действия двух одновременных возмущений такого совпадения уже не реализуется.

**Заключение.** Показано, что при действии на систему двух синфазных гармонических возмущений в системе может формироваться специфический режим, при котором система с двумя степенями свободы изменяет свою структуру и проявляет частотные характеристики, которыми обладают системы с одной степенью свободы. Отметим, что при определённых условиях возможны ситуации, когда отношение амплитуд колебаний  $\bar{y}_2 / \bar{y}_1$  будет практически во всем частотном диапазоне иметь положительное значение; что соответствует появлению возможностей создавать вибрационное поле однородной структуры.



а



б

Расчётная (а) и структурная схема (б) вибрационной технологической машины

**Библиографические ссылки**

1. Елисеев С. В., Артюнин А. И. Прикладная теория колебаний в задачах динамики линейных механических систем. Новосибирск : Наука, 2016. 459 с.
2. Елисеев А. В., Сельвинский В. В., Елисеев С. В. Динамика вибрационных взаимодействий элементов технологических систем с учетом неудерживающих связей. Новосибирск : Наука, 2015. 332 с.
3. Особенности динамических свойств рабочих органов технологических машин при инерционном возбуждении колебания / А. В. Елисеев [и др.] // Вестник Донского государственного технического университета. 2016. Т. 16, № 4 (87). С. 63–71.
4. Кашуба В. Б., Елисеев С. В., Большаков Р. С. Динамические реакции в соединениях элементов механических колебательных систем. Новосибирск : Наука, 2016. 331 с.
5. Большаков Р. С., Николаев А. В. Способ настройки динамического состояния транспортных средств при помощи рычажных механизмов // Проблемы безопасности на транспорте : материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Году науки : в 2 ч. 2017. С. 168–170.

**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 A. V., Sel'vinskii V. V., Eliseev S. V. Dynamics of vibration interactions of technological systems elements with account of non-holding ties. Novosibirsk : Science, 2015. 332 p.
3. Features of dynamical properties of work body of technological machines at inertial excitation of oscillations / A. V. Eliseev [et al.] // Bulletin of Donskoy State Technical Iniversity. 2016. Vol. 16, № 4 (87). P. 63–71.
4. Kashuba V. B., Eliseev S. V., Bolshakov R. S. Dynamical responses in connections of elements of mechanical oscillation systems. Novosibirsk : Science, 2016. 331 p.
5. Bolshakov R. S., Nikolaev A. V. Method of tuning of dynamical condition of transport vehicles with help lever mechanisms // Problems of safety on transport. Materials of VIII International science-practical conference: in two parts. 2017. P. 168–170.

© Лапшин В. Л., Большаков Р. С.,  
Николаев А. В., 2018

УДК 621.9.015

## МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА НАНЕСЕНИЯ АНТИФРИКЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ

Е. А. Лунин, Н. В. Захарова, Е. А. Карелина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: Jack\_X92@mail.ru

*Рассматриваются методы и режимы нанесения антифрикционного покрытия на поверхность червяка, а также приборы контроля толщины покрытия, адгезии, шероховатости поверхности.*

*Ключевые слова: антифрикционное покрытие, метод, адгезия, шероховатость.*

## METHODS AND CONTROL DEVICES EVALUATION OF THE QUALITY OF APPLICATION OF ANTIFRICTION COATING

E. A. Lunin, N. V. Zakharova, E. A. Karelina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: Jack\_X92@mail.ru

*The paper considers the methods and modes of application of anti-friction coating on the surface of the worm, as well as devices to control the thickness of the coating, adhesion, surface roughness.*

*Keywords: antifriction coating, method, adhesion, roughness.*

Для снижения трения в подвижных узлах любого оборудования требуется их своевременное смазывание. Выбор вида и способа смазки производится с учетом конструкции и условий эксплуатации пары трения. На сегодняшний день многие отдают предпочтение антифрикционным покрытиям по некоторым причинам. Такой смазочный материал снижает вероятность износа механизмов, при этом повышается надёжность и ресурс эксплуатации деталей и отдельных узлов.

Для нанесения АФП мы используем существующую полезную модель, согласно которой покрытие состоит из трех слоев, нижний из которых, прилегающий к металлической подложке, выполнен из молибдена, верхний слой состоит из твердой смазки, дополнительно содержащей окись кадмия, а промежуточный слой содержит связующее при следующем соотношении толщин слоев: (10–20) : (1–3) : (15–50) мкм [1].

Промежуточный и верхний слой антифрикционного покрытия будут наноситься методом распыления с использованием сжатого воздуха или электростатического процесса в специальных камерах или в обычных помещениях с хорошей вентиляцией. Окраску небольших участков целесообразно проводить с использованием аэрографа с круговым сечением факела и диаметром сопла 0,8 мм при давлении от 2 до 5 бар. Расстояние между поверхностью и аэрографом должно быть таким, чтобы продукт попадал на поверхность, не высыхая, но и не образуя брызг или капель. Толщина защитной пленки покрытия регулируется количеством наносимых слоев покрытия. Каждый последующий слой можно наносить лишь после

полного высыхания предыдущего слоя. При распылении нужно использовать сжатый сухой воздух, не содержащий масла. Для равномерного нанесения покрытия в процессе длительной работы или после перерывов покрытие необходимо периодически перемешивать. До окончания высыхания покрытия с обработанными деталями следует обращаться с большой осторожностью [2].

Для сушки АФП будем использовать естественную сушку, которая используется в случаях, когда нет необходимости в быстром высыхании нанесенного лакокрасочного материала. Для данного вида сушки не нужно использовать никаких дополнительных установок, приспособлений и т. п. Это самый недорогой метод. Нужна только производственная площадь (на открытом воздухе либо в помещении), где будет находиться окрашенная деталь до полного отверждения лакокрасочного материала. Время отверждения для каждого слоя АФП должно составлять не менее 2 часов.

Нижний слой АФП будет наноситься методом электроискрового легирования (ЭИЛ). При ЭИЛ осуществляется воздействие на металлические поверхности в газовой среде короткими (до 1000 мкс) электрическими разрядами энергией от сотых долей до десятка и более джоулей и частотой обычно не более 1000 Гц [3].

Для измерения толщины покрытия мы будем использовать толщиномер покрытий ТТ210, данный прибор имеет относительно небольшую погрешность, экономически более выгоден и позволяет проводить измерения двумя методами.



Технические характеристики толщиномера покрытий ТТ 210:

принцип работы толщиномера – индукционный/вихретоковый;

диапазон измерений – 0–1250 мкм;

минимальная дискретность индикации – 0,1 мкм (толщина покрытия <100 мкм);

предел основной погрешности –  $F: \pm(3\%N + 1 \text{ мкм})$  ( $N$  = номинальное значение),  $N: \pm(3\%N + 1,5 \text{ мкм})$ ;

статистическая обработка результатов – среднее/максимальное/ минимальное значение, количество измерений и среднеквадратическая погрешность;

электрическое питание – элементы питания типа АА 1.5В (2 шт.) [4].

Для измерения адгезии покрытия мы будем использовать адгезиметр ОР. Адгезиметр ОР предназначен для измерения адгезии покрытий методом прямого отрыва покрытия от основания, на которое оно нанесено.

Технические характеристики:

диапазон усилия отрыва – от 5 до 100 кг;

цена деления вертикальной шкалы отсчетного устройства – 10 кг;

цена деления круговой шкалы отсчетного устройства – 1 кг;

диаметр основания цилиндра № 1 –  $11,3 \pm 0,05$  мм;

диаметр основания цилиндра № 2 –  $16,0 \pm 0,05$  мм;

предел допускаемой абсолютной погрешности, кг,  $\pm(1 + 0,01F)$ , где  $F$  – измеряемая величина, кг;

сила отрыва – 100 кг [5].

Для измерения шероховатости будем использовать измеритель шероховатости поверхности PCE-RT1200, который позволит нам работать с любыми типами поверхности. Прибор позволяет работать по 4 основным параметрам, выполнять серию измерений и немедленно передавать результаты на компьютер. Это позволяет использовать прибор для входящего контроля узлов и материалов. Прибор поставляется с завода откалиброванным и готовым к эксплуатации. По измеряемой поверхности перемещается измерительный щуп, который заканчивается твердым наконечником. Амплитуда вибраций щупа усиливается, и, преобразуясь в электрический сигнал, замеряет показатель шероховатости [6].

#### Библиографические ссылки

1. Роспатент [Электронный ресурс]. URL: [http://www1.fips.ru/fips\\_serv1/fips\\_servlet?DB=RUPAT&Doc](http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=RUPAT&Doc)

Number=2211260&TypeFile=html (дата обращения: 05.09.2018).

2. Сайт АТФ. Способы нанесения антифрикционных покрытий [Электронный ресурс]. URL: [http://atf.ru/articles/obzory/sposoby\\_naneseniya\\_antifriktsionnykh\\_pokrytiy/](http://atf.ru/articles/obzory/sposoby_naneseniya_antifriktsionnykh_pokrytiy/) (дата обращения: 05.09.2018).

3. Лазаренко Н. И. Электроискровое легирование металлических поверхностей. М. : Машиностроение, 1976. 44 с.

4. ООО «ЛАНФОР РУС». Универсальный толщиномер покрытий ТТ 210 для измерения на магнитном и немагнитном основании. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. URL: <https://lanfor.ru/files/0009967.pdf> (дата обращения: 05.09.2018).

5. Отраслевой каталог измерительного и вспомогательного оборудования [Электронный ресурс]. URL: <http://www.td-izmerenie.ru/lak/test/adhesion/or.html> (дата обращения: 05.09.2018).

6. Сайт ГЕО-НТД. Оборудование для измерений, контроля и испытаний. Профилометр PCE-RT 1200 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.geo-ndt.ru/pribor-1722-profilometr-pce-rt-1200.html> (дата обращения: 05.09.2018).

#### References

1. Rospatent. Available at: [http://www1.fips.ru/fips\\_serv1/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2211260&TypeFile=html](http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2211260&TypeFile=html) (accessed: 05.09.2018).

2. The ATP website. Methods of application of anti-friction coatings. Available at: [http://atf.ru/articles/obzory/sposoby\\_naneseniya\\_antifriktsionnykh\\_pokrytiy/](http://atf.ru/articles/obzory/sposoby_naneseniya_antifriktsionnykh_pokrytiy/) (accessed: 05.09.2018).

3. Lazarenko N. So. Electrosark alloying of metal surfaces: mechanical engineering. Moscow, 1976. 44 p.

4. ООО “LANFOR RUS”. Universal thickness gauge of coatings TT 210 for measurement on magnetic and non-magnetic base. The owner’s manual. [Available at: <https://lanfor.ru/files/0009967.pdf> (accessed: 05.09.2018).

5. Industry catalogue of measuring and auxiliary equipment. Available at: <http://www.td-izmerenie.ru/lak/test/adhesion/or.html> (accessed: 05.09.2018).

6. The website GEO-NTD. Equipment for measurement, control, and testing. Profilometer PCE-RT 1200. Available at: <https://www.geo-ndt.ru/pribor-1722-profilometr-pce-rt-1200.html> (accessed: 05.09.2018).

© Лунин Е. А., Захарова Н. В., Карелина Е. А., 2018

УДК 621.891

## ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДОЛБЕЖНЫХ РЕЗЦОВ С МЕХАНИЧЕСКИМ КРЕПЛЕНИЕМ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Л. С. Малько, О. А. Суханова

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

*Представлены конструкция долбежных резцов с механическим креплением режущего инструмента, особенности технологии изготовления, преимущества конструкции и результаты внедрения в производство.*

*Ключевые слова: долбежный резец, напайка пластин, механическое крепление, термическая обработка, внедрение в производство.*

## FEATURES OF THE DESIGN AND MANUFACTURING OF SLOTTING CUTTERS WITH MECHANICAL FASTENING OF CUTTING TOOL

L. S. Mal'ko, O. A. Sukhanova

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

*The design of slotting cutters with mechanical fastening of the cutting tool, features of manufacturing technology, design advantages and results of introduction in production are presented.*

*Keywords: slotting cutter, plate soldering, mechanical fastening, heat treatment, introduction into production.*

Резец, снимающий стружку при прямолинейном перемещении его относительно обрабатываемой поверхности и вертикальном резании, называется долбежным [1]. Основные типы долбежных резцов в настоящее время стандартизированы [2; 3]. При этом режущий элемент резца изготавливается из быстрорежущей стали, а его крепление к державке осуществляется при помощи пайки. Напайка режущего элемента в форме пластины выполняется на установках ТВЧ. Для напайки крупногабаритных пластин (например, 90×40×20 мм) требуется применять установки ТВЧ с мощностью более 60 кВт.

С целью сокращения энергозатрат при изготовлении резцов взамен напайки конструкции предлагает-

ся использовать конструкцию резца с механическим креплением режущей пластины (рис. 1).

К преимуществам механического крепления режущих пластин, наряду с сокращением энергозатрат и расходов на оборудование, относится следующее:

- устраняется операция напайки;
- уменьшается расход материала на изготовление державок в связи с возможностью их многократного использования;
- уменьшается расход абразивного инструмента, так как при заточке режущего элемента нет необходимости затачивать державку.

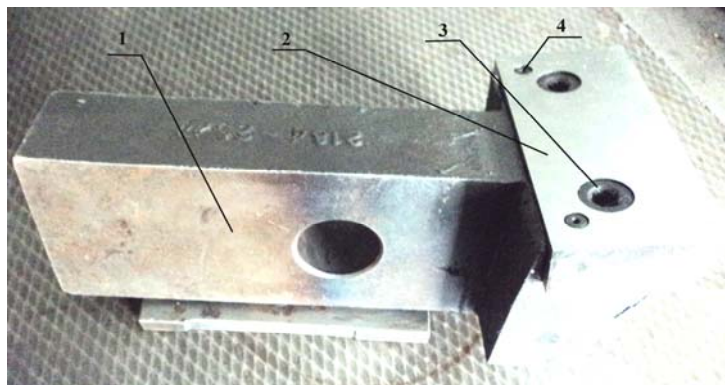


Рис. 1. Долбежный резец с механическим креплением режущей пластины:  
1 – державка резца; 2 – режущая пластина; 3 – винт; 4 – штифт

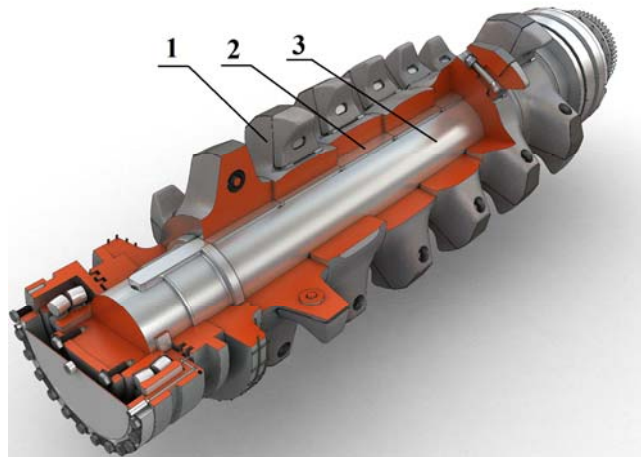


Рис. 2. Схема закрепления дисков зубчатых на валу шнека:  
1 – диск зубчатый; 2 – шпонка; 3 – вал



Рис. 3. Шнек зубчатый до ремонта (после эксплуатации)

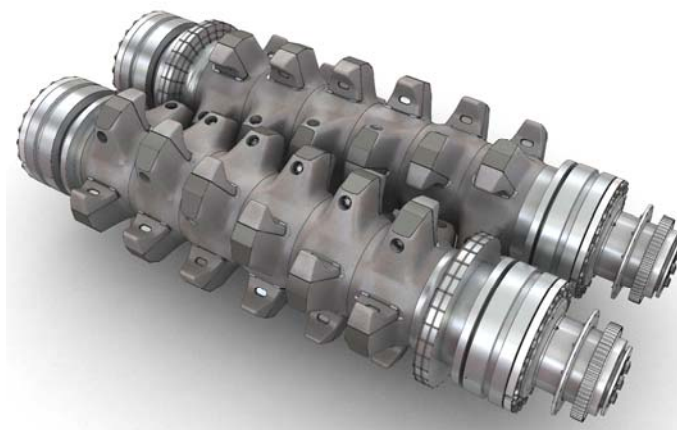


Рис. 4. Шнек зубчатый после ремонта

Различия в технологии термической обработки и заточки напайных и предлагаемой конструкции резцов заключаются в следующем. Для напайных резцов термическая обработка режущего элемента осуществ-

ляется совместно с державкой, а для случая с механическим креплением обработка выполняется отдельно. Это позволяет более качественно провести процесс.

Учитывая жесткие требования по симметричному расположению пластин относительно оси державки, заточка режущего элемента выполняется в сборе с державкой. При этом абразивный круг тела головки державки не касается.

Такая конструкция резца была разработана на кафедре ТРМ СибГУ им. М. Ф. Решетнева совместно с ООО «Амитекс» (г. Красноярск) выполнено ее изготовление, испытание и внедрение в производство при обработке шпоночных пазов в дисках зубчатых (рис. 2) при ремонте шнеков зубчатых (рис. 3, 4).

Габаритно-массовая характеристика диска и шнека зубчатых составляет соответственно  $\varnothing 1200 \times 440$  мм, масса 1,2 т,  $\varnothing 1200 \times 4450$  мм, масса 16,5 т.

Данный вид продукции используется в золотодобывающей промышленности Красноярского края в дробилках зубчатых при размельчении золотосодержащей руды перед помолом.

#### Библиографические ссылки

1. Четвериков С. С. *Металлорежущие конструкции*. М. : Высш. шк., 1965. 731 с.
2. ГОСТ 10045–75. *Долбежные резцы с пластинками из быстрорежущей стали*. М. : Изд-во стандартов, 1975. 25 с.
3. Семенченко И. И. *Проектирование металлорежущих инструментов*. М. : Машгиз, 1962. 949 с.

#### References

1. Chetverikov S. S. [Metal-cutting structures]. *Vyssshaya shkola*, 1965. 731 p.
2. GOST 10045–75. [Slotting cutters with plates of high-speed steel] *Izd-vo standartov*, 1975. 25 p.
3. Semenchenko I. I. [Design of metal-cutting tools]. *Mashgiz*. 1962. 949 p.

© Малько Л. С., Суханова О. А., 2018

УДК622.24

## АВТОНОМНАЯ ПАКЕРНАЯ СИСТЕМА\*

А. Л. Неверов, Ф. А. Бурюкин, В. А. Жигарев

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

*Для повышения экономической эффективности ремонтно-изоляционных работ нефтяных и газовых скважин с использованием механических пакеров разрабатывается новая автономная пакерная система.*

*Ключевые слова: пакер, ремонтно-изоляционные работы, ликвидация негерметичности.*

## AUTONOMOUS PACKER SYSTEM

A. L. Neverov, F. A. Buryukin, V. A. Zhigarev

Siberian Federal University  
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
E-mail: inig@sfu-kras.ru

*To increase the economic efficiency of repair and insulation works of oil and gas wells using mechanical packers, a new stand-alone packer system is being developed.*

*Keywords: packer, repair and insulation work, liquidation of leaks.*

В настоящее время большая часть нефтяных месторождений России находится на поздней стадии разработки и характеризуется высокой и постоянно увеличивающейся обводненностью добываемой продукции. Одной из причин высокой обводненности является наличие негерметичности эксплуатационных колонн. Возникновение негерметичности эксплуатационных колонн связано как с качеством первичного цементирования, так и с самыми различными условиями эксплуатации скважин [1–3].

Для решения проблемы негерметичности эксплуатационных колонн применяются различные технологии с использованием тампонажных составов и технических средств, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки, свою область применения.

При стандартной схеме эксплуатации в скважину спускают насосное оборудование, устанавливает его над интервалом перфорации, снижают давление на приеме насоса, тем самым снижая забойное давление и вызывая приток жидкости из пласта. При обводненности продукции более 20–30 % в эксплуатационной колонне происходит перераспределение потоков флюида и гравитационное разделение его на фазы в «газ-нефть-вода». Вода как агент, имеющий большую подвижность, чем нефть, поступает в скважину быстрее, отгоняя приток нефти из призабойной зоны, тем самым образуя конус притока, направленный вверх. Так образуется искусственный водный барьер для нефти, происходит смачивание водой продуктивной

части вскрытого интервала пласта, повышается процент обводненности добываемой жидкости [1–3].

С целью снижения эксплуатационных затрат, увеличения текущих отборов, повышение коэффициента извлечения и увеличение выработки запасов разрабатывается пакерная система. Пакерная система устанавливается в скважине автономно в интервал негерметичности, который находится ниже спускаемого эксплуатационного оборудования (ШГН, УЭЦН, фонтанный лифт). Перед монтажом пакера необходимо произвести подготовку скважины путем скрепирования места установки. Устанавливают пакер напротив пласта (нарушения), опрессовывают, разъединяют колонну НКТ с помощью переводника с левой резьбой или гидравлическим путем.

Пакер содержит срезной узел, латунные штифты, срезаемые во время установки пакера при расчетном усилии. Нижние плашки обеспечивают надежное зацепление к обсадной колонне, установленные в каретке, перемещающий по кодовому пазу ствола пакерной системы.

Перекрытие требуемой зоны посредством давления в ее полости обеспечивает надувной уплотняющий элемент. Создание избыточного давления внутри надувного уплотняющего элемента производится за счет обратного клапана. Верхние плашки обеспечивают надежное зацепление к обсадной колонне за счет разгрузки веса колонны НКТ на пакерную систему.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», мероприятие 1.3. Уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57817X0236, соглашение о предоставлении субсидии № 14.578.21.0236 от 26.09.2017 г.

Таким образом, разрабатываемое устройство автономной пакерной системы по сравнению с ближайшими аналогами позволяет улучшить эксплуатационные характеристики скважины за счет снижения аварийности при эксплуатации, вследствие надежной герметизации интервала негерметичности эксплуатационной колонны, находящегося ниже спускаемого эксплуатационного оборудования.

#### Библиографические ссылки

1. Аминев М. Х., Змеу А. А. Технологии изоляции мест негерметичности эксплуатационной колонны пакерными компоновками. Методы установки пакеров при недостаточной нагрузке // Экспозиция нефть и газ. 2012. № 1. С. 36–37.
2. Аминев М. Х., Змеу А. А. Технология повышения нефтеотдачи пластов и уменьшения обводненности от теории к практике // Экспозиция нефть и газ. 2011. № 6. С. 53–54.
3. Фариз Ахмед, Алиев Ш. Г., Искендеров Э. Х. Состояние и проблемы по устранению негерметичности эксплуатационных колонн в скважинах месторо-

ждения БУЗОВНА-МАШТАГА // Розвідка та розробканафтових і газових родовищ. 2015. № 3 (56). С. 141–144.

#### References

1. Aminev M. Kh., Zmeu A. A. Tekhnologii izolyatsii mest negermetichnosti ekspluatatsionnoy kolonny pakernymi komponovkami. Metody ustanovki pake-rov pri nedostatochnoy nagruzke // Ekspozitsiya nefť i gaz. 2012. № 1. P. 36–37.
2. Aminev M. Kh., Zmeu A. A. Tekhnologiya povyshe-niya nefteotdachi plastov i umen'sheniya obvodnenno-sti ot teorii k praktike // Ekspozitsiya nefť i gaz. 2011. № 6. P. 53–54.
3. Fariz Akhmed, Aliyev Sh. G., Iskenderov E. Kh. Sostoyaniye i problemy po ustraneniyu negermetichno-sti ekspluatatsionnykh kolonn v skvazhinakh mestoro-zhdeniya BUZOVNA-MASHTAGA // Rozvidka ta roz-rob-kanafrovikh i gazovikh rodovishch. 2015. № 3 (56). P. 141–144.

© Неверов А. Л., Бурюкин Ф. А., Жигарев В. А., 2018

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ ПОДВОДНОГО МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ С БИОНИЧЕСКИМ ДВИЖИТЕЛЕМ

А. О. Панаськов, Я. Е. Шумилина, В. А. Будьков

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

*Предложена система управления положением подводного мехатронного модуля с бионическим движителем с описанием работы микропроцессорной схемы.*

*Ключевые слова: микропроцессор, акселерометр, колеблющееся крыло.*

## THE CONTROL SYSTEM OF UNDERWATER POSITION MECHATRONIC MODULE WITH BIONIC ACTUATOR

A. O. Panas'kov, J. E. Shumylyna, V. A. Bud'kov

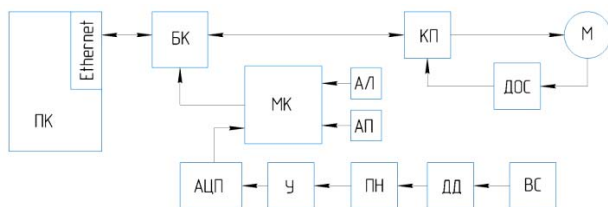
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: panaskov79@gmail.com

*The control system for the position of the underwater mechatronic module with a bionic propeller with a description of the operation of the microprocessor circuit is proposed.*

*Keywords: microprocessor, accelerometer, wavering wing.*

Колеблющееся крыло один из самых распространенных природных движителей. Большинство представителей животного мира, обитающих в водной среде, используют именно такой способ движения. Данный движитель позволяет достигать достаточно высоких скоростей движения при относительно малом расходе биологической энергии. Однако при работе такого крыла колебания передаются на корпус модуля, следовательно, на практике разработка механизмов с движителем типа колеблющегося крыла требует не только поиска новых технических решений, но и применения современных систем контроля положения технической конструкции в пространстве [1–5].

На рисунке представлена система управления подводным мехатронным модулем, с участием оператора, но с автономным контролем заданного положения.



Микропроцессорная схема системы управления положением подводного мехатронного модуля

Структура схемы системы управления состоит из следующих элементов: ПК – персонального компьютера; БК – бортовой контроллер; МК – микрокон-

троллер; АЛ – акселерометр левого борта; АП – акселерометр правого борта; ДД – датчик давления; ПН – преобразователь тока в напряжение; У – усилитель преобразователя тока в напряжение; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; КП – контроллер привода; М – бесколлекторный электрический двигатель; ДОС – датчик обратной связи; ВС – внешняя среда.

В качестве датчика давления выбран ПД100-ДГ1.6-137. Данная модель характеризуется возможностью работы внутри жидкости. Для связи сенсора с атмосферой в кабеле присутствует капилляр. Выходной сигнал датчика давления находится в диапазоне от 4 до 20 мА. Сигнал с датчика после преобразования и усиления оцифровывается с помощью сигма-дельта АЦП разрядностью 22 бит MCP-3551, разработанного компанией Microchip Technology Inc. Данный аналогово-цифровой преобразователь позволяет обеспечить высокую точность выходных данных, работая с первичными преобразователями. Интерфейсом подключения является SPI. В качестве 3-осевого акселерометра выбран H3LIS331DL, который служит для определения ускорения по 3-м направлениям. В качестве бортового контроллера выбран процессорный блок SK-A20-SODIMM. Ядром процессорного блока является высокопроизводительный процессор фирмы Allwinner A20 Dual (ARM Dual Cortex-A7 1000 МГц). Подключение микроконтроллера, сервоприводов, питания и Ethernet к процессорному блоку осуществляется через разъем SO-DIMM на 200 контактов.

В качестве сервопривода был выбран Robotis AX-12A. Контроллер привода позволяет получать текущую информацию о положении вала, температуре

двигателя, моменте нагрузки, напряжении. Все сервоприводы подключены к одной шине UART по протоколу Dynamixel 1.0.

Для обработки данных с акселерометров и датчика давления был выбран микроконтроллер Atmega8L, позволяющий выполнять 1 миллион инструкций в секунду, что позволяет с достаточно высокой скоростью получать точную и своевременную информацию с датчика давления и акселерометров.

Подводный мехатронный модуль движения подключается к персональному компьютеру через типовой интерфейс Ethernet, что позволяет передавать команды на бортовой компьютер и получать информацию о текущем состоянии подводного мехатронного модуля на расстоянии до 100 метров и обеспечивает скорость соединения до 1 Гб/с. Персональный компьютер в предлагаемой системе контроля положения подводного мехатронного модуля предназначен для задания оператором требуемых параметров и отправки команд на бортовой контроллер о требуемой скорости движения, ее векторе и глубине погружения. Микроконтроллер, считывая показания с акселерометров и датчика давления, передает их на бортовой контроллер, который сравнивает их с требуемой скоростью, её вектором и глубиной погружения, после чего вводит соответствующую корректировку в работу сервоприводов. От бортового контроллера подается команда на контроллер конкретного сервопривода о требуемой скорости его движения и угле положения выходного вала. Сигнал с контроллера сервопривода поступает на драйвер бесколлекторного двигателя постоянного тока. Изменяя свое положение, выходной вал изменяет сопротивление потенциометра (датчика обратной связи), тем самым контроллер сервопривода контролирует положение вала.

Данная система контроля положения подводного мехатронного модуля позволяет автономно поддерживать заданные оператором параметры движения, что позволяет повысить точность подводных работ и упростить работу оператора.

### Библиографические ссылки

1. Горелов Д. Двигатель типа машущего крыла // Прикладная механика и техническая физика. 2014. Т. 55, № 6. С. 120–126.
2. Крылов Д., Сидняев Н., Федотов А. Обтекание колеблющегося крыла потоком идеальной несжимаемой жидкости // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 2.
3. Голубев В. Исследования по теории машущего крыла // Труды по аэродинамике. М. ; Л. : Гостехтеориздат, 1957.
4. Прандтль Л. Гидромеханика. М. : Иностран. лит., 1951.
5. Коваль К., Сухоруков А., Чернышев И. Результаты верификации численного метода расчета гидродинамических и гидроакустических характеристик плавникового движителя.

### References

1. Gorelov D. Dvyzhytel' typu mashushhego kryyla // Pрыkladnaja mehanyka y tehnycheskaja fyzyka. 2014. Vol. 55, № 6. С. 120–126.
2. Kryylov D., Sydnjaev N., Fedotov A.. Obtekanie kolebljushhegosja kryyla potokom ydeal'noj neszhymaemoj zhydkosty. *Ynzhenernyy zhurnal: nauka y innovacyu*, 2013. Vol. 2.
3. Golubev V. Yssledovanyja po teoryy mashushhego kryyla // Trudy po aerodynamyke. М. ; L. : Gostheoryzdat, 1957.
4. Prandtl' L. Gydromehanyka. М. : Izd-vo ynostr. lyt., 1951.
5. Koval' K., Suhorukov A., Chernyyshev Y. Rezul'taty veryfykacy chyslennogo metoda rascheta gydrodynamycheskyh y gydroakustycheskyh harakterystyk plavnykovogo dvyzhytelja.

© Панаськов А. О., Шумилина Я. Е.,  
Будьков В. А., 2018



УДК 621.6.09:534.01

**ЖЕСТКОСТЬ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА РАБОЧИХ МАШИН**

А. В. Пронин, В. В. Раменский, Н. Ф. Янковская, Е. В. Раменская

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 жесткости рабочих машин на примере регламентных показателей станков для заточки круглых пил, на основе моделирования получены математические модели вариации упругих деформаций при анализе радиальной жесткости станков для заточки круглых и дисковых пил диаметром до 1 200 мм.*

*Ключевые слова: жесткость, деформация, станки, технология, моделирование, пила.*

**RIGIDITY IN THE PRODUCTION TECHNOLOGY OF WORKING MACHINES**

A. V. Pronin, V. V. Ramenskiy, N. F. Yankovskaya, E. V. Ramenskaya

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
 E-mail: nat-yan.1@yandex.ru

*The article presents the results of primary studies of the rigidity of working machines on the example of the regular indicators of machines for sharpening circular saws. Mathematical models of variation of elastic deformations in the analysis of radial stiffness of machines for sharpening circular and circular saws with a diameter of up to 1200 mm are obtained.*

*Keywords: rigidity, deformation, machines, technology, modeling, saw.*

Начавшееся движение за осуществление технологического прорыва в стране в свете новых законодательных актов вскрыл вопросы формирования так называемой жесткости машин. С начала работы над проектированием новых СТО анализируется модуль Юнга материала и жесткость стержней при сжатии и растяжении – параметр  $EF$ ; кручения  $GI$ . В производствах  $F$  – площадь сечения стержня,  $I$  – модуль жесткости стержня при кручении или полярный момент инерции. Точность работы и производительность рабочих машин в значительной степени зависит от их жесткости. Анализ жесткости станков в довоенный период начал инженер К. В. Вотинов, обнаруживший значительные отличия в упругих отжатиях суппорта токарного станка от его отдельных деталей. В действующих регламентах, жесткость станков определяется при статической нагрузке, прилагаемой к частям станка, несущим инструмент и заготовку и вызывающей изменения в их взаимном расположении.

Жесткость станка характеризуется величиной относительного перемещения инструмента и заготовки под действием силы и определяется по функции [1; 2]

$$j = P/y,$$

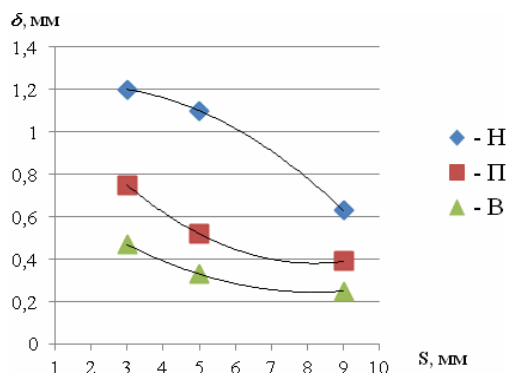
где  $P = (P_x^2 + P_y^2 + P_z^2)^{1/2}$  – сумма составляющих сил резания.

Перспективным является анализ динамической жесткости по функции [3–5]

$$J_d = A_p/A_{sv},$$

где  $A_p$  – амплитуда касательной силы резания, Н;  $A_{sv}$  – амплитуда виброперемещения, мм.

Характер изменения деформации заточного станка, оцененный отжатиями от действия силы приведен на рисунке.



Зависимость отжатия диска пилы от толщины

Физические модели кривых аппроксимации отражают деформации:

–  $\delta = -0,0113s^2 + 0,04s + 1,1812$  для станков класса точности Н с контрольным диском толщиной 3; 5; 9 мм, достоверность модели  $R^2 = 1$ ;

–  $\delta = 0,0138s^2 - 0,225s + 1,3013$  для станков класса точности П с контрольным диском толщиной 3; 5; 9 мм, достоверность модели  $R^2 = 1$ ;

–  $\delta = 0,0083s^2 - 0,1367s + 0,805$  для станков класса точности В с контрольным диском толщиной 3; 5; 9 мм, достоверность модели  $R^2 = 1$ .

Результаты работы показали:

- возможность управления жесткостью конструкций технологических машин, в частности станков для заточки круглых пил диаметром до 1 200 мм;
- в проектных решениях по освоению новой техники в области затачивания круглых пил параметры радиальной жесткости следует ужесточить более 20 %, а осевой жесткости до 35 % по сравнению с существующими конструкциями;
- возможность оценки динамической жесткости заточных станков по соотношению составляющей касательной силы резания к амплитуде виброперемещения шпинделя.

#### Библиографические ссылки

1. Филатов В. П. Жесткость зуборезных станков. М. : Машиностроение, 1969. 120 с.
2. ГОСТ 20404–88. Станки для заточки круглых пил. Нормы точности и жесткости.
3. Уотс Д., Старки Ж. Оптимизация амплитуд колебаний элементов конструкции вязким демпфированием // Современное машиностроение. Труды американского общества инженеров-механиков, ASME. 1990. № 12. С. 89–95.
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 Междунар. науч. конф. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. Ч. 1. С. 581–583.

#### References

1. Filatov V. P. Zhestkost' zuboreznyh stankov. M. : Mashinostroenie, 1969. 120 s.
2. GOST 20404–88. Stanki dlya zatochki kruglyh pil. Normy tochnosti i zhestkosti.
3. Uots D., Starki Zh. Optimizaciya amplitud kolebanij ehlementov konstrukcii vyazkim dempfirovaniem. Sovremennoe mashinostroenie : Trudy amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov, ASME. 1990. № 12. P. 89–95.
4. Ramenskaya E. V., Filippov Yu. A. Upravlenie vibracijей sredstv tekhnologicheskogo osnashcheniya Monografiya / Sib. gos. aehrokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2011. 172 p.
5. Filippov K. Yu., Yankovskaya N. F., Ramenskaya E. V. Ortogonal'naya ustojchivost' diskovyh pil. // Reshetnevskie chteniya : Materialy XX Mezhdunar. nauch. konf. Sib. gos. aehrokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2016. Ch. 1. Ph. 581–583.

© Пронин А. В., Раменский В. В., Янковская Н. Ф., Раменская Е. В., 2018

УДК 621.9

## ВЛИЯНИЕ ВЫЛЕТА ИНСТРУМЕНТА И ВЫБОРА СТРАТЕГИИ НА ПОГРЕШНОСТЬ ОБРАБОТКИ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ

А. Ю. Пушкарев, А. В. Вайлов, Н. А. Амельченко, Е. В. Раменская

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

*Исследовано влияние вылета инструмента и выбора стратегии на погрешность обработки при фрезеровании глубоких уступов при изготовлении деталей из алюминиевых сплавов. Показано, что недостаточная жесткость инструмента при обработке вызывает отжим режущей кромки от обрабатываемой поверхности и способствует появлению погрешности обработки и изменению шероховатости.*

*Ключевые слова:* вылет инструмента, фрезерование, погрешность обработки, жесткость инструмента, стратегия обработки.

## THE INFLUENCE OF THE TOOL OF THE INSTRUMENT AND THE SELECTION OF THE STRATEGY FOR MILLING PROCESSING MILLING

A. Y. Pushkarev, A. V. Vaylov, N. A. Amelchenko, E. V. Ramenskaya

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

*The effect of tool removal and strategy selection on the error of machining during milling of deep ledges in the manufacture of aluminum alloy parts is investigated. It is shown that insufficient rigidity of the tool during machining causes the cutting edge to be pressed away from the treated surface and contributes to the appearance of the processing error and to the change in the roughness.*

*Keywords:* tool removal, milling, processing error, tool rigidity, processing strategy.

Совершенствование технологии и методов фрезерования существенно влияет на точность и качество при изготовлении изделий ракетно-космической техники. Применение современного технологического оборудования с ЧПУ позволяет управлять процессом и значительно повысить эффективность и точность обработки.

Однако особую сложность представляет собой фрезерование заготовок из различных конструктивных материалов, зачастую имеющих различные конструктивные элементы, например, внутренние пазы, выемки, карманы, фаски и тонкие стенки. Для качественной чистовой обработки подобных изделий возникает необходимость применения инструмента с большим вылетом режущей части, который, по причине недостаточной жесткости, может деформироваться в процессе работы и способствовать появлению вибраций [1]. Кроме того, одним из основных вопросов при обработке стенок, имеющих достаточно большую высоту, является наиболее оптимальный выбор стратегии обработки.

Существуют различные виды обработки фрезами, однако наиболее часто применяемыми являются методы фрезерования наружных контуров с врезанием по касательной при неизменной глубине, метод с врезанием по спирали с различными углами наклона фрезы, трохoidalное фрезерование и другие варианты [2].

Обычно для повышения точности процесс фрезерования разделяется на два этапа: черновой – контур обрабатывается послойно с небольшим припуском, чистовой – оставшийся припуск удаляется за один проход фрезы по всей высоте конструктивного элемента.

Для оценки влияния жесткости инструмента при одной и той же длине вылета на погрешность обработки и выбора стратегии обработки наружных стенок был проведен эксперимент на фрезерном станке с ЧПУ DMG 635 ecoline.

Заготовка из алюминиевого сплава АМг6 устанавливалась и закреплялась в тисках. Для привязки детали к системе координат станка использовали механический щуп и систему Renishaw. При обработке контура применяли цилиндрическую фрезу из твердого сплава Ø20 мм (ZCC-CT AL-4EL – D20) [3]. Вылет инструмента установили  $L = 70$  мм. Глубина обработки составляла 60 мм. Основной припуск снимали при черновой обработке, для чистового прохода припуск на сторону составлял 0,05 мм.

Режимы резания устанавливали с учетом принятых рекомендаций [4]. Для данного типа инструментов назначали следующие режимы обработки: при черновых проходах частота вращения шпинделя составляла  $n = 4000$  об/мин, значения подачи  $s_m = 2000$  мм/мин.

## Результаты эксперимента

№ маршрута	Верхнее значение контура, $h_1$ , мм	Нижнее значение контура, $h_2$ , мм	Разница, $\Delta h_1$ , мм	Верхнее значение контура, $h_3$ , мм	Нижнее значение контура, $h_4$ , мм	Разница, $\Delta h_2$ , мм	Шероховатость Ra, мкм
1	49,999	50,051	0,052	65,002	65,047	0,045	0,704
2	49,010	49,042	0,032	64,014	66,045	0,031	0,655
3	47,994	48,001	0,007	62,997	63,005	0,008	0,221
4	46,999	47,028	0,029	61,996	62,026	0,030	0,411
5	45,999	46,026	0,027	60,996	61,022	0,026	0,145
6	44,997	45,036	0,039	59,994	60,035	0,041	0,398
7	44,003	44,040	0,037	58,996	59,023	0,027	0,088
8	43,010	43,040	0,030	58,006	58,040	0,034	0,127

Для чистового фрезерования частоту вращения шпинделя оставили при тех же значениях –  $n = 4000$  об/мин., величину подачи уменьшили до  $s_m = 600$  мм/мин. Глубина резания при черновых и чистовых проходах составляла 5 мм.

Результаты эксперимента приведены в таблице:

\*1 – фрезерование без чистового прохода, методом последовательного ступенчатого врезания;

\*2 – фрезерование без чистового прохода, с врезанием по спирали с углом наклона  $3^\circ$ ;

\*3 – фрезерованием с одним чистовым проходом, методом последовательного ступенчатого врезания;

\*4 – фрезерование с одним чистовым проходом, с врезанием по спирали с углом наклона  $3^\circ$ ;

\*5 – фрезерование с двумя чистовыми проходами, методом последовательного ступенчатого врезания, для чистовых проходов с глубиной резания 20 мм, чистовой проход повторяется 3 раза по одним и тем же координатам на всех трех высотах;

\*6 – фрезерование с двумя чистовыми проходами, с врезанием по спирали, на чистовые проходы угол наклона  $0,8^\circ$ ;

\*7 – фрезерование с двумя чистовыми проходами, методом последовательного ступенчатого врезания с двумя чистовыми проходами. Второй чистовой проход выполнялся на всю высоту стенки;

\*8 – фрезерование с двумя чистовыми проходами, методом последовательного ступенчатого врезания с двумя чистовыми проходами. Второй чистовой проход осуществляется на всю глубину обработки и повторяется 3 раза по одним и тем же координатам.

Анализируя полученные результаты, можно заключить, что деформация инструмента во время обработки под влиянием сил резания приводит к изменению положения режущей кромки относительно обрабатываемой детали, т. е. происходит отжим инструмента. В результате этого размеры обрабатываемой детали изменяются, появляются отклонения от правильной геометрической формы.

Таким образом, на основании проведенных экспериментов, можно сделать следующие выводы:

– стремление к увеличению вылета инструмента при фрезеровании уступов всей длиной режущей части инструмента с целью повышения производительности, как правило, приводит к образованию погрешности обработки, связанной с недостаточной жесткостью инструмента и способствует появлению откло-

нений геометрической формы и размеров, что увеличивает вероятность появления брака;

– при выборе стратегии контурной обработки больших уступов для уменьшения погрешности следует применять последовательное ступенчатое врезание, при этом глубину резания необходимо уменьшать по мере увеличения вылета инструмента;

– с целью повышения производительности обработки при фрезеровании на больших скоростях следует выбирать инструмент большего диаметра, однако ограничения могут возникнуть из-за формы конструктивного элемента.

## Библиографические ссылки

1. Стратегии и методы обработки, применяемые при фрезеровании [Электронный ресурс]. URL: <http://masters.donntu.org/2014/fimm/nikolaenko/library/article2.pdf> (дата обращения: 01.08.2018).

2. Фрезерование: основные стратегии фрезерования при обработке пресс-форм [Электронный ресурс]. URL: <http://tverdysplav.ru/frezovanie-osnovnye-strategii/> (дата обращения: 29.07.2018).

3. Универсальные фрезы Sandvik Coromill 390 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mirstan.ru/novosti/universalnye-frezy-coromill-390/> (дата обращения: 21.07.2018).

4. Справочник по обработке резанием Garant [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hoffmann-group.com/RU/en/horu/company/garant> (дата обращения: 31.07.2018).

## References

1. Strategies and processing methods used in milling. Available at: <http://masters.donntu.org/2014/fimm/nikolaenko/library/article2.pdf> (accessed: 01.08.2018).

2. Milling: the basic milling strategies for the processing of molds. Available at: <http://tverdysplav.ru/frezovanie-osnovnye-strategii/> (accessed: 29.07.2018).

3. Universal milling cutters Sandvik Coromill 390. Available at: <http://www.mirstan.ru/novosti/universalnye-frezy-coromill-390/> (accessed: 21.07.2018).

4. Handbook of cutting Garant. Available at: <https://www.hoffmann-group.com/RU/en/horu/company/garant> (accessed: 31.07.2018).

© Пушкарев А. Ю., Вайлов А. В., Амельченко Н. А., Раменская Е. В., 2018

УДК 621.78

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМООБРАБОТКИ

Е. В. Рублевская\*, А. В. Щербакова

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

\*E-mail: khaterine@yandex.ru

*Рассмотрены перспективы внедрения мехатронных систем для роботизации процессов термообработки. Исследовано влияние роботизации процессов термообработки на трудоемкость, производительность и другие параметры.*

*Ключевые слова: механизация, термообработка, роботизация, мехатронные системы, промышленные роботы, производительность.*

## USE OF MECHATRONIC SYSTEMS IN THE THERMAL TREATMENT PROCESS

E. V. Rublevskaya\*, A. V. Scherbakova

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

\*E-mail: khaterine@yandex.ru

*The article examines the perspectives of mechatronic systems installation for robotic automation of thermal treatment process. The article also explores how mechanization of thermal treatment process influences on working time, productivity and other characteristics.*

*Keywords: mechanization, thermal treatment process, robotic automation, mechatronic systems, industrial robots, productivity.*

Роботизация технологических процессов, качественно преобразующих продукцию, характеризуется использованием разнообразного и сложного дополнительного оборудования – ПР и периферийных устройств [1].

Большая часть мирового парка ПР задействована в машиностроительных технологических процессах, что позволяет оценивать эти процессы как наиболее роботизированные. Такое положение объясняется, с одной стороны, стремлением к получению качественной и дешевой продукции при высокой производительности, с другой – рядом присущих отрасли машиностроения объективных факторов – стационарностью условий протекания технологических процессов, их определенной стабильностью, особенностями современного автоматизированного технологического оборудования, обеспечивающего удобную стыковку с ПР, возможностью изготовления вспомогательных устройств для роботизации цехами самого предприятия [1]. Также, причиной интенсивной роботизации процессов в машиностроении являются социальные аспекты, связанные с необходимостью высвобождения человека из производств с тяжелыми, вредными и опасными для здоровья, а также монотонными условиями работы.

Термообработка и химико-термическая обработка являются идеальными технологиями для роботизации, причем достаточно использование сравнительно простых конструкций роботов с позиционным управлением [2]. Роботизация процессов термической обра-

ботки повышает производительность труда, облегчает труд рабочих и обеспечивает точное выполнение температурных режимов [3].

Термообработка производится в печах и закалочных агрегатах, основными средствами роботизации этого оборудования являются конвейеры, толкатели, шнеки и другие устройства для загрузки и выгрузки деталей и их перемещения. В термических цехах широко используют роботизацию не только для операций непосредственной термической обработки, но и последующих операций – очистки деталей от окалин, промывки, правки под прессом и т. д. [4].

Стоимость термической обработки составляет всего несколько процентов от стоимости изделия, но, несмотря на это, она значительно влияет на его качество. Кроме того, данные процессы характеризуются высокими температурами, поэтому замена человека роботом является особенно важным аспектом. Также, необходимо учесть, что роботизация улучшает условия охраны труда и повышает общую культуру производства. Это определяет необходимость внедрения роботизации в любом производстве, в частности, в процессе термообработки.

Опыт, накопленный промышленными предприятиями, показал, что применение поточных автоматических линий для термической обработки в 2–3 раза сокращает трудоемкость и в 3–5 раз снижает длительность производственного цикла, в 5–10 раз сокращает потребность в рабочей силе и в 1,5–2 раза уменьшает необходимые производственные площади [3].

В России уже действуют предприятия, которые изначально ориентированы на совместный труд роботов и людей. По словам представителей роботизированных компаний, использование роботов в промышленности меняет очень многое, вплоть до уничтожения базовых экономических понятий – производительность труда, эффект масштаба, выработка на одного сотрудника, и других [5]. Российский рынок роботизированных технологий пока находится на начальной стадии развития. В ближайшее время спрос на ПР будет целиком и полностью зависеть от интереса, проявленного к ним владельцами предприятий. По мере увеличения спроса, роботизация нашей промышленности станет необратимым процессом. Преимущества от перехода на роботизированные технологии неизбежно выведут многие наши предприятия на новый технологический уровень, повысят качество выпускаемой ими продукции, производительность и гибкость производственных процессов.

#### Библиографические ссылки

1. Основы робототехники [Электронный ресурс]. URL: <http://bibliotekar.ru/7-robot/72.htm> (дата обращения: 03.09.2018).
2. Основы робототехники и роботизации промышленного производства [Электронный ресурс]. URL: [http://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/15690/2017\\_244\\_shumilovev.pdf?sequence=1](http://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/15690/2017_244_shumilovev.pdf?sequence=1) (дата обращения: 01.09.2018).
3. Механизация и автоматизация процессов термической обработки [Электронный ресурс]. URL: <http://delta-grup.ru/bibliot/100/78.htm> (дата обращения: 09.09.2018).
4. Механизация в термических цехах [Электронный ресурс]. URL: <http://tehna.net.ua/mehanizatsiya-v-termicheskikh-tsehah/> (дата обращения: 07.09.2018).
5. РБК [Электронный ресурс]. URL: [https://www.rbc.ru/spb\\_sz/21/12/2017/5a3b6ee39a7947587cf80339](https://www.rbc.ru/spb_sz/21/12/2017/5a3b6ee39a7947587cf80339) (дата обращения: 06.09.2018).

#### References

1. Mechanization and automatization of thermal treatment processes. Available at: <http://delta-grup.ru/bibliot/100/78.htm> (accessed: 09.09.2018).
2. Mechanization in heat-treatment shops. Available at: <http://tehna.net.ua/mehanizatsiya-v-termicheskikh-tsehah/> (accessed: 07.09.2018).
3. Basics of robotics. Available at: <http://bibliotekar.ru/7-robot/72.htm> (accessed: 03.09.2018).
4. Basics of robotics and robot automatization of industrial production. Available at: [http://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/15690/2017\\_244\\_shumilovev.pdf?sequence=1](http://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/15690/2017_244_shumilovev.pdf?sequence=1) (accessed: 01.09.2018).
5. RBC. Available at: [https://www.rbc.ru/spb\\_sz/21/12/2017/5a3b6ee39a7947587cf80339](https://www.rbc.ru/spb_sz/21/12/2017/5a3b6ee39a7947587cf80339) (accessed: 06.09.2018).

© Рублевская Е. В., Щербакова А. В., 2018

УДК 621.81.004

## МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ РОТАЦИОННОМ ТОЧЕНИИ ГЛОБОИДНОЙ ВИНТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ

О. А. Суханова, А. В. Сутягин, Л. С. Малько, 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 метод и блок-схема оборудования и аппаратуры для измерения составляющей силы резания при ротационном точении глобоидной винтовой поверхности.*

*Ключевые слова: ротационное точение, силы резания, тензометрический датчик, измерительная система.*

## METROLOGICAL SUPPORT OF MEASUREMENT OF CUTTING FORCE IN ROTARY TURNING GLOBOID SPIRAL SURFACE

O. A. Sukhanova, A. V. Sutyagin, L. S. Malko, 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 method and block diagram of the equipment and equipment for measuring the component of the cutting force at the rotational turning of the global screw surface is presented.*

*Keywords: rotational turning, cutting forces, strain gauge, measuring system.*

Измерение силы резания  $P_z$  при ротационном точении (РТ) глобоидной винтовой [1; 2] поверхности может осуществляться при помощи металлорежущего оборудования и измерительной системы, в которую входят зуборезный станок модели 5К38, первичный преобразователь (тензорезистор, собранный по мостовой схеме), динамометрическая установка и контрольно-измерительное оборудование (измерительный модуль ZET 7010 Tensometer-485, преобразователь интерфейсов ZET 7070, персональный компьютер (см. рисунок)).

Первичный преобразователь устанавливается на столе зубофрезного станка, на котором центрируют и крепят корпус динамометра с первичным преобразователем 1.

В процессе обработки РТ сила резания деформирует упругий элемент динамометра и вызывает упругую деформацию балочки с наклеенными на ее поверхности тензодатчиками.

От тензодатчиков сигнал поступает к измерительному модулю ZET 7010 (2), Tensometer-485 и преобразователю интерфейсов ZET 7070 (3), где усиливается, преобразуется и передается на персональный компьютер (4), с программным обеспечением из набора ZETLAB.

Используемая аппаратура для измерения силы резания является стандартной.

Динамометрическая система является специальным устройством блок-схема (см. рисунок).

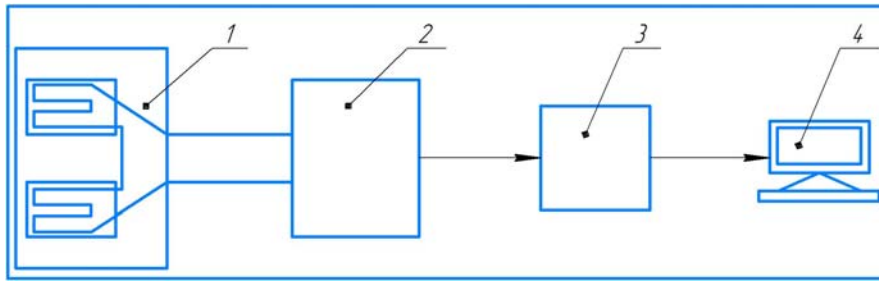
Тензометрические датчики, например, тензорезисторы, представляют собой устройства, преобразующие измеряемую упругую деформацию твердого тела

в электрический сигнал, за счет изменения сопротивления проводника датчика при изменении его геометрических размеров от растяжения или сжатия.

Суммарная погрешность всей измерительной системы не должна превышать 10 % от измеряемой величины. Установление погрешности производится при помощи калибровки системы по программе «Тензометр». Для этого используются следующие параметры: измерительный канал, к которому подключен датчик силы или тензорезистор; опорный канал, показания которого используются при относительных измерениях; единица измерения – любая единица, выбираемая пользователем, тип измерения – абсолютные или относительные, с использованием генератора постоянного или переменного тока; файл калибровки – файл, содержащий данные о калибровочных параметрах измерителя.

При калибровке вводятся коэффициенты соответствия измеряемого параметра значениям, отображаемым в окна программы. При помощи многократной калибровки устанавливаются тарировочная функция системы для того, чтобы выполнить перевод сигналов, получаемых с преобразователя интерфейса ZET 7070 в милливольты в общепринятые единицы, например, ньютоны или килограммы.

Количество точек калибровки может быть до 15. Использование предложенной измерительной системы позволяет повысить точность и достоверность измерений силы резания при ротационном точении деталей машин принудительно вращаемым инструментом и уточнить расчет технологических режимов РТ [3].



Блок-схема контрольно-измерительного оборудования для измерения составляющих силы резания:  
 1 – первичный преобразователь (динамометрическая установка); 2 – измерительный модуль ZET 7010 Tensometer-485; 3 – преобразователь интерфейсов ZET 7070; 4 – персональный компьютер с программным обеспечением из набора ZETLAB

### Библиографические ссылки

1. Сутягин А. В., Малько Л. С., Трифанов И. В. Влияние технологических режимов на выходные параметры процесса ротационного точения винтовой поверхности глобоидного червяка // *Фундаментальные исследования*. 2016. Ч. 1. С. 99–103.
2. Трифанов И. В., Малько Л. С., Сутягин А. В. Технология нарезания глобоидных и цилиндрических винтовых поверхностей вогнутого профиля деталей машин : монография / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2017. 110 с.
3. Расчет параметров процесса и составляющих сил резания при ротационном точении винтовой поверхности принудительно вращаемым многолезвийным инструментом на основе учета теплового потока, физических и геометрических параметров стружки / А. В. Сутягин, И. В. Трифанов, Л. С. Малько и др. // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 10, ч. 10. С. 2162–2168.

### References

1. Sutyagin A. V., Mal'ko L. S., Trifanov I. V. [Effect of technological regimes on the output parameters of the rotational turning process of the screw surface of the globoid worm]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2016. Vol. 1. P. 99–103.
2. Trifanov I. V., Mal'ko L. S., Sutyagin A. V. [Technology cutting globoid and cylindrical spiral surfaces concave profile of machine parts]. *SibGU im. M. F. Reshetneva*, Krasnoyarsk, 2017. 110 p.
3. Sutyagin A. V., Trifanov I. V., Mal'ko L. S. [Calculation of parameters of the process and components of forces of cutting with a rotary turning helical surface is forcibly rotated multiblade tool on the basis of heat flow, physical and geometrical parameters of the chip]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2013. No. 10, ch. 10. P. 2162–2168.

© Суханова О. А., Сутягин А. В., Малько Л. С., Трифанов И. В., 2018



## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА

В. И. Трифанов, Л. И. Оборина, А. С. Квитунов, 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

*Рассмотрены факторы, влияющие на процесс сжигания топлива. На основе выполненного теоретического анализа даны рекомендации по повышению эффективности сжигания топлива и управления газодинамическими процессами.*

*Ключевые слова: тепловой и химико-кинетический факторы, ионы-радикалы, процесс сжигания топлива.*

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF FUEL COMBUSTION

V. I. Trifanov, L. I. Oborina, A. S. Kvitunov, 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 factors influencing the process of fuel combustion are considered. On the basis of the theoretical analysis recommendations for improving the efficiency of fuel combustion and control of gas-dynamic processes are given.*

*Keywords: thermal and chemical-kinetic factors, radical ions, fuel combustion process.*

Для развития современной техники важным является эффективное сжигание топлива, управление газодинамическими процессами и режимами горения.

Известно, что управление процессами горения может иметь химический и не химический характер, в зависимости от факторов, влияющих на механизм протекающих реакций.

На процесс воспламенения и горения топлива оказывают влияние два фактора: тепловой и химико-кинетический, т. е. лавинообразное размножение активных промежуточных продуктов – свободных атомов и радикалов в периодически повторяющихся реакциях, образующих реакционные цепи [1]. Тепловой фактор реализуется, если тепловыделение от химических реакций превалирует над теплоотводом, при этом с повышением температуры тепловыделение ускоряется больше теплоотвода. Закономерности процесса горения всегда обуславливаются принципиальным различием цепного и теплового факторов. В серии работ [1; 2] показано, что при любом давлении саморазогрев становится существенным только после цепного воспламенения за счет развития цепного горения, при котором усиливается цепная лавина. Без реализации лавинного размножения свободных атомов и радикалов в их цепных реакциях не происходит ни воспламенения, ни горения. Скорость разветвлено-цепного процесса определяется выражением:

$$W = -d[B]/dt = \omega_0 + K_p n[B], \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $n$  и  $[B]$  – концентрация носителей реакционных цепей и исходного реагента соответственно;  $\omega_0$  – скорость зарождения цепей, т. е. образование носителей реакционных цепей в реакциях только ис-

ходных молекул;  $K_p$  – эффективная константа скорости лимитирующей стадии, обычно разветвления.

Наряду с реакцией и размножением носителей реакционных цепей происходят реакции их гибели, т. е. активные частицы рекомбинируют или адсорбируются [1; 2].

Изменение концентрации носителей реакционных цепей во времени [1–3] может быть представлено уравнением

$$dn/dt = \omega_0 + (f - q)n, \quad (2)$$

где  $\omega_0$  – скорость зарождения цепей;  $f$  и  $q$  – скорости разветвления и обрыва цепи при единичной концентрации носителей реакционных цепей ( $n$ ), равные:

$$f = 2K_p [B], \quad (3)$$

$$q = K_{reT} + K_{roM} [B] \cdot [M], \quad (4)$$

где  $[M]$  – концентрация газовой смеси;  $K_{reT}$  и  $K_{roM}$  – эффективные величины констант скоростей гетерогенного и тримолекулярного обрыва.

Условием цепного воспламенения, при котором происходит лавинное размножение носителей реакционных цепей, является [4]

$$f \geq q. \quad (5)$$

Знак равенства определяет условие перехода в режим горения.

Для повышения эффективности горения необходимо: повышать концентрацию носителей реакционных цепей в момент времени  $t_0$ , после которого не существенна роль реакции исходных молекулярных компонентов между собой. Для повышения эффективности сжигания топлива рекомендуется первоначально концентрацию носителей реакционных цепей

создавать стимулированным разрушением молекул метастабильных промежуточных продуктов неполного сгорания топлива в предварительной камере сгорания, путем воздействия электронным ударом на продукты сгорания топлива в электронно-циклотронном резонансном режиме, с разделением ионов и электронов в поперечном магнитном поле.

Образовавшиеся активные ионы-радикалы и атомы промежуточных продуктов сгорания затем подаются в детонационную камеру сгорания [5–7] под действием давления и ускоряющего импульсного электрического поля. Таким образом, можно создавать лавину активных продуктов сгорания топлива в детонационной камере сгорания.

В детонационной камере сгорания за счет внешних носителей реакционных цепей  $n$  повысится объемная скорость зарождения цепей  $\omega_v$ , а также скорости разветвления цепей  $f_v$  в процессе горения. Процесс сжигания топлива в детонационной камере сгорания при воздействии лавинообразного энергетического потока целесообразно поддерживать СВЧ-облучением с образованными стримерными разрядами в резонансном режиме [7], что позволит уменьшить скорость обрыва цепей  $g$ , обеспечить требуемую энергию активации разветвления цепей  $E_p$ , повысить скорость разветвления цепей  $f_v$  и объемное сгорание топлива.

Для рациональной организации процессов в предварительной и детонационной камерах сгорания потребуется обеспечить соответствующую концентрацию и соотношение исходных компонентов [В], а также концентрацию носителей реакционных цепей  $n$ .

Управления режимами сгорания топлива может быть обеспечено путем регулирования электрических параметров процесса, расхода и концентрации компонентов топлива, давление в камере сгорания, а также стабилизации теплового и кинетического механизмов. Повышение эффективности сжигания топлива может быть также обеспечено конфигурацией камеры сгорания, соответствующим механизмом образования детонационных волн, воздействием резонансным электрическим полем на повышение скорости горения и другими факторами, способствующими развитию кинетических режимов разветвлено-цепных взрывов детонацией газов.

#### Библиографические ссылки

1. Азатын В. В., Тимербулатов Т. Р., Шатилов С. В. Эффективные химические методы управления горением, взрывом и детонацией газов // Вестник Научно-го центра. 2012. № 2. С. 1–9.
2. Семенов Н. Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. М. : Изд-во АН СССР, 1958. 686 с.

3. Азатын В. В. Нелинейные реакции активных центров цепей и различные кинетические режимы разветвлено-цепных процессов // Кинетика и катализ. 1977. Т. 18, № 5. С. 1098–1109.

4. Азатын В. В., Андрианова З. С., Иванова А. Н. Роль цепной лавины в развившемся горении смесей водорода с кислородом и воздухом при атмосферном давлении // Журн. физ. химии. 2006. Т. 80, № 7. С. 1194–1199.

5. Пат. 2635951 Российская Федерация, МПК F03H 1/00 (2006.01). Способ создания электрореактивной тяги / Трифанов И. В., Казьмин Б. Н., Оборина Л. И. № 2016116135 ; заявл. 25.04.2016 ; опубл. 17.11.2017, Бюл. № 32, 8 с.

6. Пат. 2633075 Российская Федерация, МПК F03H 99/00 (2009.01). Способ создания электрореактивной тяги / Трифанов И. В., Казьмин Б. Н., Трифанов В. И., Оборина Л. И. № 2016117685 ; заявл. от 04.05.2016 ; опубл. 11.10.2017. Бюл. № 29, 9 с.

7. Заявка на патент № 2017136934. Способ сжигания углеводородного топлива и устройство для его реализации / Трифанов И. В. от 19.10.2017 ; опубл. 17.04.2018. Бюл. № 11.

#### References

1. Azatyan V. V., Timerbulatov T. R., Shatirov S. V. [Effective chemical methods of control of combustion, explosion and detonation of gases] *Vestnik Nauchnogo tsentra*. 2012. № 2. P. 1–9.
2. Semenov N. N. [About some problems of chemical kinetics and reactivity]. *Moscow: from the USSR Academy of Sciences*, 1958. 686 p.
3. Azatyan V. V. [Nonlinear response of the active sites of chains and different kinetic regimes of the branching-chain processes] *Kinetika i kataliz*. 1977. Vol. 18, No. 5. P. 1098–1109.
4. Azatyan V. V., Andrianova Z. S., Ivanova A. N. [The role of a chain avalanche in the developed combustion of mixtures of hydrogen with oxygen and air at atmospheric pressure]. *Zhurn. fiz. khimii*. 2006. T. 80, № 7. P. 1194–1199.
5. Trifanov I. V., Kaz'min B. N., Oborina L. I. *Sposob sozdaniya elektroreaktivnoy tyagi* [The way to create thrust electrojet]. Patent RF, No. 2635951, 2017.
6. Trifanov I. V., Kaz'min B.N., Trifanov V. I., Oborina L. I. *Sposob sozdaniya elektroreaktivnoy tyagi* [The way to create thrust electrojet]. Patent RF. No. 2633075, 2017.
7. Trifanov I. V. *Sposob szhiganiya uglevodorodnogo topliva i ustroystvo dlya ego realizatsii* [Method of combustion of hydrocarbon fuel and device for its implementation]. Patent application. No. 2017136934, 2018.

© Трифанов В. И., Оборина Л. И., Квитунов А. С., Трифанов И. В., 2018

УДК 621.7.09

**МЕТОД КОНСТРУИРОВАНИЯ ДИСКОВЫХ ПИЛ С ВНУТРЕННЕЙ РЕЖУЩЕЙ КРОМКОЙ**

К. Ю. Филиппов, В. В. Раменский, В. И. Бокова, Ю. А. Филиппов, Е. В. Раменская\*

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

*Приведены результаты разработок технологии раскроя стальных труб кольцевой пилой оригинальной конструкции, обеспечивающей «технологический прорыв» в заготовительном переделе машиностроительного производства; производительность раскроя более чем в 10 раз превышает существующую технологию. Впервые получена функция для определения переменного парного шага зубьев с учетом их числа на дюйм (TPI).*

*Ключевые слова: технология, кольцевая пила, тонкостенные трубы, математическая модель, напряжения.*

**METHOD OF DESIGN ANNULAR SAW WITH INTERNAL CUTTING EDGE**

K. Yu. Filippov, V. V. Ramensky, V. I. Bokova, Yu. A. Filippov, E. V. Ramenskaya\*

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

\*E-mail: lena@kraslan.ru

*Results of development of technology of cutting of steel pipes by an annular saw of an original design are given. This will provide a “technological breakthrough” in the procurement redistribution of machine-building production. Cutting capacity is more than 10 times higher than the existing technology. For the first time the function for determination of variable pair step of teeth taking into account their number per inch (TPI) is received.*

*Keywords: technology, annular saw, thin-walled pipes, mathematical model, stresses*

Во исполнение послания Президента РФ Федеральному собранию и последующего Указа заметно выросли скорости технологических изменений в производстве ракетно-космической техники, особенно при освоении новых изделий. Создаются новые принципы развития в машиностроении в форме «технологической долины» с глубокой переработкой сырья, первые шаги в этом направлении в городе делает «Русал».

Отставание в технологических переделах современного производства наблюдается в заготовительном модуле, вследствие использования неэффективных технологических процессов. Особое внимание обращает на себя технология раскроя и резки круглой пилой в операциях заготовительного производства. Здесь в отдельных операциях раскроя можно значительно увеличить производительность за счет создания новых средств производства с технологией резки труб кольцевой пилой с внутренними режущими зубьями. При такой мерной резке тонкостенных труб вместо прохождения режущим инструментом пути равного диаметру трубы, ход резания составит только толщину трубы.

Проработана конструкция пилы и устройства, обеспечивающая выполнение такой операции раскроя труб [1]. На изобретение круглой пилы претендуют: англичанин Самуил Миллер, получивший патент в 1777 году на лесопильную ветряную мельницу; немец Гервинус, изготовивший в 1780 году пилу; англичанин Уолтер Тейлор в 1762 г. применил механизмы с циркульной пилой, но последнее не запатентовал.

Сохранились описания о том, что древние египтяне, а потом и римляне, первыми начали использовать сверхточные и прочные пилы, которые изготавливались из меди, а в качестве зубцов снабжались гранеными алмазами. Именно такими пилами пользовались мастера, которые изготавливали саркофаги для знатных лиц Египта, поскольку точность запила такого инструмента позволяла делать очень качественные изделия. Кафедра ТМС имеет патент на изобретение дисковой пилы RU 2624924C2, выданный 11.07.2017 г.

По принципу Д'Аламбера, учитывая инерционные нагрузки, распределенные по объему, как составляющие внешних сил при элементарном объеме  $s \cdot r \cdot d\varphi dr$ , инерционная сила в пиле равна произведению массы  $(\gamma/g) \cdot s \cdot r \cdot d\varphi \cdot dr$  на нормальное ускорение  $\omega^2 r$  описывается функцией [2; 3]

$$dP = (\gamma \cdot s/g) \cdot \omega^2 \cdot r^2 \cdot d\varphi dr, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – удельный вес материала пилы.

При наличии отверстия для базирования и резки трубы, кольцевая пила с внутренним радиусом  $a$  и внешним  $b$  испытывает напряжения, описываемые целевыми уравнениями [4]:

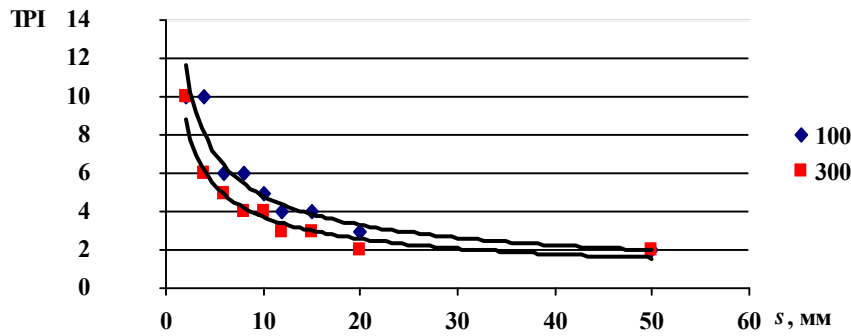
– радиальное

$$\sigma_r = (\gamma \omega^2 / 8g) \cdot (3 + \mu) \cdot [b^2 + a^2 - (b^2 a^2 / r^2) - r^2], \quad (2)$$

– окружное нормальное

$$\sigma_t = (\gamma \omega^2 / 8g) \cdot (3 + \mu) \times [b^2 + a^2 - (b^2 a^2 / r^2) - (1 + 3\mu) \cdot r^2 / (3 + \mu)], \quad (3)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $r$  – координатная характеристика.



Зависимость числа зубьев на дюйм от толщины пилы

По расчетному значению шага назначают парное число зубьев на дюйм (TPI) из типового ряда: 10/14; 8/12; 6/10; 5/8; 4/6; 3/4; 2/3.

Получены графические модели (см. рисунок) и физические уравнения, описывающие характер изменения параметра TPI от толщины пил:

–  $TPI = 17,126 \cdot s^{-0,550}$  с коэффициентом сходимости  $R^2 = 0,952$  для пил диаметром 100 мм;

–  $TPI = 12,809 \cdot s^{-0,535}$  с коэффициентом  $R^2 = 0,927$  для пил 300 мм.

Контурные углы кольцевой пилы формируются по типовым регламентам в зависимости от марки обрабатываемого материала и режимов резания. Соотношения сочетания зубьев по окружности пилы влияет на уровень вибрации [5].

Ход рабочего движения пилы по новой технологии рассчитывают по формуле  $u = S_{тр}$ ; типовой  $u = 1,06 \cdot D_{тр}$ . Следовательно, соотношение врезного пути и времени составляет  $D/S_{тр} > 10$ , что свидетельствует о возможности технологического прорыва в операции раскрытия труб.

Научная значимость работы заключается в разработке уравнений для расчета и анализа линейных параметров кольцевой пилы с внутренними зубьями.

Таким образом, в результате исследования:

– подтверждена гипотеза о возможности существенного повышения эффективности резки стальных труб кольцевыми пилами с внутренними режущими зубьями;

– разработана усовершенствованная технология резки мерных труб кольцевой пилой, обеспечивающая снижение машинного времени на разрезания труб более 10 раз;

– предложены уточненные соотношения числа зубьев на дюйм для расчета конструкции кольцевой пилы;

– оснащение зубьев кольцевой пилы быстрорежущей сталью обеспечивает стойкость до 100 час непрерывной работы.

#### Библиографические ссылки

1. 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. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 581–583.

2. Феодосьев В. И. Сопrotивление материалов. М. : Наука, 1979. 560 с.

3. Давиденков Н. Н. Избранные труды. В 2 т. Т. 2. Механические свойства материалов и методы измерения деформаций. Киев : Наук. думка, 1981. 656 с.

4. Фрейденштейн Ф., Мейси Ж. П., Мейки Е. Р. Оптимальное одновременное уравнивание вертикального и горизонтального моментов в быстрходных машинах // Конструирование и технология машиностроения : тр. американ. об-ва инженеров-механиков, ASME. 1981. Т. 103, №3. С. 9–15.

5. Раменская Е. В., Филиппов Ю. А. Механизм генерирования и распространения вибрации в технологических машинах // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 1 (41). С. 132–138.

#### References

1. Filippov K. Ju., Jankovskaja N. F., Ramenskaja E. V. [Orthogonal stability of circular saws] *Reshetnevskie chtenija: materialy XX Jubilejnoy mezhdunar. nauch. konf. (9–12 nojabrja 2016, g. Krasnojarsk): v 2 ch. / Sib. state. aerocosmic. university. Krasnojarsk, 2016. P. 581–583. (In Russ.)*

2. Feodos'ev V. I. *Soprotivlenie materialov* [Resistance of materials]. M. : Nauka, 1979. 560 p.

3. Davidenkov N. N. *Izbrannye trudy: v 2-h t. T. 2. Mehanicheskie svojstva materialov i metody izmerenija deformacij* [Selected works : in 2 vol. Vol. 2. Mechanical properties of materials and methods of measuring deformation]. Kiev : Science. Dumka, 1981. 656 p.

4. Freydenshteyn F., Meysi Zh. P., Meyki E. R. [Optimum Balancing of Combined Pitchyng and Yawing Moments in High-Speed Machinery]. *Konstruirovanie i tekhnologiya mashinostroeniya. Trudy amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov, ASME. 1981. Vol. 103, No. 3. P. 9–15.*

5. Ramenskaja E. V., Filippov Ju. A. [Mehanizm generirovanija i rasprostranenija vibracii v tehnologicheskikh mashinah]. *Vestnik SibSAU. 2012. No. 1 (41). P. 132–138. (In Russ.)*

© Филиппов К. Ю., Раменский В. В., Бокова В. И., Филиппов Ю. А., Раменская Е. В., 2018

УДК 621.7.09

## АНАЛИЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ КОЛЬЦЕВЫХ ПИЛ

К. Ю. Филиппов, В. В. Раменский, 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 исследований кольцевых пил по цилиндрической жесткости, выполненных с целью повышения степени устойчивости пил при раскрое стальных тонкостенных труб диаметром до 10 дюймов.*

*Ключевые слова: технология, кольцевая пила, жесткость, тонкостенные трубы.*

## ANALYSIS OF CYLINDRICAL RIGIDITY OF HOLE SAWS

K. Yu. Filippov, V. V. Ramensky, 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 article presents the results of studies of cylindrical rigidity of hole saws. The study was carried out to improve the stability of saws when cutting steel thin-walled pipes up to 10 inches in diameter.*

*Keywords: technology, hole saw, rigidity, stability, stresses*

В стране усиленно и целенаправленно развивается идея освоения во всех отраслях народного хозяйства так называемых «прорывных технологий». В этой связи заслуживает внимания создания в крае новой технологической структуры производства круглых пил всех видов и размеров, начиная от дисковых, строгальных, сферических, типовых стальных пил оснащенных стеллитом, быстрорежущей сталью, твердым сплавом, кубическим нитридом бора, синтезированным алмазом. Это позволило бы полностью решить проблему обеспечения круглыми пилами для производства конкурентоспособной продукции машиностроения. Работа направлена для изучения процесса прецизионного раскроя труб в производстве изделий РКТ диаметром до 254 мм.

Дисковые пилы во всех странах выпускаются по нормативам государственных стандартов и имеют разнообразные конструкции как по форме, так и по линейно-угловым характеристикам зубьев. В операциях резки труб применяют пилы двух видов [1]: первый до 96 %, пилы режущие заготовку периферией диска; второй до 4 %, с зубьями расположенными на внутренней окружности пилы (рис. 1). Круглые плоские пилы, как частный случай анализируют по теории тонких пластинок. При этом пластинку считают жесткой, если при её деформации стрела прогиба не превышает 1/5 толщины.

Линейные характеристики дисковых пил назначают по зависимостям [2]:

- толщина полотна диска  $s = (0,10 \dots 0,15) \cdot D^{1/2}$ ;
- шаг зубьев  $t = (8 \dots 10) \cdot s$ ;
- высота зуба  $h = (0,6 \dots 0,9) \cdot t$ ;
- критерий ортогональной устойчивости  $s^2/D$ .

Цилиндрическую жесткость кольцевой пилы определяют по формуле [3; 4]

$$J = Es^3/12(1 - \mu^2),$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

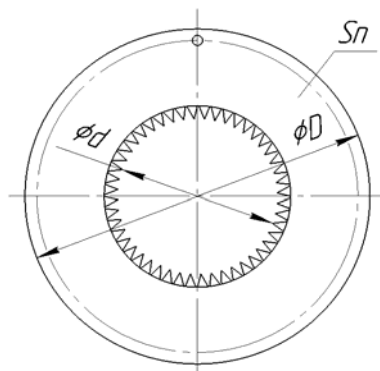
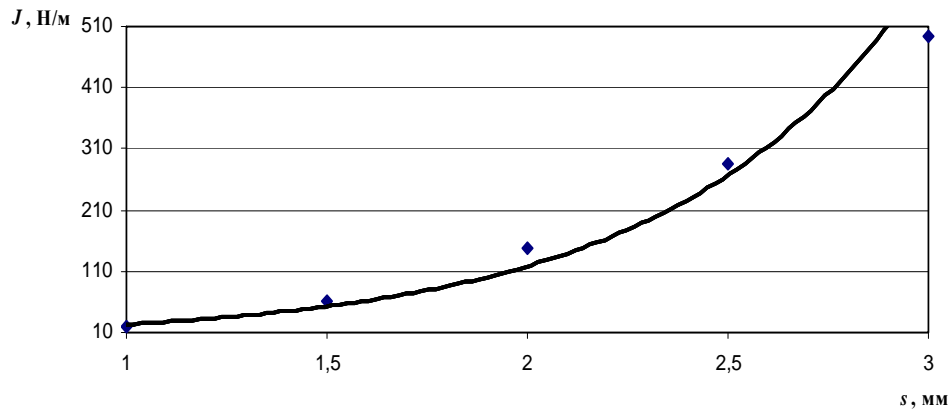


Рис. 1. Кольцевая пила

Получена графическая модель вариации цилиндрической жесткости кольцевых пил в зависимости от толщины полотна (рис. 2) и математическая модель  $J = 4,60e^{1,625s}$ , с показателем уровня достоверности аппроксимации 0,97 и коэффициентом демпфирования 1,625, который зависит от амплитуды колебаний молекул в процессе механической обработки заготовки [5].

В процессе раскроя или резки труб многолезвийным инструментом имеются особенности зарождения поперечных колебаний. В отдельных случаях эти колебания подчинятся закономерностям рассмотренным в работе [6].

Рис. 2. Цилиндрическая жесткость пилы при изменении толщины  $s = 1 \dots 3$  мм

С увеличением толщины пилы увеличивается цилиндрическая жесткость, что обеспечивает улучшение качества раскроя труб.

#### Библиографические ссылки

1. 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. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 581–583.
2. Анализ технического регламента на дисковые пилы для раскроя анизотропных материалов / И. Н. Спицын, К. Ю. Филиппов, А. А. Воробьев, А. Н. Юносов // Решетневские чтения : материалы Междунар. науч. конф. : в 2 ч. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013, Ч. 1. С. 296–297.
3. Прочность, устойчивость, колебания : справ. Т. 1 / под ред. И. А. Биргера, Я. Г. Пановко. М. : Машиностроение, 1988. 832 с.
4. Давиденков Н. Н. Избранные труды. В 2 т. Т. 2. Механические свойства материалов и методы измерения деформаций. Киев : Наук. думка, 1981. 656 с.
5. Уотс Д., Старки Ж. Оптимизация амплитуд колебаний элементов конструкции вязким демпфированием // Современное машиностроение : труды американского общества инженеров-механиков, ASME. 1990. № 12. С. 89–95.
6. Раменская Е. В., Филиппов Ю. А. Механизм генерирования и распространения вибрации в технологических машинах // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 1 (41). С. 132–138.

#### References

1. Filippov K. Ju., Jankovskaja N. F., Ramenskaja E. V. [Orthogonal stability of circular saws] // *Reshetnevskie chtenija : materialy XX Jubilejnoj mezhdunar. nauch. konf. (9–12 nojabrja 2016, g. Krasnojarsk)* : v 2 ch. Sib. State. Aerocosmic. University. Krasnojarsk, 2016. P. 581–583. (In Russ.)
2. Spicyn I. N. [Analysis of technical regulations for circular saws for cutting anisotropic materials] / I. N. Spicyn, K. Ju. Filippov, A. A. Vorob'ev, A. N. Junosov. *Reshetnevskie chtenija: materialy 17 Jubilejnoj mezhdunar. nauch. konf.*, Sib. State. Aerocosmic. University. Krasnojarsk, 2013. P. 296–297. (In Russ.)
3. *Prochnost', ustojchivost', kolebanija. Spravochnik T. 1* [Strength, stability, fluctuations. Reference book Vol. 1] pod redakciej I. A. Birgera i Ja.G. Panovko. M. : Mechanical engineering, 1988. 832 p.
4. Davidenkov N. N. *Izbrannye trudy : v 2-h t. T. 2. Mehanicheskie svojstva materialov i metody izmerenija deformacij* [Selected works: in 2 vol. Vol. 2. Mechanical properties of materials and methods of measuring deformation]. Kiev : Science. Dumka, 1981. 656 p.
5. Uots D., Starki Zh. [Optimization of Response Amplitudes Viscously Damped Structures]. *Sovremennoe mashinostroenie. Trudy amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov, ASME*. 1990. No. 12. P. 89–95.
6. Ramenskaja E. V., Filippov Ju. A. [Mehanizm generirovanija i rasprostranenija vibracii v tehnologicheskix mashinah]. *Vestnik SibSAU*. 2012. No. 1 (41). P. 132–138. (In Russ.)

© Филиппов К. Ю., Раменский В. В.,  
Раменская Е. В., Филиппов Ю. А., 2018

**СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВОЛНОВОДНЫХ ИЗГИБОВ**

Д. С. Черепанова, Е. А. Карелина, В. И. 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: cherepanova\_d@bk.ru

*Представлен у совершенствованный способ изготовления волноводных изгибов.*

*Ключевые слова: способ, волновод, изгиб волновода, изготовление волноводных изгибов.*

**A METHOD OF MANUFACTURING THE WAVEGUIDE BENDS**

D. S. Cherepanova, E. A. Karelina, V. I. Trifanov

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

*The modern method of waveguide bends manufacturing is presented.*

*Keywords: method, the waveguide, bend waveguide, making the waveguide bends.*

Существует множество способов изготовления волноводных изгибов, но их недостатками являются низкая производительность труда, необходимость изготавливать каждый гнутый участок отдельно и затем соединять между собой через фланцы, что снижает качество волноводов [1].

Предложенный ниже способ изготовления волноводов сложной формы расширяет технологические возможности, повышает производительность и точность изготовления волноводов сложной формы за счет возможности изготовления скрученных зон волноводов и гибов на одном устройстве за один технологический процесс.

Так как в изготовлении волноводных изгибов в последнее время на первый план вышло обеспечение точности гибки волновода, в связи с этим представлен следующий метод гибки.

Приспособление для изготовления волноводных изгибов представлено на рис. 1. В нее входят электродвигатель нажимного болта, две направляющих, подвижная и неподвижная оправки, электромагнит, нажимной болт и гайка. В подвижной и неподвижной оправках выполнены продольные канавки шириной, соответствующей наружному размеру волновода прямоугольного сечения, например,  $6,7^{-0,1}$  мм, а глубиной  $3,35^{-0,2}$  мм.

Между подвижной и неподвижной оправками помещают волновод. Затем в волновод засыпают магнитный порошок, при этом края волновода закрывают заглушками, чтобы магнитный порошок не высыпался.

При помощи гайки, которая находится под подвижной оправкой, начинают стягивать оправки, данные оправки движутся по направляющим, а затем

смыкаются, формируя изгиб волновода в полости, образованной канавками. Электромагниты, которые установлены на оправках притягивают к себе магнитный порошок, который находится внутри волновода, таким способом в процессе гибки удается устранить образование внутренних дефектов.

В ходе гибки происходит утонение стенки волновода, т. е. изменяется толщина стенки, что ведет к потере механической прочности. В результате действия растягивающих напряжений наружная стенка трубы утоняется, а внутренняя под действием сжимающих напряжений утолщается [2].

Утонение стенок в местах изгиба труб и переходов криволинейных участков в прямолинейные не должно превышать для труб алюминиевых сплавов – 25 % от исходной толщины стенки. Для волновода с шириной 1,8 мм и длиной 3,6 мм минимальная толщина стенки равна 0,6 мм, для волновода с сечением  $4,8 \times 4,8$  мм минимальная толщина стенки составляет 0,82 мм.

Предложенный способ позволяет обеспечить требуемые параметры по толщине стенки. Схема процесса гибки представлена на рис. 1.

Точность метода гибки составляет  $\pm 0,05$  мм.

Возможно изгибать волноводы, выполненные из латуни, так как латунь хорошо поддается гибке и пайке [3].

В связи с тем, что в гибочном приспособлении присутствуют магниты, необходимо произвести расчет магнитного потока по формуле

$$\Phi = B \cdot S, \quad (1)$$

где  $B$  – магнитная индукция, Тл;  $S$  – площадь сечения,  $\text{м}^2$ .

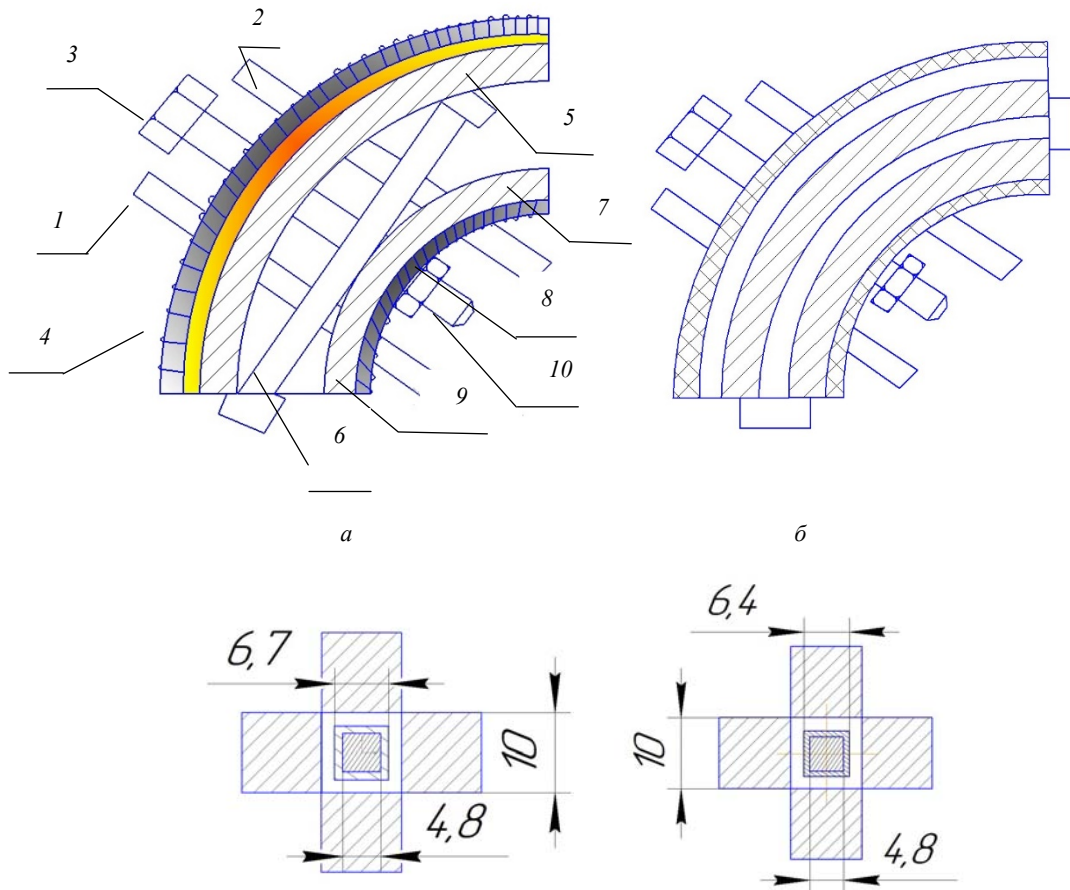


Рис. 1. Способ изготовления волноводных изгибов:  
*a* – начальное положение волновода в приспособлении; 1, 2 – направляющие; 3 – электродвигатель нажимного винта; 4, 9 – электромагниты; 5 – неподвижная оправка; *b* – волновод, наполненный магнитным порошком; 7 – подвижная оправка; 8 – гайка; 10 – нажимной винт; *б* – конечное положение волновода в приспособлении

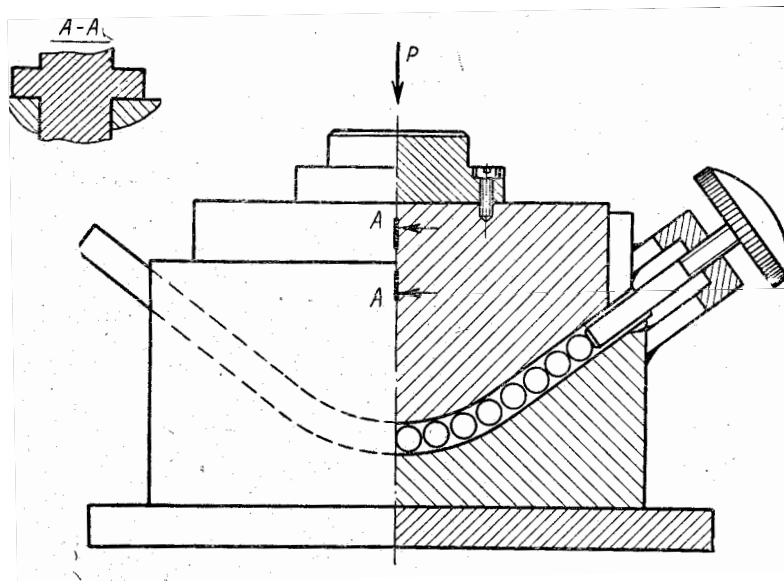


Рис. 2. Винтовое приспособление для калибровки изогнутых труб



В свою очередь магнитная индукция находится по формуле

$$B = \frac{M_{\max}}{I \cdot S}, \quad (2)$$

где  $I$  – сила тока и равна 1,2 А; площадь сечения равна 0,002 м<sup>2</sup>. Магнитная индукция равна 0,6 Тл. Сила магнитного потока  $\Phi$  равна 0,0012 Вб [3].

Повышение точности размеров канала волновода в области изгиба после гибки можно обеспечить путем дополнительной его калибровки, применяемой для всех способов гибки. Изогнутая волноводная труба, обезжиренная и отожженная, помещается в приспособление, фиксирующее её положение. Через неё проталкиваются калибровочные ролики. Обычно используется 30–50 роликов переменного диаметра. Наименьший ролик на 0,2–0,3 мм меньше окончательных размеров волновода. Каждый из последующих на 0,01 мм больше предыдущего [3].

Последние 10 роликов имеют одинаковые размеры, соответствующие номинальным размерам изогнутой части канала волновода. При проталкивании сквозь волноводную трубу ролики осаживают металл стенок и сглаживают неровности токонесущей поверхности. Калибровочные ролики проталкиваются с помощью фрикционного пресса или винтового приспособления (рис. 2) [3].

### Библиографические ссылки

1. Пат. 2634815 Российская Федерация, МПК В21D11/14. Способ изготовления волноводов сложной формы и устройство для осуществления способа / Панов Д. В., Рубцов И. С. и др. ; заявитель и патентообладатель Федеральное гос. унитарное предприятие «Техномаш». № 2016151912/16 ; заявл. 28.12.16 ; опубл. 03.11.17, Бюл. № 31. 14 с.

2. Устройство для изготовления волноводных труб прямоугольного сечения / И. В. Трифанов, М. А. Лубнин, Г. И. Григоров [и др.]. Оpubл. Б. И. № 42, 1992.

3. Волноводы [Электронный ресурс] : энциклопедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/Волновод> (дата обращения: 10.09.2018).

### References

1. Panov D. V., Rubtsov I. S. *Sposob izgotovleniya volnovodov slozhnoy formy i ustroystvo dlya osushchestvleniya sposoba* [Method of manufacturing waveguides of complex shape and device for the implementation of the method]. Patent RF, no 2634815, 2016.

2. Trifanov I. V. [Device for the manufacture of rectangular waveguide tubes] *Opubl. B. I. № 42, 1992.*

3. Waveguides Available at: <https://ru.wikipedia.org/Волновод> (accessed: 10.09.2018).

© Черепанова Д. С., Карелина Е. А.,  
Трифанов В. И., 2018



**Секция**  
**«МЕХАНИКА СПЕЦИАЛЬНЫХ  
СИСТЕМ»**

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОУШИНЫ ВИЛКИ КАРДАННОЙ ПЕРЕДАЧИ

А. А. Гумарова, И. Ю. Ермиенко<sup>2</sup>, Е. В. Кукушкин<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева  
Российская Федерация, 432071, г. Ульяновск, ул. Можайского, 8/8.

<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: ironjeck@mail.ru

*Предложена методика оптимизации параметров конструкции вилки карданной передачи, включающая в себя: 1) оценки прочностных характеристик серийной крестовины карданного шарнира и усовершенствованной крестовины карданного шарнира со сменными шипами и оптимизацию размеров соединения шипа и корпуса крестовины карданного шарнира со сменными шипами; 2) оптимизацию размеров проушин вилок карданной передачи, которая проводилась на основе методов регрессионного анализа, цель которого - нахождение такого сочетания параметров размеров длины и ширины каждой проушины, при котором обеспечивается минимальный уровень эквивалентных напряжений в опасном сечении. В результате проведенного регрессионного анализа получена регрессионная модель эквивалентных напряжений, табулированием которой получены значения конструктивно-режимных параметров, обеспечивающих минимальный уровень напряжений конструкции крестовины.*

*Ключевые слова: вилка карданной передачи, конечно-элементный анализ, напряженно-деформированное состояние.*

## INVESTIGATION OF THE STRESS-DEFORMED STATE OF THE LEAF CARDED TRANSMISSION FORM

A. A. Gumarova<sup>1</sup>, I. Yu. Ermienko<sup>2</sup>, E. V. Kukushkin<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Bugaev Ulyanovsk Civil Aviation Institute

8/8, Mozhaiskogo Str., Ulyanovsk, 432071, Russian Federation

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

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

\*E-mail: ironjeck@mail.ru

*A technique for optimizing structural parameters is proposed, which includes: 1) Evaluation of the strength characteristics of the serial joint of the universal joint and the improved cross of the universal joint with replaceable spikes and optimization of the dimensions of the stud joints and the joint body of the universal joint with interchangeable spikes; 2) Optimization of the sizes of the ears of the universal joints drive forks, which was carried out on the basis of regression analysis methods, the goal is as follows: As a result of the regression analysis, a regression model of equivalent stresses, tabulation and obtaining values of constructive-regime parameters providing a minimum stress level of the cross structures.*

*Keywords: universal joint fork, finite element analysis, stress-strain state.*

Одним из недостаточно долговечных узлов, ограничивающих надежность механических трансмиссий транспортно-технологических машин, является карданная передача [1]. Подобная методика была выполнена авторами в работе [2], где исследовали конструкции составной унифицированной вилки карданной передачи. Авторами работы [3] были проведены исследования напряженного-деформированного состояния ремонтпригодной крестовины карданного шарнира. В работе [4] дана оценка напряженно-деформированного состояния карданной передачи привода сельскохозяйственных машин. В работе [5] выполнена оптимизация карданных передач автомобилей «БелАЗ» с использованием САПР. Поэтому исследования

в области напряженно-деформированного состояния узлов и агрегатов транспортно-технологических машин является актуальными.

Методика оптимизации параметров конструкции проушины вилки карданной передачи включала в себя следующие этапы:

1. Оценка прочностных характеристик (рис. 1) при нагружении номинальным вращающим моментом в 170 Нм (3,269 кН);

2. Оптимизация размеров проушины вилки карданной передачи.

Для проведения расчётов применяли библиотеку конечно-элементного анализа FEM системы ОМПАС-3D (компании «АСКОН», г. Санкт-Петербург), разра-

ботанную совместно с НТЦ «Автоматизированное проектирование машин» (г. Королёв).

Второй этап исследований основан на анализе карт напряжений моделей с указанием локаций максимальной концентрации напряжений.

Оптимизация параметров проводилась на основе методов регрессионного анализа, цель которого нахождение такого сочетания параметров размеров ширина проушины  $X_1$  и длина проушины  $X_2$ , при котором обеспечивается минимальный уровень эквивалентных напряжений в опасном сечении. В результате проведенного регрессионного анализа получена регрессионная модель эквивалентных напряжений:

$$\sigma = 3301 - 62,429 \cdot X_1 - 121,88 \cdot X_2 + 0,673 \cdot X_1 \cdot X_2 + 1,088. \quad (1)$$

В результате табулирования функции (1) получены значения конструктивно-режимных параметров, обеспечивающих минимальный уровень напряжений конструкции:  $X_1 = 15$ ,  $X_2 = 45$  (см. рис. 2–3).

Анализ проушин вилки карданной передачи позволил установить граничные значения параметров эквивалентных напряжений, перемещений, коэффициентов запаса усталостной прочности и текучести.

На основе данных вычислительного эксперимента получена регрессионная модель эквивалентных напряжений, связывающая конструктивно-режимные параметры и результирующие эквивалентные напряжения в опасном сечении соединения проушины с фланцем вилки карданной передачи. Найдены оптимальные размеры ширины и длины проушины карданной передачи с наименьшими напряжениями.

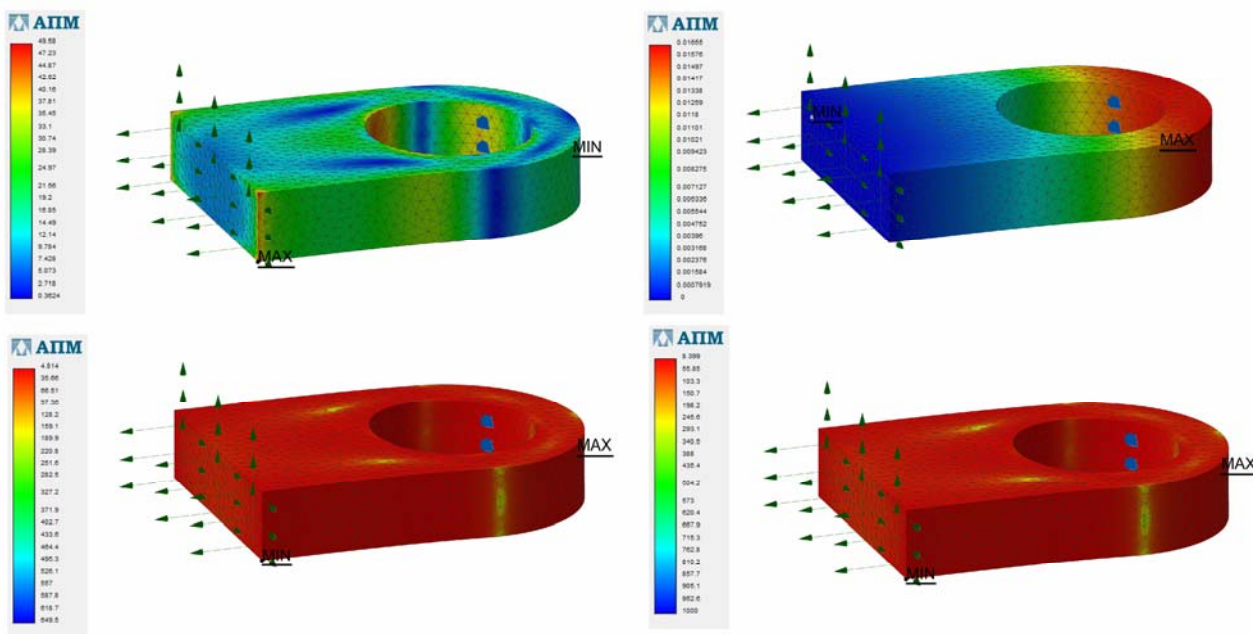


Рис. 1. Конечно-элементный анализ проушины вилки карданной передачи

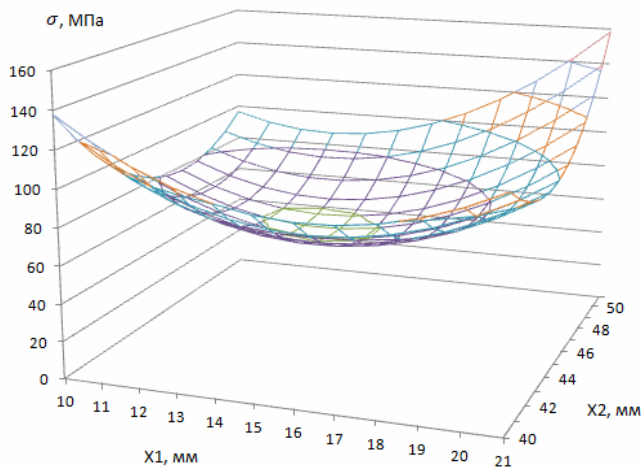


Рис. 2. График поверхности отклика значений напряжений



Рис. 3. Контурная диаграмма поверхности отклика

Полученные результаты дают возможность изготовить опытный образец вилки карданной передачи и провести экспериментальные исследования на оборудовании авторской разработки, описанном в работах [6–11].

#### Библиографические ссылки

1. Пастухов А. Г., Тимашов Е. П. Экспертная оценка работоспособности сельскохозяйственной техники // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2011. № 4. С. 25–27.
2. Пастухов А. Г., Тимашов Е. П., Кравченко И. Н. Исследование напряженно-деформированного состояния деталей модернизируемых узлов трансмиссий различных машин // *Строительные и дорожные машины*. 2015. № 8. С. 20–26.
3. Тимашов Е. П., Пастухов А. Г. Исследование напряженно-деформированного состояния ремонтно-пригодной крестовины карданного шарнира // *Тр. всероссийского научно-исследовательского технологического института ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка*. 2013. Т. 112. Ч. 2. С. 100–105.
4. Кухтов В. Г., Фесун А. А., Шевченко М. А. Оценка напряженно-деформированного состояния карданной передачи привода сельскохозяйственных машин // *Вестник ХНТУСГ*. 2012. № 128. С. 219–225.
5. Кравченко В. И., Костюкович Г. А., Кипнис М. Е. Оптимизация карданных передач автомобилей «БелАЗ» с использованием регионального распределенного сегмента «СКИФ-UNICORE» // *Вестник ГрГУ*. 2011. № 1 (116). С. 68–77.
6. 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.
7. Сравнительный анализ конструкций испытательных стендов для испытания карданных шарниров / С. П. Ереско [и др.] // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2017. Т. 18, № 4. С. 902–909.
8. Планирование эксперимента по исследованию карданных передач на игольчатых подшипниках / С. П. Ереско [и др.] // *Вестник СибГАУ*. 2016. Том 17, № 4. С. 1062–1071.
9. Расчет гидравлической системы тормозного устройства стенда для испытания трансмиссий транспортно-технологических машин / А. С. Ереско [и др.] // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2016. № 4. С. 60–79. Doi: 10.15593/24111678/2016.04.06.
10. Определение динамических параметров привода экспериментального стенда для исследования карданных передач / А. В. Стручков [и др.] // *Вестник СибГАУ*. 2016. Т. 17, № 3. С. 638–644.
11. Конструкция стенда для проведения испытаний карданных шарниров на игольчатых подшипниках в широком диапазоне размеров с изменением угла излома карданной передачи / Е. В. Кукушкин [и др.] // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2016. № 2. С. 58–73. Doi: 10.15593/24111678/2016.02.05.

#### References

1. Pastukhov A. G., Timashov E. P. [Expert evaluation of the efficiency of agricultural machinery]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2011. No. 4. P. 25–27.
2. Pastukhov A. G., Timashov E. P., Kravchenko I. N. [Investigation of the stressed-deformed state of the parts of the modernized transmission units of various machines]. *Stroitel'nye i Dorozhnye mashiny*. 2015, No. 8. P. 20–26. (In Russ.)
3. Timashov E. P., Pastukhov A. G. [Investigation of the stress-strain state of the repairable cross of the universal joint]. *Trudy GOSNITI*. 2013. No. 112. Vol. 2. P. 100–105.
4. Kukhtov V. G., Fesun A. A., Shevchenko M. A. [Estimation of the stress-strain state of the universal joint drive transmission of agricultural machines]. *Vyesnik KhNTUSG*. 2012. No. 128. P. 219–225.
5. Kravchenko V. I., Kostyukovich G. A., Kipnis M. E. [Optimization of universal joint gears of BelAZ vehicles

using the regional distributed segment SKIF-UNICORE]. *Vestnik GrGU*. 2011. No. 1, Vol. 116. P. 68–77.

6. Eresko S. P. [et al.] [Method of preparation of the experiment for investigation of universal joints on needle bearings]. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii*. 2018, Vol. 19, No. 1. P. 120–136.

7. Eresko S. P. [et al.] [Comparative analysis of structures test apparatus for universal joint]. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii*. 2017. Vol. 18, No. 4. P. 902–909. (In Russ.)

8. Eresko S. P. [et al.] [Planning of experiment on research of cardan transmissions on the needle-shaped bearing]. *Vestnik SibSAU*. 2016. No. 17. P. 1062–1071. (In Russ.)

9. Eresko A. S. [et al.] [Calculation of the hydraulic system of brake device of stand for the test of transmis-

sions of transport-technological machines]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2016. No. 4. P. 60–79. Doi: 10.15593/24111678/2016.04.06. (In Russ.)

10. Struchkov A. V. [et al.] [Determination of dynamic parameters of drive of experimental stand for research of cardan transmissions]. *Vestnik SibSAU*. 2016. No. 17. P. 638–644. (In Russ.)

11. Kukushkin E. V. [et al.] [Stand construction for testing the universal joint on needle bearings in wide range of sizes with the angle changing driveline]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2016. No. 2. P. 58–73. Doi: 10.15593/24111678/2016.02.05. (In Russ.)

© Гумарова А. А., Ермиенко И. Ю., Кукушкин Е. В., 2018

УДК 621.8

## РАСЧЕТНАЯ СХЕМА ПРИВОДА ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА СТЕНДА КАЛИБРОВАНИЯ ДРЕВЕСНО-СТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ

С. П. Ереско, В. Г. Межов, А. В. Ушаков

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: stalker\_94\_06\_01@mail.ru

*Представлена рациональная расчетная схема динамической модели экспериментального стенда для калибровки древесно-стружечных плит.*

*Ключевые слова: динамическая модель, расчетная схема, привод, момент инерции, податливость.*

## DESIGN DIAGRAM OF THE DRIVE FOR THE DYNAMIC CALCULATION OF THE STAND OF CALIBRATION OF WOODEN SPRAYING PLATES

S. P. Eresko, V. G. Mezhev, A. V. Ushakov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: stalker\_94\_06\_01@mail.ru

*The rational design scheme of the dynamic model of the experimental bench for the calibration of particle boards.*

*Keywords: dynamic model, design scheme, drive, moment of inertia, compliance.*

Для того чтобы сконструировать привод необходимо, во-первых, разработать обоснованные рекомендации, следование которым обеспечит рациональную в отношении динамики конструкцию привод, и, во-вторых, иметь достаточно простую методику расчета и экспериментального исследования динамических процессов в приводе [1].

Используемый на кафедре основ конструирования машин экспериментальный стенд для калибровки древесностружечных плит рис. 1, имеет ряд недостатков, связанных с конструкцией главного привода, который передает и воспринимает наибольшие нагрузки.



Рис. 1. Экспериментальный стенд для калибровки древесно-стружечных плит

Для обеспечения надежности конструкции привод должен обладать высокой прочностью как при постоянных, так и при переменных нагрузках. Для обеспечения устойчивого резания при интенсивных режи-

мах, высокой точности обработки этот привод должен обладать значительной жесткостью в статических режимах.

Система главного привода не должна быть чрезмерно металлоемкой и обеспечивать широкий диапазон изменения скорости, причем это изменение должно производиться бесступенчато [2–3].

Комплекс разнообразных и противоречивых технических требований, предъявляемых к системам главного привода, ставит задачу расчетного определения динамических характеристик.

Привод стенда представляет собой сложную многозвенную динамическую систему с распределенными массами. Определение динамических характеристик связано с подготовкой расчетной схемы, необходимо вычислить моменты инерции вращающихся деталей привода, податливости упругих звеньев между этими деталями, характеристики демпфирования, а также привести эти элементы к цепной системе [4].

На кинематической схеме (рис. 2) показаны расчетные моменты инерции вращающихся элементов привода и податливости упругих звеньев между этими деталями [5–6].

Расчетная схема стенда представляет собой цепи из ряда масс  $J$  со связями  $e$ . Массами  $J$  принимаются детали привода, имеющие значительные инерционные характеристики (шкивы, звездочки, зубчатые колеса). А связями  $e$  принимаются детали и элементы с незначительными инерционными характеристиками и при этом значительной податливостью (ремни, длинные тонкие валы и т. д.) [7].

Количество масс в цепи определяется количеством элементов механизма имеющих значительные момен-

ты инерции. В данном приводе инерционными элементами принимаются ведущий и ведомый шкивы ременных передач и два конических зубчатых колеса фрезерной головки см. рис. 2. Жесткостными элементами принимаются валы со шпоночными соединениями, ремни и одно зубчатое зацепление.

Таким образом, стенд состоящий из двух двигателей, валов, ременных передач и конической передачи рис. 3 а, б, можно представить в виде двух цепей: пятимассовой с четырьмя связями и шестимассовой с пятью связями.

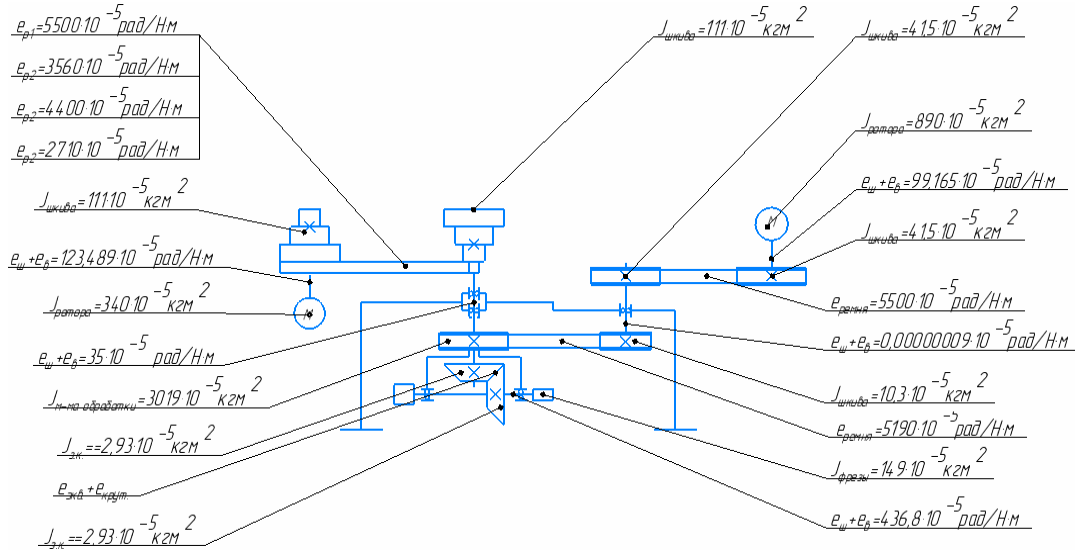
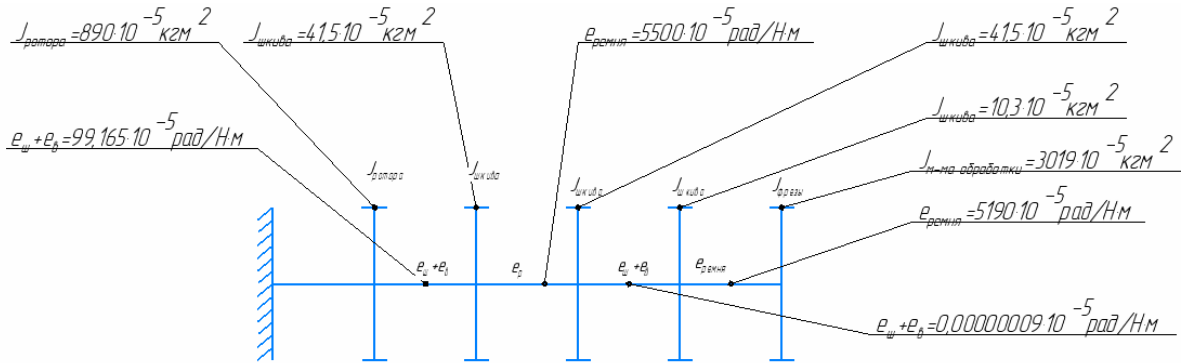
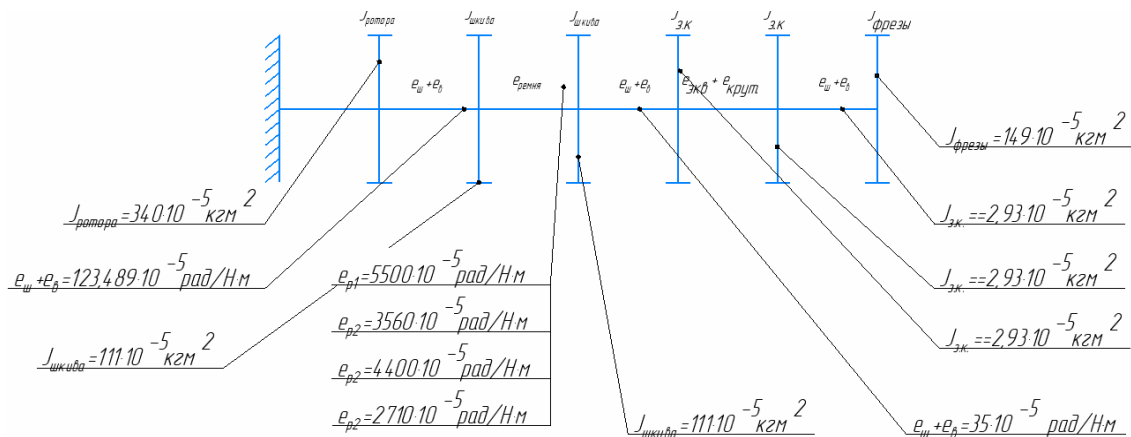


Рис. 2. Расчетные моменты инерции вращающихся элементов привода и податливости упругих звеньев



а



б

Рис. 3. Расчетная схема пятимассовой системы с четырьмя связями (а); расчетная схема шестимассовой системы с пятью связями (б)



Расчетная схема динамической модели позволяет выполнить динамическое приведение этих элементов к системе. Динамическая модель позволяет правильно оценить нагрузки, действующие в системе главного привода станда, и выбрать конструктивные параметры системы так, чтобы ограничить эти нагрузки заданными пределами [8; 9].

#### Библиографические ссылки

1. Вульфсон И. И. Краткий курс теории механических колебаний. М. : ВНТР, 2017. 241 с.
2. Ванин В. А., Колодин А. Н., Однолько В. Г. Расчет и исследование динамических характеристик приводов металлорежущих станков. Тамбов : ТГТУ, 2012. 120 с.
3. Кочергин А. И. Конструирование и расчет металлорежущих станков и станочных комплексов. Курсовое проектирование. Минск : Вышэйша школа, 1991. 382 с.
4. Межов В. Г., Чумаков В. Ф. Метод оценки надежности динамических параметров при проектировании механических систем // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения : материалы Всероссийского научно-практического конф. / СибГТУ. Красноярск, 2012. С. 25–26.
5. Решение математической модели динамики привода экспериментального станда для исследования карданных передач / А. В. Стручков [и др.] // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства : материалы междунар. научно-техн. конф. Тюмень : ТГНУ, 2016. С. 303–307.
6. Определение динамических параметров привода экспериментального станда для исследования карданных передач / А. В. Стручков [и др.] // Вестник СибГАУ. 2016. Том 17, № 3. С. 638–644.
7. Кукушкин Е. В., Межов В. Г., Ушаков А. В. Конструкция деревообрабатывающего станда для шлифования древесных композитных плит // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2017. № 5. С. 21–23.
8. Ермолович А. Г., Ереско С. П. Совершенствование процесса прессования строительных материалов : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2005. 150 с.
9. Экспериментальные исследования получения плит из фрезерной стружки на лабораторном прессе и установление физико-механических характеристик / С. П. Ереско [и др.] // Хвойные бореальной зоны ; СибГТУ. Красноярск, 2015. № 1–2. С. 73–77.

#### References

1. Vul'fson I. I. Kratkiy kurs teorii mekhanicheskikh kolebaniy. [A short course in the theory of mechanical oscillations]. Moscow, 2017. 241 p.
2. Vanin V. A., Kolodin A. N., Odnol'ko V. G. Raschet i issledovanie dinamicheskikh kharakteristik privodov metallovezhushchikh stankov. [Calculation and investigation of dynamic characteristics of drives of metal-cutting machines]. Tambov, TGTU, 2012. 120 p.
3. Kochergin A. I. Konstruirovaniye i raschet metallovezhushchikh stankov i stanochnykh kompleksov. Kursovoye proektirovaniye. [Design and calculation of metal-cutting machines and machine tools. Course design]. Minsk, High school, 1992. 382 p.
4. Mezhev V. G., Chumakov V. F. [Method for assessing the reliability of dynamic parameters in the design of mechanical systems]. Lesnoy i khimicheskiy kompleksy – problemy i resheniya: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. ["Forest and chemical complexes – problems and solutions" : materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. Krasnoyarsk, 2012. P. 25–26. (In Russ.)
5. Struchkov A. V. [et al.] [Solution of the mathematical model of the dynamics of the pilot study for drive cardan transmission]. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Nazemnye transportno-tekhnologicheskie kompleksy i sredstva" [materials of international. scientific and technical. conference "Ground transport-technological complexes and means"]. Tyumen, 2016. P. 303–307. (In Russ.)
6. Struchkov A. V. [et al.] [Determination of the dynamic parameters of the drive of the experimental stand for the study of cardan gears]. Vestnik SibGAU. 2016. No. 17. P. 638–644. (In Russ.)
7. Kukushkin E. V., Mezhev V. G., Ushakov A. V., [The design of a woodworking bench for grinding wood composite boards] // Automated design in mechanical engineering. 2017. № 5. P. 21–23. (In Russ.)
8. Ermolovich A. G., Eresko S. P. [Improvement of the process of pressing of building materials]: Monograph. Krasnoyarsk: SibSTU, 2005. P. 150 .
9. Eresko S. P. [et al.] [Experimental studies of the production of plates from milling chips on a laboratory press and the establishment of physico-mechanical characteristics of "Coniferous boreal zone"]: SibSTU, 2015. № 1–2. P. 73–77. (In Russ.)

© Ереско С. П., Межов В. Г., Ушаков А. В., 2018

УДК 662.822

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТОРМОЗНОГО УСТРОЙСТВА СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ КАРДАННЫХ ПЕРЕДАЧ

С. П. Ереско, Т. Т. Ереско, Е. В. Кукушкин\*

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

*Предложена конструкция стенда для испытания карданных передач, включающая в себя систему автоматического регулирования параметров нагружения карданных передач гидравлическим тормозным устройством, обеспечивающую стабилизацию заданных значений давления и температуры рабочей жидкости в насосном агрегате создающем тормозной момент за счет регулируемого дросселя.*

*Ключевые слова: стенд для испытаний карданных передач, система автоматического управления, гидропривод, устройство нагружения, гидронасос, регулируемый дроссель*

## AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF HYDRAULIC BRAKE DEVICE STAND FOR TESTING OF UNIVERSAL JOINT TRANSMISSIONS

S. P. Eresko, T. T. Eresko, E. V. Kukushkin\*

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

\*E-mail: ironjeck@mail.ru

*The design of the stand for the testing of universal joint gears is proposed, which includes a system for automatically adjusting the loading parameters of the universal joint gears with a hydraulic braking device that ensures the stabilization of the set pressure and temperature values of the working fluid in the pump unit that generates the braking torque due to the adjustable throttle.*

*Keywords: bench for testing universal joint gears, an automatic control system, a hydraulic drive, a loading device, a hydraulic pump, an adjustable choke*

На основе анализа конструкций стендов [1–6] выявили проблему нестабильности тормозного момента и сложности поддержания заданных значений давления и температуры рабочей жидкости в гидравлической системе, которая решается применением системы автоматизированного управления гидравлическим устройством, которая обеспечивает поддержание заданных значений давления и температуры рабочей жидкости в гидравлической системе и, следовательно, обеспечивает стабильность тормозного момента.

Предложенный стенд (рис. 1, 2) состоит из установленных на основной раме 1, электродвигателя 2, технологической передачи в виде механической коробки переключения передач 3, присоединенной к входному валу испытываемой карданной передачи 4, выходной вал которой, присоединен к устройству нагружения через раздаточный редуктор 5, причем устройство нагружения, выполнено в виде гидронасоса 6, вал которого присоединен к выходному валу раздаточного редуктора 5, входной канал гидронасоса 6 соединен с гидравлическим баком 7, а выходной канал соединен с входом дросселя 8 с регулирующим элементом, выход которого через теплообменник 9 соединен с гидравлическим баком 7, причем между выходным каналом гидронасоса 6 и входом дросселя 8 установлены предохранительный клапан 10 и манометр 11, отградуированный в единицах тормозного момента.

Устройство нагружения дополнительно снабжено системой автоматизированного управления, состоящей из блока управления 12, в составе последовательно соединенных задатчика алгоритма функционирования 13, элемента сравнения 14, автоматического управляющего устройства 15, усилителя сигналов 16. В систему автоматического управления также входят датчик гидравлического давления 17 и датчик температуры 18, установленные между гидронасосом 6 и входом дросселя 8 с регулирующим элементом, и подключенные к элементу сравнения 14, а также термодатчик 19 с регулирующим элементом, установленный между выходом дросселя 8 с регулирующим элементом и входом теплообменника 9. Дроссель 8 с регулирующим элементом и термодатчик 19 с регулирующим элементом подключены через соответствующие датчики положения регулирующего элемента дросселя 20 и термодатчика 21 к элементу сравнения 14, а регулирующие элементы дросселя 8 и термодатчика 19 снабжены, подключенными к выходу усилителя сигналов 16, исполнительными механизмами управления их положением, каждый из которых содержит шаговый электродвигатель 22 (23) и редуктор 24 (25) [6].

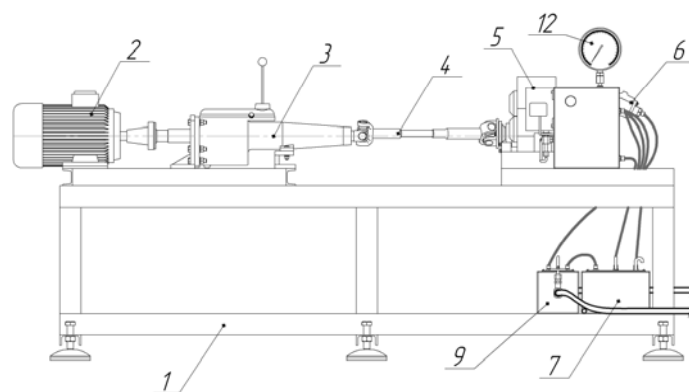


Рис. 1. Стенд для испытания карданных передач  
(не показан компьютер управления)

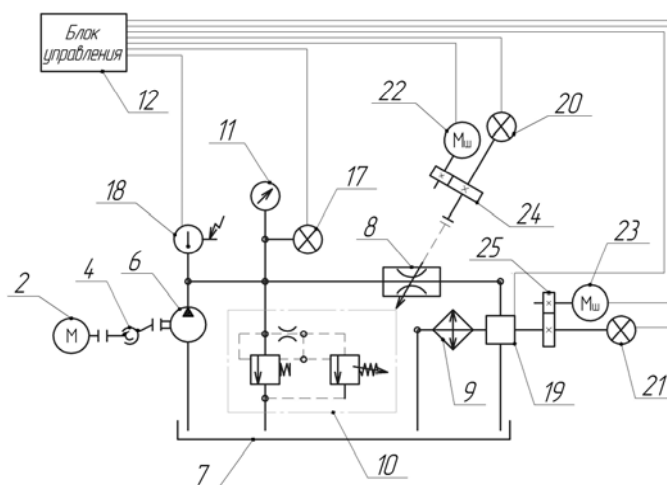


Рис. 2. Система автоматизированного управления  
гидравлического устройства

Стенд работает следующим образом: вращающий момент от электродвигателя 2 передается на испытываемую карданную передачу 4, гидронасос 6 при этом передает испытываемой карданной передаче тормозной момент, создаваемый дросселем 8 с регулирующим элементом, соединенным с приводом управления положением регулирующего элемента дросселя. Если происходит нагрев рабочей жидкости, которая при этом расширяется, включается привод управления положением регулирующего элемента дросселя 8 с помощью поступившего в элемент сравнения 14 электрического сигнала с датчика давления 17 и в автоматическом режиме регулирует дроссель 8 уравновешивая давление рабочей жидкости до заданного параметра. В случае перегрева рабочей жидкости включается привод управления положением регулирующего элемента термклапана 19 с помощью электрического сигнала, поступающего в элемент сравнения 14 с датчика температуры 18, который направляет поток рабочей жидкости через теплообменник 9. При избытке рабочего давления включается предохранительный клапан 10 для предупреждения скачка заданного давления рабочей жидкости в гидравлической системе, который выпускает избыточное давление в гидравлический бак 7.

Расчет конструкции испытательного стенда приведен в работах [7–10], описание измерительной системе в работах [11–13], а сравнительный анализ конструкций стендов для испытаний карданных передач приведен в работе [14].

Конструкция предложенного стенда позволяет испытывать карданные передачи с исключением перегрева рабочей жидкости, а система автоматического управления поддерживает заданные параметры нагружения, за счет регулировки дросселя в автоматическом режиме и автоматическое включение системы охлаждения.

#### Библиографические ссылки

1. Авторское свидетельство SU 681344, МПК7 G01M13/02. Стенд для испытания коробок передач / Попик Н. М., Черников В. Г. № 3562316/25 ; заяв. 04.03.1983 ; Оpubл. 15.07.1984. Бюл. № 26.
2. Авторское свидетельство SU 1569642, МПК7 G01M13/02. Стенд для испытания агрегатов трансмиссий транспортных средств / Смольяков А. И., Савченко М. М., Чернышев А. Г. и др. ; № 4409083/25 ; заяв. 13.04.1988 ; Оpubл. 07.06.1990. Бюл. № 21.
3. Пат. 149002 Российская Федерация, МПК7 G01M 13/02. Стенд для испытаний карданных передач /

Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А., Ереско С. П. и др. № 2014120845; заяв. 22.05.2014; Опубли. 20.12.2014. Бюл. № 35. 1 с.

4. Пат. 153924 Российская Федерация, МПК7 G01M 13/02. Стенд для испытаний карданных шарниров / Ереско С. П., Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В. и др. № 2014147821/28; заяв. 26.11.2014; Опубли. 10.08.2015. Бюл. № 22. 2 с.

5. Пат. 162876 Российская Федерация, МПК7 G01M 13/02. Стенд для испытаний карданных передач / Ереско С. П., Ереско А. С., Ереско Т. Т. и др. № 2015157365; заяв. 30.12.2015; Опубли. 27.06.2016. Бюл. № 18. 2 с.

6. Пат. 2649601 Российская Федерация, МПК7 G01N 13/00. Стенд для испытания карданных передач / Ереско С. П., Ереско А. С., Ереско Т. Т. и др.; № 2016140015; заявл. 11.10.2016; опубли. 04.04.2018. Бюл. № 10. 10 с.

7. Конструкция стенда для проведения испытаний карданных шарниров на игольчатых подшипниках в широком диапазоне размеров с изменением угла излома карданной передачи / Е. В. Кукушкин [и др.] // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2016. № 2. С. 58–73. Doi: 10.15593/24111678/2016.02.05.

8. Определение динамических параметров привода экспериментального стенда для исследования карданных передач / А. В. Стручков [и др.] // Вестник СибГАУ. 2016. Том 17, № 3. С. 638–644.

9. Расчет гидравлической системы тормозного устройства стенда для испытания трансмиссий транспортно-технологических машин / А. С. Ереско [и др.] // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2016. № 4. С. 60–79. Doi: 10.15593/24111678/2016.04.06.

10. Математическое моделирование динамической нагруженности трансмиссионных систем с учетом диссипативных процессов / С. П. Ереско [и др.] // Строительные и дорожные машины. 2013. № 12. С. 32–37.

11. Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В., Орлов А. А. Разработка измерительной системы стенда для испытания карданных передач // Решетневские чтения: материалы XXI Междунар. науч. конф.; СибГУ им. акад. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2017. С. 559–561.

12. Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В., Орлов А. А. Тензометрические измерения деформаций карданных передач на испытательном стенде // Решетневские чтения: материалы XXI Междунар. науч. конф.; СибГУ им. акад. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2017. С. 562–564.

13. Разработка модуля измерения деформаций с помощью тензорезисторов с использованием arduino / А. С. Ереско [и др.] // Механика XXI века: материалы XX Междунар. науч. конф.; Братск: БрГУ, 2017. С. 82–85.

14. Сравнительный анализ конструкций испытательных стендов для испытания карданных шарниров / С. П. Ереско [и др.] // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 902–909.

#### Reference

1. Popik N. M., Chernikov V. G. *Stend dlya ispytaniya kardannykh peredach*. [The test stand driveline]. Patent RF, No. 681344, 1984.

2. Smol'yakov A. I., Savchenko M. M., Chernyshev A. G. et al. *Stend dlya ispytaniya agregatov transmissij transportnykh sredstv*. [Stand for testing of aggregates of transmissions of vehicles]. Patent SU, No. 1569642, 1990.

3. Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A., Eresko S. P. et al. *Stend dlya ispytaniya kardannykh peredach*. [The test stand driveline]. Patent RF, No. 149002, 2014.

4. Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V. et al. *Stend dlya ispytaniya kardannykh sharnirov*. [The test stand driveline]. Patent RF, No. 153924, 2015.

5. Eresko S. P., Eresko A. S., Eresko T. T. et al. *Stend dlya ispytaniya kardannykh peredach*. [The test stand driveline]. Patent RF, No. 162876, 2016.

6. Eresko S. P. [et al.] *Stend dlya ispytaniya kardannykh peredach* [The test stand driveline]. Patent RF, No. 2649601, 2018.

7. Kukushkin E. V. [et al.] [Stand construction for testing the universal joint on needle bearings in wide range of sizes with the angle changing driveline]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2016. No. 2. P. 58–73. Doi: 10.15593/24111678/2016.02.05. (In Russ.)

8. Struchkov A. V. [et al.] [Determination of dynamic parameters of drive of experimental stand for research of cardan transmissions]. *Vestnik SibGAU*. 2016. No. 17. P. 638–644. (In Russ.)

9. Eresko A. S. [et al.] [Calculation of the hydraulic system of brake device of stand for the test of transmissions of transport-technological machines]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2016. No. 4. P. 60–79. Doi: 10.15593/24111678/2016.04.06. (In Russ.)

10. Eresko S. P. [et al.] [Mathematical modeling of dynamic loading of transmission systems with allowance for dissipative processes]. *Stroitel'nye i Dorozhnye mashiny*. 2013. No. 12. P. 32–37. (In Russ.)

11. Eresko T. T., Kukushkin E. V., Orlov A. A. [Development of the measuring system of the stand for testing the universal joint transmissions]. *Materialy XXI mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXI Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2017. P. 559–561. (In Russ.)

12. Eresko T. T., Kukushkin E. V., Orlov A. A. [Tensometric measurements of the deformations of universal joint transmissions at the test stand]. *Materialy XXI mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXI Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2017. P. 562–564 (In Russ.)

13. Eresko A. S. [et al.] [Development of strain measurement module using strain gages using arduino] *Materialy XV Mezhdunar. nauch. konf. "Mechaniki XXI veku"* [Materials Intern. Scientific. Conf "Mechanics of XXI century"]. Bratsk: Bratsk State University, 2017. P. 82–85. (In Russ.)

14. Eresko S. P. [et al.] [Comparative analysis of structures test apparatus for universal joint]. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologiy*. 2017. Vol. 18, No. 4. P. 902–909. (In Russ.)

© Ереско С. П., Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В., 2018

УДК 658.512.22

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛАСТОМЕРНЫХ УПЛОТНИТЕЛЕЙ

В. С. Ереско, С. П. Ереско, Т. Т. 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: wer125@list.ru

*Манжетные уплотнители применяются для обеспечения герметичности исполнительных агрегатов гидро-пневмо-вакуумных систем. Для повышения герметичности важную роль играет форма эюры распределения контактных напряжений, исключая или снижающая вероятность возникновения гидродинамического давления, а также обеспечивающая возврат утечки рабочей жидкости в уплотняемую полость. Применяемые в настоящее время методы производства контактных уплотнений с помощью литевых пресс-форм основаны на выборе размеров из ГОСТ на уплотнения и пресс-формы. Однако размеры, приведенные в ГОСТ, зачастую не гарантируют заданного ресурса, так как не учитывают условий эксплуатации.*

*Приведена методика автоматизации технологического процесса производства пресс-форм для изготовления манжетных уплотнителей за счет построения параметрических моделей контактных уплотнений манжетного типа, включающих оптимизацию их проектных параметров и формы в зависимости от конкретных заданных условий последующей эксплуатации для обеспечения заданного гарантированного ресурса работоспособности.*

*Ключевые слова: уплотнитель, угол раскрытия манжеты, параметрическая модель уплотнителя, параметрическая модель пресс-формы.*

## AUTOMATION OF THE DESIGNING PROCESS AND PRODUCTION OF ELASTOMERIC SEALANTS

V. S. Eresko, S. P. Eresko, T. T. Eresko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: wer125@list.ru

*Lip seals are used to provide tightness of executive hydraulic units. For improving the tightness an important role played by the diagram shape of distribution contact stresses, which exclude or reducing of possibility of appearance of hydrodynamic pressure, and also providing working fluid leakage return to a sealing chamber. Methods that used now days to manufacture contact-type seals with help of molds based on selection dimensions from GOST on sealing and molds. However the dimensions, that are given in GOST, often do not provide the specified resource, because do not taking into account the conditions of use.*

*The paper describes a method of production processes automation of molds for manufacturing lip seals through the construction of parametric models of contact-type seals which include the optimization of their design parameters and shape depending on the specific set conditions of subsequent operation to provide a given guaranteed resource performance.*

*Keywords: sealing, opening angle of the seal, parametric model of the seal, parametric model of the mold.*

Процессы автоматизации проектирования и изготовления деталей машиностроительного производства неразрывно связаны с математическим моделированием как объекта проектирования [1], так и технологического процесса его производства.

Уплотнители применяются в гидро-пневмо-вакуумных системах для герметизации соединений и моделирования рабочего процесса и оптимизация конструктивных параметров выполняется с учетом всех условий эксплуатации соединения и учетом вида материала, из которого выполнен уплотнитель. Герметичность определяется объемом утечек среды из герметизируемой полости объекта.

Методика оптимизации конструктивных параметров формы манжетного уплотнителя для угла раскры-

тия профиля сечения манжетного уплотнителя приведена в работах [2–4]. За критерий оптимизации принято минимально необходимое контактное напряжение, обеспечивающее герметичность соединения с учетом действующего статического и гидродинамического давления уплотняемой среды. Гидродинамическое давление жидкости в уплотняемом зазоре может быть определено экспериментально для конкретных гидроагрегатов, либо методами имитационного математического моделирования, как это сделано в работах [5; 6].

На базе описанного подхода создано программное обеспечение АСУТП изготовления пресс-форм гидрорепневмоагрегатов. Конструктивно архитектура любой автоматизированной системы обычно определя-

ется как набор ответов на следующие вопросы: что делает система; на какие части она разделяется; как эти части взаимодействуют. АСУТП [7–12], предназначена для управления процессом подготовки изготовления пресс-форм уплотнений гидродневоагрегатов. При постановке задачи процессом изготовления пресс-форм в целом, в комплекс необходимо включить модуль генерации постпроцессоров для станков с ЧПУ.

Перспективы продолжения работы: формирование и ведение аналитической базы данных; комплексный анализ; динамическое моделирование процессов; выполнение многовариантных прогнозных расчетов сценарного и целевого типа модернизации уплотнения на основе комплекса динамических моделей; анализ и прогноз влияния различных факторов на улучшение эксплуатационных показателей уплотнения.

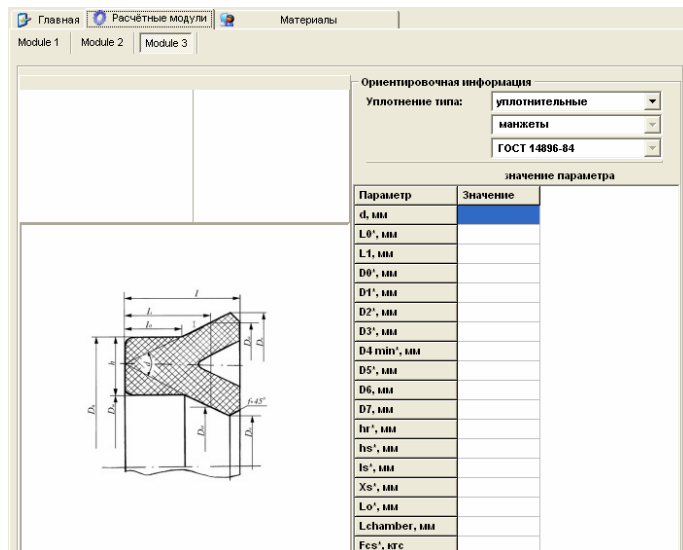


Рис. 1. Окно отображения программы расчета проектных параметров уплотнений

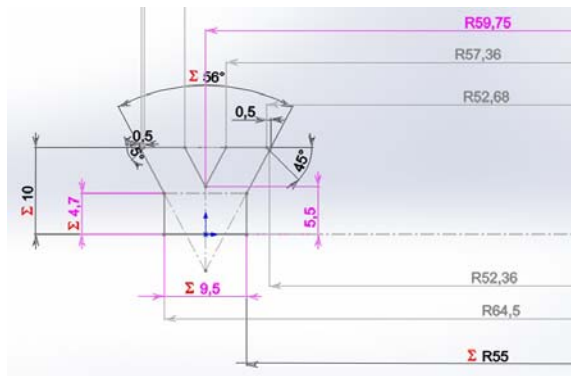


Рис. 2. Профиль модели манжеты

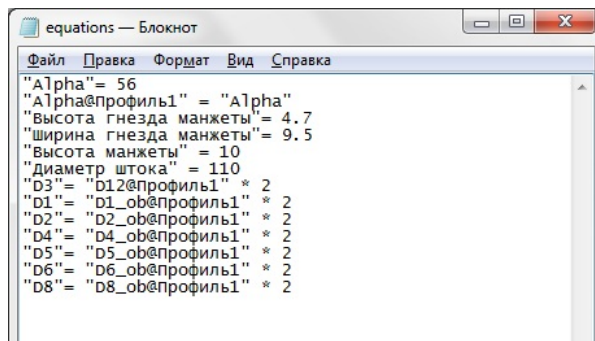


Рис. 3. Исходные переменные параметрической модели уплотнителя

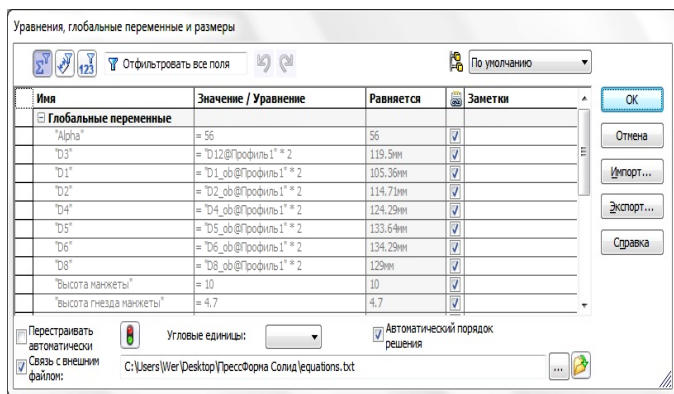


Рис. 4. Таблица уравнений параметрической модели

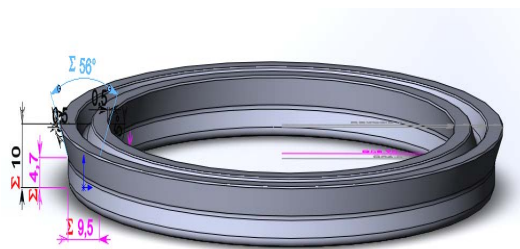


Рис. 5. Параметрическая модель манжеты

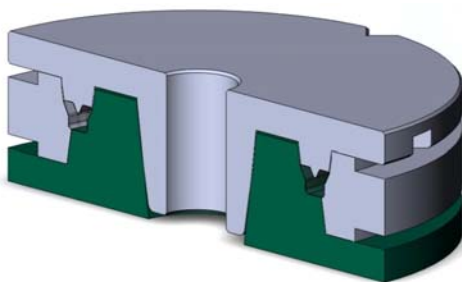


Рис. 6. Параметрическая 3D-модель пресс-формы манжеты

Найденная с помощью соответствующего расчетного модуля зависимость угла раскрытия манжетного уплотнителя позволяет связать расчетные модули системы автоматизированного проектирования уплотнителей с проектными модулями системы проектирования пресс-форм для их изготовления посредством параметрических моделей (рис. 2, 3)

Импортируя уравнения, управляющие размерами из предварительно созданного текстового файла (рис. 4). Создаем твердое тело модели уплотнителя (рис. 6).

После чего мы получаем законченную модель манжеты. Далее создаем заготовку пресс-формы манжеты, учитывая усадку материала, соответственно масштабируя деталь на 0,5–3 %. Полученную параметрическую модель манжеты используем в ранее созданных моделях деталей пресс-формы манжеты по ГОСТ 26619–85.

На рис. 6 показан итоговый сборочный вид 3D-модели пресс-формы для изготовления исследуемой манжеты.

Изменяя параметры гнезда, или угла раскрытия, мы изменяем и саму модель манжеты, после чего эта модель может быть использована для создания конструкторской документации в полуавтоматическом режиме или же экспортирована как файл трехмерной модели (*Edrawings*, *IGES*, *STEP* и другие международные форматы обмена данными).

Внося изменения в переменные параметрической модели манжеты и в ее шаблон, можно получить в автоматическом режиме необходимые переменные, такие, например, как фамилия автора, тип материала с автоматическим указанием его усадки в процентах и автозаполнение спецификации на пресс-форму манжеты в конструкторской документации [13].

#### Библиографические ссылки

1. Совершенствование гидропневмоударного агрегата на основе имитационного моделирования / Т. Т. Ереско [и др.] // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование : научный журнал ИРГУПС. 2011. № 3 (31). С. 50–56.

2. Ереско В. С., Ереско С. П., Антамошкин А. Н. Автоматизированное проектирование уплотнений гидроагрегатов и пресс-форм для их изготовления // Решетневские чтения : материалы 15-й Международной конф. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. С. 212–213.

3. Автоматизация разработки параметрических моделей контактных уплотнений подвижных соеди-

нений и пресс-форм для их изготовления / В. С. Ереско [и др.] // Системы. Методы. Технологии: научный периодический журнал. № 1 (13). Братск : БрГУ, 2012. С. 22–27.

4. Автоматизация технологического процесса производства пресс-форм для изготовления манжетных уплотнений / В. С. Ереско [и др.] // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 2 (42). С. 130–135.

5. Система управления надежностью уплотнений подвижных соединений гидроагрегатов строительных машин : дис. ... д-ра техн. наук. 05.02.02. защищена 31.10.2003, утв. 12.03.2004. Красноярск : НИИ СУВПТ, 2003. 425 с.

6. Ереско Т. Т. Совершенствование конструкций и рабочего процесса гидропневмоагрегатов ударного действия : дис. ... д-ра техн. наук. 05.02.13. защищена 29.06.2005, утв. 20.01.2006. Красноярск: НИИ СУВПТ, 2005. 330 с.

7. Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2005611605 (РФ) / Проверка уникальности наименований файлов блока исходных данных АСУТП пресс-форм уплотнений гидропневмоагрегатов (ASULING) / С. П. Ереско, М. А. Незнамов, Т. Т. Ереско, В. С. Ереско ; Заявл. 11.05.2005, № 2005611012; Зарегистр. Роспатент 29.06.2005 г.

8. Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2005611606 (РФ) / (CADFOX) для работы с базами данных FoxPro из сеанса AutoCAD / С. П. Ереско, М. А. Незнамов, Т. Т. Ереско, В. С. Ереско; Заявл. 13.05.2005, № 2005611050; Зарегистр. Роспатент 29.06.2005 г.

9. Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2005611607 (РФ) / Параметризация графических примитивов пакетов пресс-форм и разработка двумерных чертежей пресс-форм уплотнений гидропневмоагрегатов (ASU\_V) / С. П. Ереско, М. А. Незнамов, Т. Т. Ереско, В. С. Ереско ; Заявл. 13.05.2005, № 2005611051; Зарегистр. Роспатент 29.06.2005 г.

10. Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2005611608 (РФ) / Разработка растровых слайдов графических объектов АСУТП пресс-форм уплотнений гидропневмоагрегатов (ASU\_R) / С. П. Ереско, М. А. Незнамов, Т. Т. Ереско, В. С. Ереско ; Заявл. 13.05.2005, № 2005611052; Зарегистр. Роспатент 29.06.2005 г.

11. Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2005611609 (РФ) / Генерация специализированного экранного интерфейса АСУТП пресс-форм гидропневмоагрегатов в AutoCAD (CADLISP) /

С. П. Ереско, М. А. Незнамов, Т. Т. Ереско, В. С. Ереско ; Заявл. 13.05.2005, № 2005611053; Зарегистр. Роспатент 29.06.2005 г.

12. Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2005611608 (РФ) / Обработка архива параметризованных DXF – файлов в формате СУБД FoxPro и обратной связи БД FoxPro и AutoCAD в АСУТП пресс-форм уплотнений гидропневмоагрегатов (FOXCAD) / С. П. Ереско, М. А. Незнамов, Т. Т. Ереско, В. С. Ереско ; Заявл. 13.05.2005, № 2005611054; Зарегистр. Роспатент 29.06.2005 г.

13. Совершенствование процесса проектирования пресс-форм для изготовления манжетных уплотнений / В. С. Ереско, С. П. Ереско, А. Н. Антамошкин, Т. Т. Ереско // Решетневские чтения : материалы 16-й Междунар. конф. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2012. С. 238–240.

### References

1. Eresko T. T. et al. *Sovremennye tehnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie: nauchnii jurnal IRGUPS*. 2011. No. 3 (31). P. 50–56.

2. Eresko V. S., Antamoshkin A. N. Computer-aided design seals of hydraulic units and molds for their manufacture [Avtomatizirovannoe proektirovanie uplotnenii gidroagregatov i press-form dlya ih izgotovleniya]. *Materialy 15-j mejdunarodnoi konferencii "Reshetnevskie chteniya"* (Materials of 15<sup>th</sup> international conference "Reshetnev reading"), Krasnoyarsk: SibSAU, 2011. P. 212–213.

3. Eresko V. S. et al. *Sistemi. Metodi. Tehnologii: nauchnii periodicheskij jurnal*, No. 1 (13). Bratsk: State Educational Institution "BrSTU", 2012. P. 22–27.

4. Eresko V. S., Antamoshkin A. N., Eresko T. T. *Vestnik SibGAU*, No. 2 (42), Krasnoyarsk: SibSAU, 2012. P. 130–135.

5. Eresko S. P. Sistema upravleniya nadejnostju uplotnenii podvijnykh soedinenii gidroagregatov stroitelnykh mashin (Reliability control system of sealings of moving units of hydro machines of building machines): Dissertation Ph.D. 05.02.02 secured 31.10.2003, approved 12.03.2004. Krasnoyarsk: SRI SCWPT, 2003. 425 p.

6. Eresko T. T. Sovershenstvovanie konstrukcii i rabochego processa gidropnevmoagregatov udarnogo deistviya (Improving of constructions and working process of impact Hydropneumaticunits): Dissertation Ph.D. 05.02.13. secured 29.06.2005, approved 20.01.2006. Krasnoyarsk: SRI SCWPT, 2005. 330 p.

7. Eresko S. P. et al. Proverka unikalnosti naimenovaniy failov bloka ishodnykh dannykh ASUTP press-form uplotnenii gidropnevmoagregatov (ASULING) (Unique-

ness check of the file name of input data block PCS mold seals Hydropneumaticunits (ASULING)). Certificate of official registration of computer programs №2005611605 (RF), ROSPATENET, 29.06.2005.

8. Eresko S. P., Eresko V. S., Neznamov M. A. (CADFOX) dlya raboti s bazami dannykh FoxPro iz seansa AutoCAD ((CADFOX) for work with FoxPro databases from AutoCAD session). Certificate of official registration of computer programs № 2005611606 (RF), ROSPATENT 29.06.2005.

9. Eresko S. P. et al. Parametrizaciya graficheskikh primitivov paketov press-form i razrabotka dvumernykh chertejey press-form uplotnenii gidropnevmoagregatov (ASU\_V)(Parameterization of graphics primitives of molds packages and development two-dimensional drawings of sealing's Hydropneumaticunits (ASU\_V)). Certificate of official registration of computer programs № 2005611607 (RF), ROSPATENT 29.06.2005.

10. Eresko S. P. et al. Razrabotka rastrovnykh slaidov graficheskikh objektov ASUTP press-form uplotnenii gidropnevmoagregatov (ASU\_R) (Developing of slides of graphic units of ASUTP of molds of sealing of Hydropneumaticunits (ASU\_R)). Certificate of official registration of computer programs № 2005611052 (RF), ROSPATENT 20.06.2005.

11. Eresko S. P. et al. Generaciya specializirovannogo ekrannogo interfeisa ASUTP press-form gidropnevmoagregatov v AutoCAD (CADLISP) (Generation of specialized screen interface of ASUTP of mold of Hydropneumaticunits (CADLISP)). Certificate of official registration of computer programs № 2005611609 (RF), ROSPATENT 29.06.2005.

12. Eresko S. P. et al. Obrabotka arhiva parametrizirovannykh DXF-failov v formate SUBD FoxPro i obratnoi svyazi BD FoxPro i AutoCAD v ASUTP press-form uplotnenii gidropnevmoagregatov (FOXCAD) (Archive processing of parameterized DXF-files of molds of sealing's of Hydropneumaticunits in FoxPro database and feedback FoxPro database and AutoCAD (FOXCAD)). Certificate of official registration of computer programs № 2005611608 (RF), ROSPATENT 29.06.2005.

13. Sovershenstvovanie processa proektirovaniya press-form dlya izgotovleniya mangetnykh uplotneniy / W. S. Eresko, S. P. Eresko, A. N. Antamochkin et al. / *Materialy 15-j mejdunarodnoi konferencii "Reshetnevskie chteniya"* (Materials of 15<sup>th</sup> international conference "Reshetnev reading"), Krasnoyarsk: SibSAU, 2012, P. 238–240.

© Ереско В. С., Ереско С. П.,  
Ереско Т. Т., 2018



УДК 621.313.13.1

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЛАНЕТАРНОГО МОТОРА-РЕДУКТОРА С БЕСКОЛЛЕКТОРНЫМ ВЕНТИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ОБРАТНОЙ КОНСТРУКЦИИ

М. Е. Иванов\*, А. А. Фадеев, Т. Т. 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: max777\_0@mail.ru

*Предложена математическая модель расчета планетарного мотора-редуктора с бесколлекторным вентильным двигателем обратной конструкции, разработанная в среде программа MathCad, включающая в себя синтезированные расчет механической части редуктора и электрический расчет бесколлекторного вентильного двигателя.*

*Ключевые слова: мотор-редуктор, математическая модель, планетарный редуктор, бесколлекторный вентильный двигатель.*

## CREATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF A PLANETARY GEARED MOTOR WITH REVERSE DESIGNED BRUSHLESS DC ELECTRIC MOTOR

M. E. Ivanov\*, A.A. Fadeev, T. T. Eresko

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

\*E-mail: max777\_0@mail.ru

*A mathematical model is proposed for calculating a planetary geared motor with reverse designed brushless DC electric motor developed in the MathCad program environment, including the synthesized calculation of the mechanical part of the reducer and the electric calculation of the brushless DC electric motor.*

*Keywords: geared motor, mathematical model, planetary reducer, brushless DC electric motor.*

В рамках выполнения магистерской диссертации была выявлена проблема отсутствия методики расчета планетарного мотор-редуктора с бесколлекторным вентильным двигателем, включающая как расчет механической части привода, так и его электрической части.

Цель создания математической модели – упростить и автоматизировать расчет планетарного мотор-редуктора с бесколлекторным вентильным двигателем, при заданных параметрах по возможности с минимальным вмешательством человека в ход расчета. На данный момент расчет осуществляется в среде программы MathCAD, в дальнейшем будет рассмотрена возможность разработки программы в других программных средах с целью большей автоматизации.

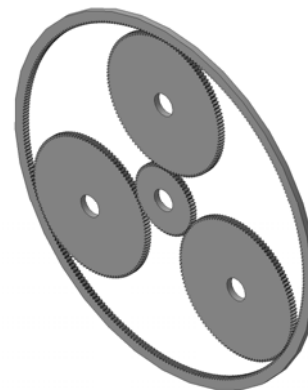
Для разработки математической модели будем использовать существующие расчеты механической и электрической части привода с помощью которых будут синтезированы оба этих расчета.

Механический расчет рассмотрен в справочнике «Планетарные передачи» [1; 2], а электрический расчет рассмотрен в курсе лекций «Вентильные электрические двигатели и привод на их основе».

На данный момент разработана математическая модель в среде MathCAD, по заданным начальным значениям построена 3D-модель планетарного мотор-

редуктора (см. рисунок), бесколлекторные вентильные двигатели условно не показаны.

С помощью математической модели можно производить расчет планетарного механизма при различных параметрах. Такие планетарные механизмы находят свое применения в различных отраслях техники, в том числе и в перспективном направлении – беспилотной авиации.



3D-модель планетарного редуктора

В дальнейшем, сначала по математической, а затем и по реальной физической модели, будут заме-

рены значения в двух режимах работы мотор-редуктора:

– режиме генератора, когда ведущим звеном является большое центральное колесо (во время торможения происходит выработка и рекуперация энергии);

– режиме двигателя, где ведущим звеном является малое центральное колесо при подаче напряжения от источников питания.

Реальная модель будет базироваться на системе Arduino, зубчатые колеса напечатаны с помощью 3D-принтера, а для эксперимента использованы бесколлекторные вентильные двигатели фирмы Turnigy, аналогичные рассчитанным в математической модели.

#### Библиографические ссылки

1. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность) : курс лек-

ций / И. Е. Овчинников. СПб. : КОРОНА-Век, 2006. 336 с.

2. Планетарные передачи : справочник / под ред. д-ров техн. наук В. Н. Кудрявцева, Ю. Н. Кирдяшева. Л. : Машиностроение. Ленигр. отд-ние, 1977. 536 с.

#### References

1. Ventil'nye ehlektricheskie dvigateli i privod na ih osnove (malaya i srednyaya moshchnost') Kurs lekcij / I. E. Ovchinnikov. SPb. : KORONA-Vek, 2006. 336 p.

2. Planetarnye peredachi. Spravochnik. Pod red. doktorov tekhn. Nauk V.N. Kudryavceva i YU. N. Kirdyasheva. L., Mashinostroenie. Lenigr. otd-nie, 1977. 536 p.

© Иванов М. Е., Фадеев А. А., Ереско Т. Т., 2018

## РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОФАЗНЫХ СУБМИКРО-НАНОРАЗМЕРНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

Ю. Ф. Иванов<sup>1</sup>, С. П. Ереско<sup>2</sup>, Ю. Х. Ахмадеев<sup>1</sup>, И. В. Лопатин<sup>1</sup>, А. А. Клопотов<sup>3,4\*</sup>

<sup>1</sup>Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук  
Российская Федерация, 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/3

<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>Томский государственный архитектурно-строительный университет  
Российская Федерация, 634003, г. Томск, площадь Соляная, 2

<sup>4</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, 634055, Томск, ул. Ленина 36

\*E-mail: klopotovaa@tsuab.ru

*Авиакосмическая отрасль является одним из основных потребителей сплавов на основе алюминия, модифицирование которых электронно-ионно-плазменным методом позволило многократно повысить механические и трибологические свойства материала.*

*Ключевые слова: алюминий, электронно-ионно-плазменная обработка, наноструктура, свойства.*

## DEVELOPMENT OF COMBINED ELECTRON-ION-PLASMA METHOD FOR FORMATION OF MULTIPHASE SUBMICRO-NANOSCALE ALLOYS BASED ON ALUMINUM

Yu. F. Ivanov<sup>1</sup>, S. P. Eresko<sup>2</sup>, Yu. H. Ahmadeev<sup>1</sup>, I. V. Lopatin<sup>1</sup>, A. A. Klopotov<sup>3,4\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of High-Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
2/3 Akademicheskoy Av., Tomsk, 634055, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>3</sup>Tomsk State University of Architecture and Building  
2, Solyanaya Sq., Tomsk, 634003, Russian Federation

<sup>4</sup>National Research Tomsk State University  
36, Lenin Str., Tomsk, 634050, Russian Federation

\*E-mail: klopotovaa@tsuab.ru

*The aerospace industry is one of the main consumers of aluminum-based alloys. Modification of such alloys using the electron-ion-plasma method made it possible to repeatedly improve mechanical and tribological properties of the material.*

*Keywords: aluminum, electron-ion-plasma processing, nanostructure, properties.*

**Введение.** Сплавы на основе титана и алюминия в настоящее время нашли широкое применение в авиакосмической промышленности [1]. К примеру, сплавы алюминия с цинком и магнием настолько прочны, что при температуре до 200 °С сравнимы со сталью [2]. В ряде случаев с практической и экономической точек зрения эффективным является подход, основанный на модифицировании поверхностного слоя материала при неизменной структуре и свойствах его объема [3–5].

Цель настоящей работы – выявление возможностей комплексного электронно-ионно-плазменного модифицирования структуры и свойств поверхностного слоя технически чистого алюминия.

**Материал и методика исследования.** Материалом исследования являлись образцы технически чистый алюминий марки А7 размерами 15×15×5 мм.

Формирование поверхностного сплава осуществляли в едином вакуумном цикле на установке «КОМПЛЕКС» (ИСЭ СО РАН) путем напыления пленки титана толщиной 0,5 мкм и последующего облучения интенсивным импульсным электронным пучком в режиме плавления алюминия. После 20 циклов «напыление/ облучение» проводили азотирование (540 °С, 8 час) сформированного поверхностного сплава в плазме газового разряда низкого давления.

Структуру и фазовый состав модифицированного слоя изучали методами сканирующей и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа.

Свойства материала характеризовали твердостью, износостойкостью и коэффициентом трения. Износостойкость изучали в условиях сухого трения при комнатной температуре.

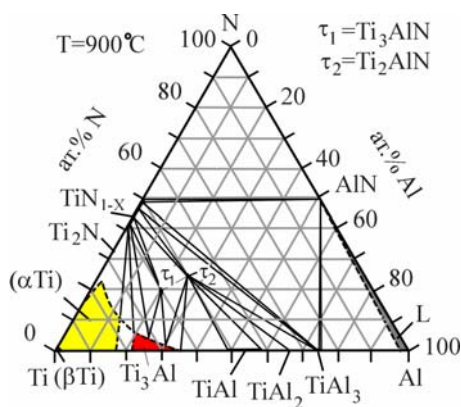


Рис. 1. Изотермическое сечение при 900 °С тройной системы Al-Ti-N [6; 7]

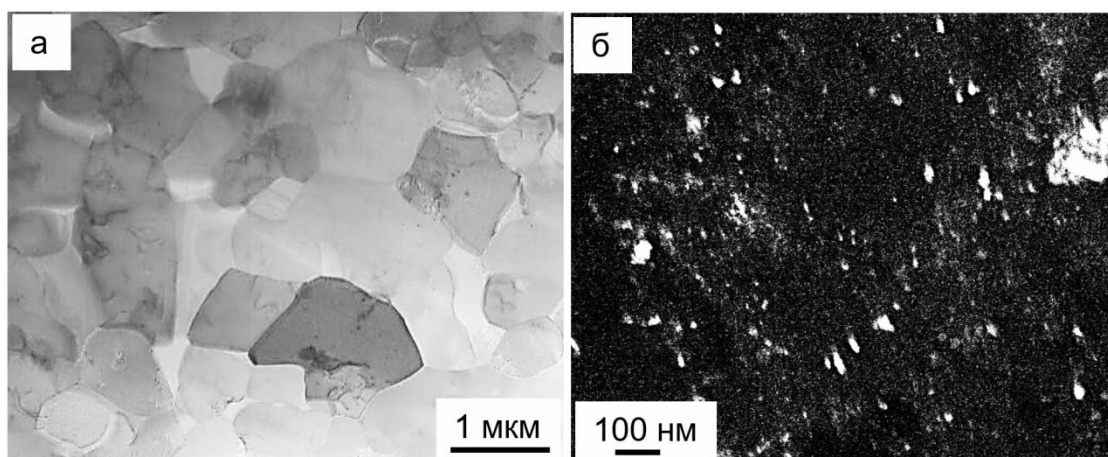


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры сплава Al-Ti-N, сформированного комбинированным электронно-ионно-плазменным методом в едином вакуумном цикле

### Результаты исследования и их обсуждение.

Анализ равновесных диаграмм состояния системы Al-Ti-N [6; 7] выявил возможность присутствия в сплаве чистых металлов, двойных и тройных соединений (рис. 1).

Методами рентгенофазового анализа выявлено наличие  $\alpha$ -Ti (5,24 mass. %),  $\text{Al}_3\text{Ti}$  (58,43 mass. %), AlN (36,33 mass. %). Методами электронной микроскопии установлено формирование в поверхностном слое толщиной до 20 мкм субмикроструктурной (0,2–0,9 мкм) структуры (рис. 2, а) с наноразмерной (10–20 нм) субструктурой (рис. 2, б).

Выявлено, что микротвердость сформированного электронно-ионно-плазменным методом в едином вакуумном цикле слоя более чем в 9 раз превышает твердость исходного материала, износостойкость – более чем в 450 раз, коэффициент трения меньше коэффициента трения исходного материала более чем в 3,5 раза.

**Заключение.** Показано, что метод электронно-ионно-плазменного модифицирования в едином вакуумном цикле позволяет сформировать многоэлементный многофазный металлокерамический поверхностный слой, механические и трибологические свойства

которого многократно превосходят свойства исходного технически чистого алюминия А7.

### Библиографические ссылки

1. Калачев Б. А., Елагин В. И., Ливанов В. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М. : МИСиС, 2005. 432 с.
2. Белецкий В. М., Кривов Г. А. Алюминиевые сплавы. Состав, свойства, технология, применение. Киев : КОМИНТЕХ, 2005. 365 с.
3. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов : учебник / В. А. Грибков, Ф. И. Григорьев, Б. А. Калинин и др. М. : Круглый стол, 2001. 528 с.
4. Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов / К. К.Кадыржанов, Ф. Ф.Комаров, А. Д. Погребняк и др. М. : Изд-во МГУ, 2005. 640 с.
5. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов / под ред. Н. Н. Ковалева, Ю. Ф. Иванова. Томск : Изд-во НТЛ, 2016. 312 с.
6. Phases and Phase Equilibria in the Quaternary System Ti-Cu-Al-N at 850°C. / N. Durlu, U. Gruber,

M. A. Pietzka et al // *Z. Metallkd.*, 1997. Vol 97(5). P. 390–400.

7. Procopio A. T., El-Raghy T., Barsoum M. W. Synthesis of  $Ti_4AlN_3$  and Phase Equilibria in the Ti-Al-N System // *Metall. Mater. Trans.*, 2000. Vol. 31 A(2). P. 373–378.

### References

1. Kalachev B. A., Elagin V. I., Livanov V. A. *Metalurgy and heat treatment of non-ferrous metals and alloys* [Metallurgiya i obrabotka tsvetnykh metallov i splavov] Moscow: MISiS, 2005. P. 432. (In Russ.)

2. Beletsky V. M., Krivov G. A. *Aluminum alloys. Composition, properties, technology, application*. [Aluminievye splavy. Sostav, svoystva, tehnologiya, primeneniye] Kiev : COMINTECH, 2005. P. 365. (In Russ.)

3. *Perspective radiation-beam technologies of material processing* [Perspektivniye radiatsionno-puchkoviye tehnologii obrabotki materialov] / V. A. Gribkov, F. I. Grigoriev, B. A. Kalin, et al. Moscow: Krugliy stol, 2001. P. 528. (In Russ.)

4. *Ion-beam and ion-plasma modification of materials* [Ionno-luchevaya i ionno-plazmennaya modifikatsiya materialov] / K. K. Kadyrzhanov, F. F. Komarov, A. D. Pogrebnyak, et al. Moscow: Publishing house of MSU, 2005. P. 640. (In Russ.)

5. *Electron-ion-plasma modification of the surface of non-ferrous metals and alloys* [Electronno-ionno-plazmennaya modifikatsiya poverkhnosti tsvetnykh metallov i splavov] / Ed. N. N. Koval, Yu. F. Ivanov. Tomsk: Publishing house of NTL, 2016. P. 312. (In Russ.)

6. Phases and Phase Equilibria in the Quaternary System Ti-Cu-Al-N at 850 °C. / N. Durlu, U. Gruber, M. A. Pietzka et al // *Z. Metallkd.*, 1997. Vol. 97 (5). P. 390–400.

7. Procopio A. T., El-Raghy T., Barsoum M. W. Synthesis of  $Ti_4AlN_3$  and Phase Equilibria in the Ti-Al-N System // *Metall. Mater. Trans.*, 2000. Vol. 31A (2). P. 373–378.

© Иванов Ю. Ф., Ереско С. П., Ахмадеев Ю. Х., Лопатин И. В., Клопотов А. А., 2018

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИИ КАРДАННЫХ ПЕРЕДАЧ

В. И. Ковалев, Д. А. Романенко\*, Е. В. Кукушкин

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

\*E-mail: romanenko.dmitriy.97@mail.ru

*Предложена конструкция устройства для измерения вибрации карданных передач, которое применяется в стенде для испытания карданных передач. Устройство включает в себя два аналоговых датчика вибрации, расположенных по разные стороны карданного вала, которые электрически подключены к аналого-цифровому преобразователю, оптический энкодер, концевой выключатель, блок питания, аппаратную платформу, персональный компьютер.*

*Ключевые слова: стенд для испытаний карданных передач, система для компенсации вибрации, вибрационный датчик, энкодер.*

## DEVICE FOR MEASURING VIBRATION OF UNIVERSAL JOINT GEARS

V. I. Kovalev, D. A. Romanenko\*, E. V. Kukushkin

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

\*E-mail: romanenko.dmitriy.97@mail.ru

*The construction of the device for measuring vibration of universal joint gears for using on the stand for universal joint gears testing is proposed. The device includes two analog vibration sensors located on opposite sides of the universal joint shaft which are electrically connected to the analog-to-digital converter, optical encoder, limit switch, power supply, hardware platform, personal computer.*

*Keywords: stand for testing universal joint gears, beat compensation system, vibration sensor, encoder.*

**Введение.** В настоящее время во многих устройствах используются карданные передачи. В результате вращения карданных валов проявляется дисбаланс, который существенно уменьшает срок службы карданных передач. Кроме того, из-за вибраций карданных передач могут возникать неисправности и у агрегатов, связанных с карданными передачами.

Актуальность обусловлена тем, что карданные передачи широко применяются в промышленности. Вибрации карданных передач могут приводить к неисправностям как ведущего, так и ведомого мостов, коробки передач, элементов карданной передачи и прочих агрегатов. И производители, и потребители данных устройств заинтересованы в увеличении срока службы карданных передач.

Цель работы состоит в создании устройства, для измерения вибраций карданных передач в процессе их испытаний, что предоставит возможность, посредством детального анализа вибрационных нагрузок, уменьшать вибрации карданных передач. Так же это необходимо и для повышения точности испытаний карданных передач на стенде для испытания карданных передач, конструкция которого описана в работах [1–3].

**Основная часть.** Вибрационная нагрузка обусловлена неравномерностью вращения карданного вала. Кроме того, происходит перекося тел качения в игольчатом подшипнике карданного шарнира под

влиянием вибрационных нагрузок [4]. Для начала необходимо отследить вибрации и понять, в какой точке окружности вращения вибрации максимальны. Для этого мы используем стенд для испытания карданных передач [5–10]. Предложенное устройство для измерения вибрации карданных передач (рис. 1, 2), которое применяется в стенде для испытания карданных передач, включает в себя два аналоговых датчика вибрации, расположенных по разные стороны карданного вала, которые электрически подключены к аналого-цифровому преобразователю, оптический энкодер, концевой выключатель, блок питания, аппаратная платформа для подключения к персональному компьютеру. При вращении электродвигателя стенда для испытания карданных передач вращается карданный вал, вибрацию с которого измеряют два датчика вибрации и передают сигнал на аналого-цифровой преобразователь. Угол вращения карданного вала определяется с помощью оптического энкодера. Начальная координата вращения карданного вала определяется с помощью концевого выключателя. На микроконтроллер, работающий от блока питания, поступают данные с оптического энкодера, концевого выключателя и аналого-цифрового преобразователя. Микроконтроллер через выводы последовательного интерфейса подключается к последовательному порту персонального компьютера.

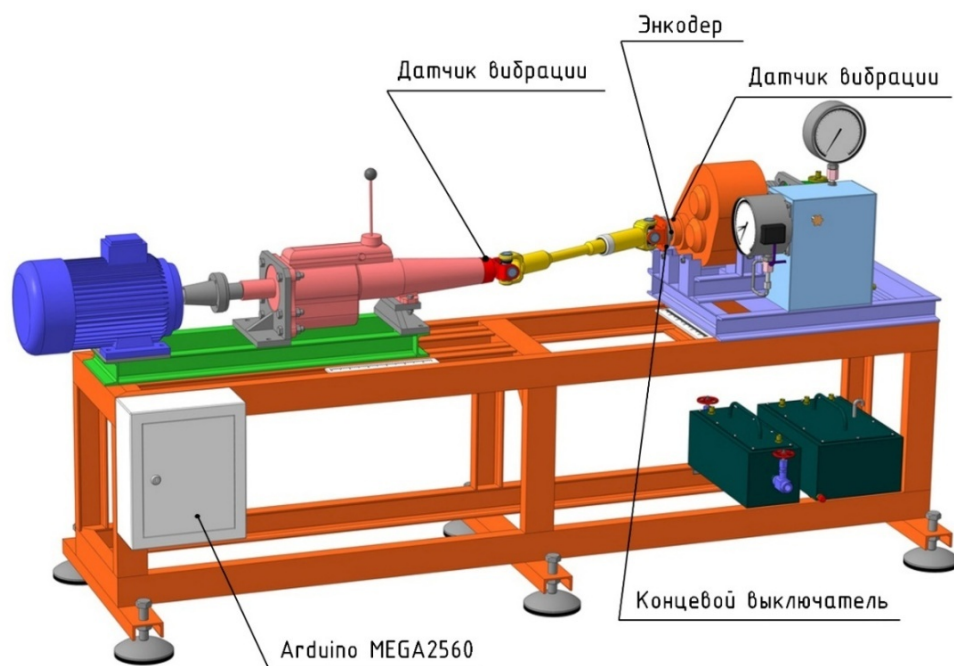


Рис. 1. Макет станда для испытания карданных передач

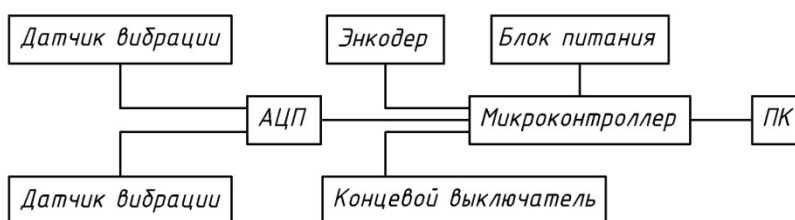


Рис. 2. Принципиальная схема устройства измерения вибрации карданных передач

Информацию о вибрации можно получить при считывании датчиками вибрации ABC 017-02 на определенных углах вращения карданного вала. Рабочий диапазон частот датчика вибрации – от 20 Гц до 30000 Гц, что позволит с достаточной точностью определить силу и область наибольшей вибрации. Эта информация отправляется в аппаратную платформу Arduino на основе микроконтроллера ATmega2560. Частота работы МК ATmega2560–16МГц. При настройках по умолчанию используется делитель 128(ADPS[2:0]=[111]), а это значит, что АЦП работает на частоте  $16/128 \text{ МГц} = 125 \text{ КГц}$ , что укладывается в данные технической документации – 50-200 КГц. Эта частота позволяет обеспечить быструю обработку данных с датчиков вибрации и оптического энкодера и сопоставить значения с них. Оптический энкодер считывает угол вращения вала в пространстве. Инкрементный энкодер необходим, чтобы преобразовать угловое положение вала в цифровой код. Используются прерывания аппаратной платформы, преобразования выполняются с четверной точностью. Положение вала мы можем определять с точностью до 3 значений на каждый градус вращения карданного вала

[9]. Также для обеспечения работоспособности необходим концевой выключатель для определения положения при запуске и начале работы системы. На основе этих данных мы можем выявить, с достаточной точностью, на каком этапе вращения вибрация вала максимальна и соответственно компенсировать эти «проблемные» участки.

**Заключение.** В заключении хотим отметить, что данное устройство позволит продлить срок службы агрегатов, использующих карданные передачи, за счет своевременной балансировки карданных передач. В результате получаем визуальное представление вибраций карданной передачи и рекомендации по закреплению грузов на карданном валу для уменьшения вибрации.

#### Библиографические ссылки

1. 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.
2. Расчет гидравлической системы тормозного устройства станда для испытания трансмиссий транс-

портно-технологических машин / А. С. Ереско, С. П. Ереско, Т. Т. Ереско и др. // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2016. № 4. С. 60–79. Doi: 10.15593/24111678/2016.04.06.

3. Конструкция стенда для проведения испытаний карданных шарниров на игольчатых подшипниках в широком диапазоне размеров с изменением угла излома карданной передачи / Е. В. Кукушкин, С. П. Ереско, Т. Т. Ереско и др. // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2016. № 2. С. 58–73. Doi: 10.15593/24111678/2016.02.05.

4. Влияние вибрационных нагрузок на процесс перекоса тел качения в игольчатом подшипнике карданного шарнира / С. П. Ереско, Т. Т. Ереско, Е. В. Кукушкин, В. А. Меновщиков // Вестник машиностроения. 2018. № 5. С. 10–15.

5. Пат. 149002 Российская Федерация, МПК7 G01M 13/02. Стенд для испытаний карданных передач / Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А., Ереско С. П., Ереско Т. Т. № 2014120845 ; заяв. 22.05.2014 ; Опубл. 20.12.2014. Бюл. № 35. 1 с.

6. Пат. 162876 Российская Федерация, МПК7 G01M 13/02. Стенд для испытаний карданных передач / Ереско С. П., Ереско А. С., Ереско Т. Т. и др. № 2015157365 ; заяв. 30.12.2015 ; Опубл. 27.06.2016. Бюл. № 18. 2 с.

7. Пат. 2649601 Российская Федерация, МПК7 G01N 13/00. Стенд для испытания карданных передач / Ереско С. П., Ереско А. С., Ереско Т. Т. и др. ; № 2016140015; заявл. 11.10.2016; опубл. 04.04.2018. Бюл. №10. 10 с.

8. Определение динамических параметров привода экспериментального стенда для исследования карданных передач / А. В. Стручков, Е. В. Кукушкин, С. П. Ереско, Т. Т. Ереско // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 3. С. 638–644.

9. Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В., Орлов А. А. Разработка измерительной системы стенда для испытания карданных передач // Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. науч. конф. ; СибГУ им. акад. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2017. С. 559–561.

10. 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.

## References

1. Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V. et al. [Planning of experiment on research of cardan transmissions on the needle-shaped bearing]. *Vestnik SibGAU*. 2016. No. 17. P. 1062-1071. (In Russ.)

2. Eresko A. S., Eresko S. P., Eresko T. T. et al. [Calculation of the hydraulic system of brake device of stand for the test of transmissions of transport-technological machines]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2016. No. 4. P. 60–79. Doi: 10.15593/24111678/2016.04.06. (In Russ.)

3. Kukushkin E. V., Eresko S. P., Eresko T. T. et al. [Stand construction for testing the universal joint on needle bearings in wide range of sizes with the angle changing driveline]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2016. No. 2. P. 58–73. Doi: 10.15593/24111678/2016.02.05. (In Russ.)

4. Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V. et al. [Influence on the process vibration loads sag rolling elements in the universal joint]. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2018. No. 5. P. 10–15. (In Russ.)

5. Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A., Eresko S. P. et al. Stend dlya ispytaniya kardannykh peredach. [The test stand driveline]. Patent RF, No. 149002, 2014.

6. Eresko S. P., Eresko A. S., Eresko T. T. et al. Stend dlya ispytaniya kardannykh peredach. [The test stand driveline]. Patent RF, No. 162876, 2016.

7. Eresko S. P., Eresko A. S., Eresko T. T. et al. Stend dlya ispytaniya kardannykh peredach [The test stand driveline]. Patent RF, No. 2649601, 2018.

8. Struchkov A. V., Kukushkin E. V., Eresko S. P., Eresko T. T. [Determination of dynamic parameters of drive of experimental stand for research of cardan transmissions]. *Vestnik SibGAU*. 2016. No. 17. P. 638–644 (In Russ.)

9. Eresko T. T., Kukushkin E. V., Orlov A. A. [Development of the measuring system of the stand for testing the universal joint transmissions]. *Materialy XXI mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXI Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2017. P. 559–561. (In Russ.)

10. Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V. et al. [Comparative analysis of structures test apparatus for universal joint]. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologiy*. 2017. Vol. 18, No. 4. P. 902–909. (In Russ.)

© Ковалев В. И., Романенко Д. А., Кукушкин Е. В., 2018



## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРЕСТОВИНЫ КАРДАННОГО ШАРНИРА

Е. В. Кукушкин

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

*Предложена методика оптимизации параметров конструкции крестовины карданного шарнира со сменными шипами. В результате проведенного регрессионного анализа получена регрессионная модель эквивалентных напряжений, табулированием которой получены значения конструктивно-режимных параметров, обеспечивающих минимальный уровень напряжений конструкции крестовины.*

*Ключевые слова: карданный шарнир, конечно-элементный анализ, напряженно-деформированное состояние.*

## INVESTIGATION OF THE STRESSED-DEFORMED CONDITION OF THE CROSSPIECES OF UNIVERSAL JOINTS

E. V. Kukushkin

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

*A technique for optimizing the design parameters of the crosspiece for the universal joint with replaceable spikes is proposed. As a result of the regression analysis, a regression model of equivalent stresses was obtained, tabulating of which the values of constructive-regime parameters providing the minimum stress level of the cross construction were obtained.*

*Keywords: universal joint, finite element analysis, stress-strain state.*

Одним из недостаточно долговечных узлов, ограничивающих надежность механических трансмиссий транспортно-технологических машин, является карданная передача. [1] Разработана конструкция карданного шарнира [2; 3] по патенту [4], сравнительный анализ конструкций карданных шарниров представлен в работе [5]. Новая конструкция карданного шарнира со сменными шипами крестовины требует обоснованной конструкторской проработки и проведения прочностных расчетов, которые актуальнее всего выполнять с использованием САПР и пакетов конечно-элементного анализа. Подобная методика была выполнена авторами в работе [6], где исследовали конструкции составной унифицированной вилки карданной передачи. Авторами работы [7] были проведены исследования напряженного-деформированного состояния ремонтпригодной крестовины карданного шарнира. В работе [8] дана оценка напряженно-деформированного состояния карданной передачи привода сельскохозяйственных машин. В работе [9] выполнена оптимизация карданных передач автомобилей «БелАЗ» с использованием САПР. Поэтому исследования в области напряженно-деформированного состояния узлов и агрегатов транспортно-технологических машин является актуальными.

Методика оптимизации параметров конструкции крестовины карданного шарнира со сменными шипами включала в себя следующие этапы:

1. Оценка прочностных характеристик серийной крестовины карданного шарнира (рис. 1, а) и усовершенствованной крестовины карданного шарнира со сменными шипами (рис. 1, б) при нагружении номинальным вращающим моментом в 170 Нм (3,269 кН);

2. Оптимизация размеров соединения шипа и корпуса крестовины карданного шарнира со сменными шипами.

Для проведения расчетов применяли библиотеку конечно-элементного анализа FEM системы КОМПАС-3D (компании «АСКОН», г. Санкт-Петербург), разработанную совместно с НТЦ «Автоматизированное проектирование машин» (г. Королёв).

Второй этап исследований основан на анализе карт напряжений моделей с указанием локаций максимальной концентрации напряжений. На всех картах максимальные напряжения наблюдаются в месте перехода шипа к корпусу крестовины. Предполагается, что форма и размеры элементов соединения влияют на прочностные характеристики конструкции крестовины карданного шарнира, поэтому схема соединения шипов и корпуса крестовины будет в виде шестигранника, для того, чтобы была возможность реализовать способ технического обслуживания карданных передач авторской разработки [10; 11] по патенту [12], повышение долговечности которого обосновано в работе [13].

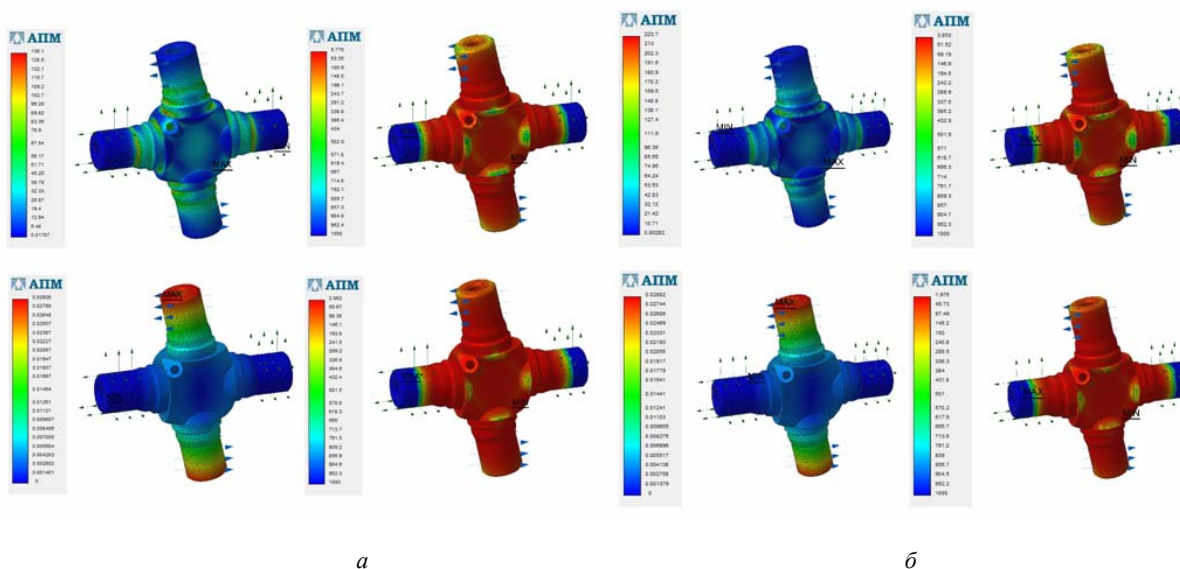


Рис. 1. Конечно-элементный анализ крестовин карданных шарниров

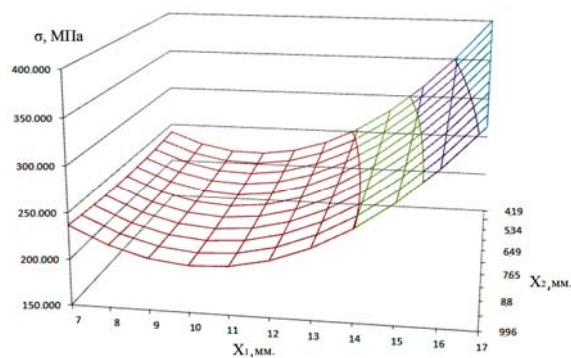


Рис. 2. График поверхности отклика значений напряжений

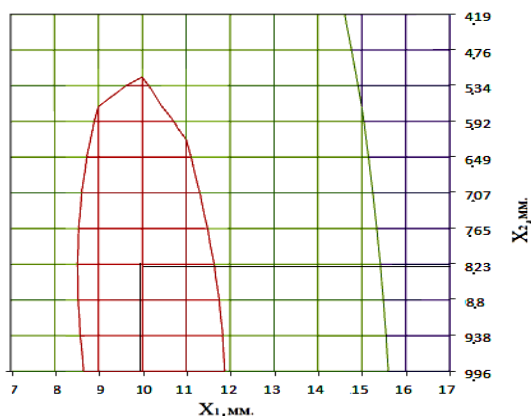


Рис. 3. Контурная диаграмма поверхности отклика

Оптимизация параметров проводилась на основе методов регрессионного анализа, цель которого – найти такое сочетание параметров размеров сечения шестигранника  $X_1$  (размер под ключ) и  $X_2$  (длина) сменного шипа крестовины, при котором обеспечивается минимальный уровень эквивалентных напряжений в опасном сечении шипа крестовины.

В результате проведенного регрессионного анализа получена регрессионная модель эквивалентных напряжений:

$$\sigma = 544,695 - 6,367 \cdot 10^3 \cdot X_1 - 443,624 \cdot X_2 + 6,951 \cdot 10^3 \cdot X_1 \cdot X_2 + 3,443 \cdot 10^4 \cdot X_1^2 + 6,238 \cdot 10^3 \cdot X_2^2. \quad (1)$$

В результате табулирования функции (1) получены значения конструктивно-режимных параметров, обеспечивающих минимальный уровень напряжений конструкции крестовины:  $X_1 = 10$ ,  $X_2 = 8,2$  (см. рис. 2, 3). В результате выполненных расчетов и проведенных исследований средняя погрешность аппроксимации составила 9,62601 %.

Анализ серийной крестовины карданного шарнира позволил установить граничные значения параметров эквивалентных напряжений, перемещений, коэффициентов запаса усталостной прочности и текучести. На основе данных вычислительного эксперимента получена регрессионная модель эквивалентных напряжений, связывающая конструктивно-режимные параметры и результирующие эквивалентные напряжения в опасном сечении крестовины карданного шарнира. Найдены оптимальные размеры сменных шипов крестовины с наименьшими напряжениями.

Полученные результаты дают возможность изготовить опытный образец усовершенствованной карданной передачи и провести экспериментальные исследования на оборудовании авторской разработки, описанном в работах [14–17].

#### Библиографические ссылки

1. Пастухов А. Г., Тимашов Е. П. Экспертная оценка работоспособности сельскохозяйственной техники / Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2011. № 4. С. 25–27.
2. Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А. Конструкция карданного шарнира со сменными шипами крестовины / Решетневские чтения: материалы XVI Междунар. науч. конф.; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2014. С. 298–300.
3. Kukushkin E. V., Eresko T. T., Mednikov D. M. New construction of universal joints / Materials 14 International Scientific Conference «Youth. Society. Modern science, technologies & innovations», 2015. P. 232–234.
4. Пат. 141878 Российская Федерация, МПК7 F16 D 3/26. Карданный шарнир / Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А., Ереско С. П., Ереско Т. Т. ; № 2014102339/11 ; заявл. 24.01.2014 ; опубл. 20.06.2014. Бюл. № 17. 2 с.
5. Сравнительный анализ конструкций карданных шарниров неравных угловых скоростей / С. П. Ереско, Т. Т. Ереско, Е. В. Кукушкин и др. // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 3. С. 720–728.
6. Пастухов А. Г., Тимашов Е. П., Кравченко И. Н. Исследование напряженно-деформированного состояния деталей модернизируемых узлов трансмиссий различных машин // Строительные и дорожные машины. 2015. № 8. С. 20–26.
7. Тимашов Е. П., Пастухов А. Г. Исследование напряженно-деформированного состояния ремонтно-пригодной крестовины карданного шарнира // Тр. всероссийского научно-исследовательского технологического института ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка. 2013. Т. 112. Ч. 2. С. 100–105.
8. Кухтов В. Г., Фесун А. А., Шевченко М. А. Оценка напряженно-деформированного состояния

карданной передачи привода сельскохозяйственных машин / Вестник ХНТУСГ. 2012. № 128. С. 219–225.

9. Кравченко В. И., Костюкович Г. А., Кипнис М. Е. Оптимизация карданных передач автомобилей «БелАЗ» с использованием регионального распределенного сегмента «СКИФ-UNICORE» / Вестник ГрГУ. 2011. № 1 (116). С. 68–77.

10. Способ технического обслуживания карданных передач / С. П. Ереско, Т. Т. Ереско, Е. В. Кукушкин и др. // Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. науч. конф. ; СибГУ им. ак. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2017. С. 568–570.

11. Method for service universal joints / M. E. Ivanov, E. V. Kukushkin, S. V. Kukushkin и др. // Journal of Advanced Research in Technical Science. No. 7, North Charleston, 2017. P. 37–41.

12. Пат. 2640157 Российская Федерация, МПК7 F16 D 3/26. Способ технического обслуживания карданных шарниров / Ереско С. П., Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В. и др. ; № 2016117442 ; заявл. 04.05.2016; опубл. 26.12.2017. Бюлл. № 36 5 с.

13. Повышение долговечности карданной передачи за счет совершенствования конструкции карданного шарнира и способа его технического обслуживания / С. П. Ереско, Т. Т. Ереско, Е. В. Кукушкин и др. // Строительные и дорожные машины. 2018. № 1. С. 45–51.

14. Ереско С. П., Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В. и др. Сравнительный анализ конструкций испытательных стендов для испытания карданных шарниров // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 902–909.

15. Расчет гидравлической системы тормозного устройства стенда для испытания трансмиссий транспортно-технологических машин / А. С. Ереско, С. П. Ереско, Т. Т. Ереско и др. // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2016. № 4. С. 60–79. Doi: 10.15593/24111678/2016.04.06.

16. Определение динамических параметров привода экспериментального стенда для исследования карданных передач / А. В. Стручков, Е. В. Кукушкин, С. П. Ереско, Т. Т. Ереско // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 3. С. 638–644.

17. Меновщиков В. А., Орлов А. А. Конструкция стенда для проведения испытаний карданных шарниров на игольчатых подшипниках в широком диапазоне размеров с изменением угла излома карданной передачи / Е. В. Кукушкин, С. П. Ереско, Т. Т. Ереско и др. // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2016. № 2. С. 58–73. Doi: 10.15593/24111678/2016.02.05.

#### References

1. Pastukhov A. G., Timashov E. P. [Expert evaluation of the efficiency of agricultural machinery]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2011. No. 4. P. 25–27.
2. Eresko T. T., Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A. [The design of the universal joint with replaceable spikes spider]. *Materialy XVIII mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XV Intern.

- Scientific. Conf “Reshetnev reading”]. Krasnoyarsk, 2014. P. 298–300. (In Russ.)
3. Kukushkin E. V., Eresko T. T., Mednikov D. M. New construction of universal joints. Materials 14-th International Scientific Conference “Youth. Society. Modern science, technologies & innovations”, 2015. P. 232–234.
  4. Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A., Eresko S. P., Eresko T. T. *Kardannyi sharnir* [Joint]. Patent RF. No. 141878, 2014.
  5. Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V. et al. [Comparative analysis of structures universal joints unequal angular velocity]. *Vestnik SibGAU*. 2015. No. 16. P. 720–728. (In Russ.)
  6. Pastukhov A. G., Timashov E. P., Kravchenko I. N. [Investigation of the stressed-deformed state of the parts of the modernized transmission units of various machines]. *Stroitel'nye i Dorozhnye mashiny*. 2015. No. 8. P. 20–26. (In Russ.)
  7. Timashov E. P., Pastukhov A. G. [Investigation of the stress-strain state of the repairable cross of the universal joint]. *Trudy GOSNITI*. 2013. No. 112. Vol. 2. P. 100–105.
  8. Kukhtov V. G., Fesun A. A., Shevchenko M. A. [Estimation of the stress-strain state of the universal joint drive transmission of agricultural machines]. *Vyesnik KhNTUSG*. 2012. No. 128. P. 219–225.
  9. Kravchenko V. I., Kostyukovich G. A., Kipnis M. E. [Optimization of universal joint gears of BelAZ vehicles using the regional distributed segment SKIF-UNICORE]. *Vestnik GrGU*. 2011. No. 1. Vol. 116. P. 68–77.
  10. Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V. et al. [Comparative analysis of structures test apparatus for universal joint]. *Materialy XXI mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii “Reshetnevskie chteniya”* [Materials XXI Intern. Scientific. Conf “Reshetnev reading”]. Krasnoyarsk, 2017. P. 568–570. (In Russ.)
  11. Ivanov M. E., Kukushkin E. V., Kukushkin S. V. et al. Method for service universal joints. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2017. No. 7. P. 37–41.
  12. Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V. et al. *Sposob tekhnicheskogo obsluzhivaniya kardannyh sharnirov*. [Method of technical maintenance of universal joint]. Patent RF. No. 2640157, 2017.
  13. Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V. et al. [Increasing the durability of the transmission for the account of improving the design of the and the method of its technical service]. *Stroitel'nye i Dorozhnye mashiny*. 2018. No. 1. P. 45–51. (In Russ.)
  14. Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V. et al. [Comparative analysis of structures test apparatus for universal joint]. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii*. 2017. Vol. 18, No. 4. P. 902–909. (In Russ.)
  15. Eresko A. S., Eresko S. P., Eresko T. T. et al. [Calculation of the hydraulic system of brake device of stand for the test of transmissions of transport-technological machines]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2016. No. 4. P. 60–79. Doi: 10.15593/24111678/2016.04.06. (In Russ.)
  16. Struchkov A. V., Kukushkin E. V., Eresko S. P. et al. [Determination of dynamic parameters of drive of experimental stand for research of cardan transmissions]. *Vestnik SibGAU*. 2016. No. 17. P. 638–644. (In Russ.)
  17. Kukushkin E. V., Eresko S. P., Eresko T. T. [Stand construction for testing the universal joint on needle bearings in wide range of sizes with the angle changing driveline]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2016. No. 2. P. 58–73. Doi: 10.15593/24111678/2016.02.05. (In Russ.)

УДК 66.015.23

## ГИДРОДИНАМИКА ВИХРЕВОЙ КОНТАКТНОЙ СТУПЕНИ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ

А. В. Кустов, Я. С. Гончарова, А. А. Карелина, М. М. Литвинова

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 ректификационной ступени с тангенциальными и осевыми завихрителями потока. Определены режимы течения газо-жидкостной смеси, получены зависимости для расчета скорости газа.*

*Ключевые слова: ректификация, массообмен, гидродинамика, критическая скорость, режимы течения.*

## HYDRODYNAMICS OF THE VORTEX CONTACT STEP OF THE RECTIFICATION COLUMN

A. V. Kustov, Ya. S. Goncharova, A. A. Karelina, M. M. Litvinova

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 hydrodynamic study of a vortex contact rectification stage with tangential and axial flow sweepers are presented. The flow regimes of the gas-liquid mixture are determined, and the dependences for calculating the gas velocity are obtained.*

*Keywords: rectification, mass transfer, hydrodynamics, critical velocity, flow regimes*

Анализ вихревых контактных ступеней для ведения процесса ректификации показывает, что использование винтовых вставок, а также лопастных завихрителей в ректификационных колоннах не позволяет обеспечить интенсивное диспергирование газа и высокую удерживающую способность по жидкости по причине достаточно больших размеров каналов для прохода газа. Наибольший интерес для проведения процесса ректификации представляет контактные ступени, тарелки которых выполнены из тонких листов снабженных профилированными щелями, отогнутые кромки которых образуют каналы для прохода пара. А также устройства с тангенциальным вводом газа. В указанных конструкциях, газ, проходя через щели, приобретает высокую скорость, равномерно распределяется в слое жидкости на ступени, интенсивно дробится, образуя вращающуюся газо-жидкостную смесь [1].

Гидродинамика контактных ректификационных ступеней исследовалась на системе воздух – жидкость. Расход газа изменялся от 1 до 40 м<sup>3</sup>/час и измерялся нормальной диафрагмой. В качестве модельных жидкостей использовались: вода, 96 % об. этиловый спирт, вода с добавкой ПАВ, вода с добавкой глицерина. Температура жидкости и газа варьировалась в пределах 10–80 °С. Внутренний диаметр колонны составил равным 50–120 мм, величина зазора каналов для выхода газа варьировалась от 0,7 до 2 мм, ширина – от 5 до 36 мм, а их количество составило 4–36 шт.

Перепад давления на ступени измерялся дифференциальным манометром.

**Режимы течения.** В зависимости от расхода газа можно выделить три основных режима течения газо-жидкостной смеси (рис. 1): 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 каналов [2; 3].



Рис. 1. Фотографии газо-жидкостной смеси на ступени при  $D = 114$  мм:  
а – барботажный режим; б – кольцевой; в – пленочный

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. При допущениях о том, что вращающийся цилиндрический газожидкостный слой ведет себя как твердое тело, силы инерции и давления равномерно распределены по высоте потока условие равновесия сил в момент образования кольцевого режима можно представить в виде

$$m \omega^2 R \geq \rho g H (1 - \varphi) S, \quad (1)$$

где  $m$  – масса жидкости;  $\omega$  – угловая скорость вращения;  $R$  – радиус вращения;  $H$  – высота столба газожидкостной смеси;  $S$  – внутренняя поверхность вращающегося газожидкостного слоя;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho$  – плотность жидкости;  $\varphi$  – газосодержание.

Тогда из (1) несложно получить

$$\omega = \sqrt{\frac{gH(1-\varphi)}{\delta R}}, \quad (2)$$

где  $\delta$  – толщина газожидкостного слоя.

Согласно (2), скорость газа, при которой наступает кольцевой режим течения, зависит от объема жидкости на ступени и газосодержания и величины радиуса окружности, на которой размещены каналы для прохода газа. Увеличение  $R$  и  $\varphi$  приводит к снижению критической скорости газа  $u_k$ , а рост объема жидкости на ступени к ее повышению [4; 5; 6]. При допущении, что начальное вращение жидкости обеспечивается касательными напряжениями газа о жидкость соприкасающейся с поверхностью каналов для прохода газа можно записать

$$F_T R \omega = N, \quad (3)$$

где  $F_T$  – сила, обусловленная трением газа о поверхность жидкости;  $N$  – мощность.

Выражение угловой скорости, при которой обеспечивается смена режимов примет вид

$$\omega = \frac{N}{\tau_i \cdot f \cdot R}, \quad (4)$$

где  $\tau_i$  – касательные напряжения;  $R$  – радиус размещения каналов для прохода газа на тарелке;  $f = \delta_0 \cdot l \cdot n$  – площадь каналов;  $\delta_0$  – зазор канала;  $l$  – длина канала;  $n$  – количество каналов.

Согласно (4) с увеличением площади сечения каналов для прохода газа (или коэффициента крутки  $A = f/F$ ) переход в кольцевой режим течения осуществляется при меньшей скорости газа. Экспериментальные значения критической скорости газа от фактора крутки для разных типов завихрителей и объема жидкости на ступени, показаны на рис. 2. На основе полученного экспериментального материала зависимость для расчета критической скорости газа имеет следующий вид

$$u_k = C (f/F)^{-0,8} (H/D)^{0,7} (\rho_{ж} (1 - \varphi) / \rho_{г}), \quad (5)$$

где коэффициент  $C = 0,007$  для 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 диаметре завихрителя контактной ректификационной ступени (80–120) мм, угле наклона каналов 30–40° к касательной и величине коэффициента динамической вязкости жидкости  $\mu_{ж} = (0,6–1,6) \cdot 10^{-3}$  Па·с. Переход в пленочный режим для ступени с осевыми завихрителями осуществляется при  $u_k/u_{п} \approx 0,6$ , а при тангенциальном при  $u_k/u_{п} \approx 0,5$ . Как видно, контактные ступени с тангенциальным вводом газа имеют больший рабочий диапазон устойчивого кольцевого течения и, поэтому, рекомендуется к использованию в инженерной практике.

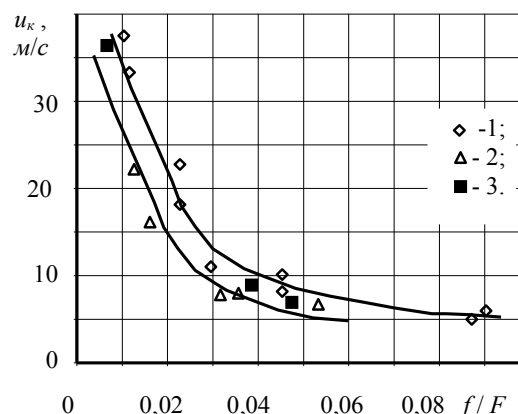


Рис. 2. Зависимость критической скорости газа от коэффициента крутки на системе воздух-вода при  $D = 100$  мм,  $V = 200$  мл;  $t = 15$  °С.

Экспериментальные точки (1–3):

1 – многолопастной осевой завихритель при  $n = 18$ ,  $\delta_0 = 1$  мм,  $l = 10$  мм; 2 – тангенциальный завихритель при  $n = 18$ ,  $\delta_0 = 1$  мм,  $l = 10$  мм; 3 – многолопастной осевой конический завихритель при  $n = 16$ ,  $\delta_0 = 1$  мм,  $l = 26$  мм

### 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. Кустов А. В. Гидродинамика и массообмен на вихревых ректификационных ступенях при переработки растительного сырья : автореф. дис. ... канд. техн. наук ; 05.21.03 ; СибГТУ. Красноярск, 2010.
3. 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.
4. Вихревые ректификационные ступени с низким гидравлическим сопротивлением / А. В. Кустов, П. С. Щастовский, Я. С. Гончарова и др. // Химическая промышленность сегодня. 2017. № 1. С. 34–41.
5. Исследование вихревых ректификационных ступеней / А. В. Кустов, Н. А. Артишева, В. Г. Межов и др. // Химия растительного сырья. 2016. № 3. С. 125–134.
6. 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 vakuomom [Preparation of anhydrous ethanol during rectification under vacuum] // *Khvoynye boreal'noy zony*. 2012. № 3–4. P. 373–378.
2. Kustov A. V. *Gidrodinamika i massoobmen na vikhrevykh rektifikatsionnykh stupenyakh pri pererabotki rastitel'nogo syr'ya* [Hydrodynamics and mass transfer on vortex rectification stages during processing of plant raw materials.]. Avtoreferat dis... kand.tekhn.nauk; 05.21.03. Krasnoyarsk: SibGTU, 2010.
3. 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.
4. *Vikhrevye rektifikatsionnye stupeni s nizkim gidravlicheskim soprotivleniem* [Vortex rectification stages with low hydraulic resistance] / A. V. Kustov, P. S. Shchastovskiy, Ya. S. Goncharova et al. // *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya*. 2017. № 1. P. 34–41.
5. *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.
6. *Vikhrevye 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., Гончарова Я. С., Карелина А. А.,  
Литвинова М. М., 2018

УДК 66.015.23

## СОПРОТИВЛЕНИЕ ВИХРЕВОЙ КОНТАКТНОЙ СТУПЕНИ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ

А. В. Кустов\*, В. Г. Межов, Я. Ю. Брыксина, П. В. Харченко

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 исследований гидравлического сопротивления вихревых контактных ступеней ректификационной колонны и получены зависимости для его расчета. Проведена оценка влияния параметров контактной ректификационной ступени на общее гидравлическое сопротивление.*

*Ключевые слова: ректификация, контактные ступени, гидравлическое сопротивление, коэффициент гидравлического сопротивления.*

## RESISTANCE OF A VORTEX CONTACT STEP OF A RECTIFICATION COLUMN

A. V. Kustov\*, V. G. Mezhev, Ya. Yu. Bryksina, P. V. Kharchenko

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

*The results of studies of the hydraulic resistance of the vortex contact stages of the distillation column are presented and the dependences for its calculation are obtained. The effect of parameters of the contact rectification stage on the total hydraulic resistance.*

*Keywords: rectification, contact stages, hydraulic resistance, coefficient of hydraulic resistance*

Из всего многообразия вихревых контактных ступеней, представленных на рис. 1, для создания тепло-массообменных аппаратов наиболее перспективны контактные ступени с тангенциальными рис. 1 в, г и многолопастными осевыми завихрителями. Вследствии недостаточной информации по расчету гидравлического сопротивление ступеней указанных ступеней были проведены исследования на системе воздух–вода в контактных устройствах представленных на рис. 1 д и з.

Общее сопротивление контактной ректификационной ступени без учета влияния крутки газа на  $\Delta P$  вышележащей ступени можно представить в виде

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_m. \quad (1)$$

Сопротивление сухой тарелки обычно представляют в виде

$$\Delta P_c = \xi \frac{\rho_g u^2}{2} \quad (2)$$

и ступени со слоем жидкости

$$\Delta P_m = \rho g H (1 - \phi) + P_\lambda, \quad (3)$$

где  $\xi$  – коэффициент сопротивления сухой ступени;  $u$  – среднерасходная скорость газа на выходе из каналов;  $\rho_g$  – плотность газа;  $P_\lambda$  – Потери напора, вызванные касательными напряжениями на межфазной поверхности.

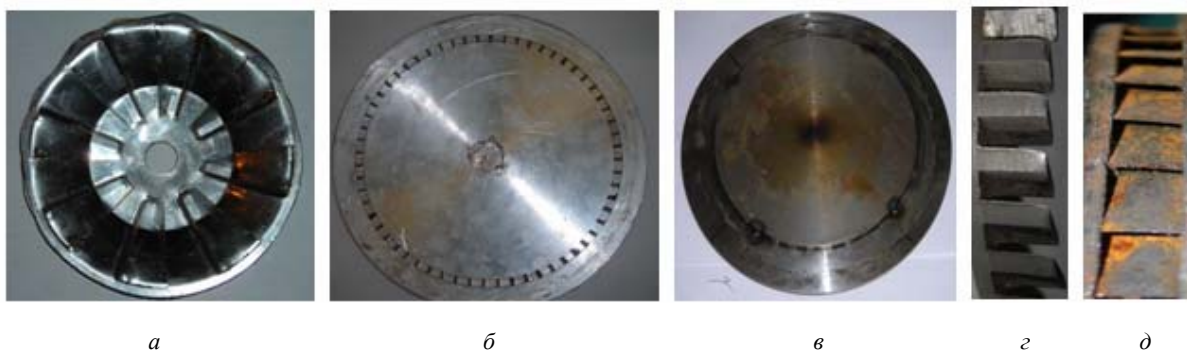


Рис. 1. Фотографии исследованных завихрителей:  
а – осевой многолопастной завихритель; б – осевой завихритель; в – тангенциальный завихритель; з, д – кромки тангенциального завихрителя



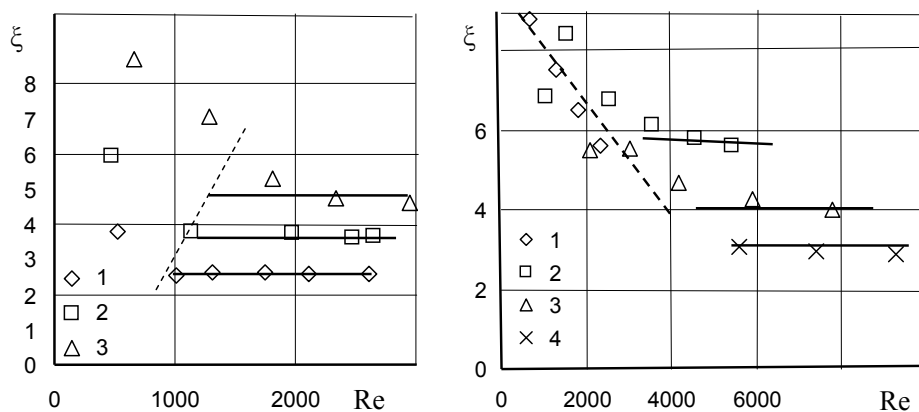


Рис. 2. Зависимость коэффициента сопротивления плоской контактной ступени

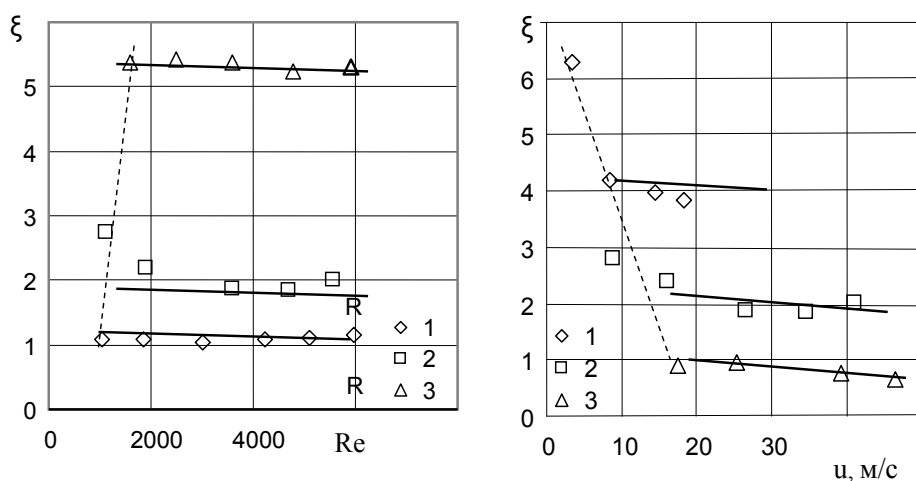


Рис. 3. Зависимость коэффициента сопротивления ангенциальной контактной ступени

Экспериментальные значения коэффициента сопротивления представлены на рис. 2 и 3.

Обработка экспериментальных данных (рис. 3) позволила получить зависимости для расчета коэффициента сопротивления в виде

$$\xi = 1,58 \ln \left( \frac{f}{F} \right) + 8,01, \quad (4)$$

Как показал анализ вклад сухой тарелки в общее сопротивление контактной ступени составил 50–60 %, вклад столба жидкости не превышает 20 %. Влияние трения газа о жидкость на сопротивление лежит в пределах 10 %.

#### 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. Кустов А. В. Гидродинамика и массообмен на вихревых ректификационных ступенях при переработки растительного сырья : автореф дис. ... канд. техн. наук ; 05.21.03. Красноярск: СибГТУ, 2010.

3. 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.

4. Вихревые ректификационные ступени с низким гидравлическим сопротивлением / А. В. Кустов, П. С. Щастовский, Я. С. Гончарова и др. // Химическая промышленность сегодня. 2017. № 1. С. 34–41.

5. Исследование вихревых ректификационных ступеней / А. В. Кустов, Н. А. Артищева, В. Г. Межов и др. // Химия растительного сырья. 2016. № 3. С. 125–134.

6. Вихревые контактные ступени для ректификации / Н. А. Войнов, 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 vakuu-mom [Preparation of anhydrous ethanol during rectification under vacuum] // Khvoynye boreal'noy zony. 2012. № 3–4. P. 373–378.

2. Kustov A. V. *Gidrodinamika i massoobmen na vikhrevykh rektifikatsionnykh stupenyakh pri pererabotki rastitel'nogo syr'ya* [Hydrodynamics and mass transfer on vortex rectification stages during processing of plant raw materials.]. Avtoreferat dis. ... kand. tekhn. nauk; 05.21.03. Krasnoyarsk: SibGTU, 2010.

3. 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.

4. *Vikhrevye rektifikatsionnye stupeni s nizkim gidravlicheskim soprotivleniem* [Vortex rectification stages with low hydraulic resistance] / A. V. Kustov,

P. S. Shchastovskiy, Ya. S. Goncharova et al. // *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya*. 2017. № 1. P. 34–41.

5. *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.

6. *Vikhrevye 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., Межов В. Г., Брыксина Я. Ю.,  
Харченко П. В., 2018

УДК 621.91

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ НА СТАНКАХ С ЧПУ

О. Н. Михалев<sup>1\*</sup>, А. С. Янюшкин<sup>1\*</sup>, В. С. Ереско<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова  
Российская Федерация, 428015, г. Чебоксары, просп. Московский, 15

<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: Mih\_tm@mail.ru

*При проектировании обработки в САМ-системе отсутствует связь траектории инструмента с характеристиками станка, инструментов и заготовки, это делает проектирование некачественным, что недопустимо в ракетно-космической отрасли.*

*Ключевые слова: интеллектуальная обработка, САД/САМ-система, управляющая программа, проектирование обработки, обработка на станках с ЧПУ.*

## DESIGN OF INTELLIGENT PROCESSING ON CNC MACHINES

O. N. Mikhalev<sup>1\*</sup>, A. S. Yanyushkin<sup>1\*</sup>, V. S. Eresko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Chuvash State University named after I. N. Ulyanov  
15, Moskovsky Av., Cheboksary, 428015, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: Mih\_tm@mail.ru

*When designing the machining in the CAM system, there is no connection of the tool path with the characteristics of the machine, tools and workpiece, this makes the processing not of high quality, which is unacceptable in the rocket and space industry.*

*Keywords: intelligent machining, CAD/CAM-system, CNC-program, machining design, machining on CNC machines.*

**Введение.** При разработке управляющей программы в САМ-системе наблюдается отсутствие тесной связи траектории инструмента с характеристиками станков, инструментов и обрабатываемого материала, организация подобной связи осуществляется силами программиста и полностью зависит от его знаний и опыта. Как следствие обработка получается не максимально эффективной, так как учесть все вручную довольно сложно. Поэтому требуется создание специального модуля для САМ-системы, позволяющего учитывать характеристики станка, инструмента, обрабатываемого материала и других характеристик технологической системы при генерации траектории перемещения инструмента. Одной из сложностей является создание математического обеспечения, позволяющего производить расчеты сложных кривых с учетом множества параметров обработки, обеспечивая максимальную производительность и благоприятные условия для резания в любой точке траектории.

Особое значение это имеет при обработке труднообрабатываемых материалов, таких как нержавеющие, титановые, жаропрочные и другие сплавы, широко применяемые в ракетно-космической, авиационной, автомобильной и многих других отраслях промышленности [1].

Протекающая сегодня Четвертая промышленная революция (Индустрия 4.0) призвана соединить цифровые технологии и промышленность в единое целое. Сегодня цифровизация и оцифровка промышленности движется большими темпами, происходит роботизация и автоматизация предприятий, создается единое цифровое пространство и реализовывается множество других цифровых решений. Одним из таких решений является создание интеллектуальной, адаптивной обработки на станках с ЧПУ.

**Модуль проектирования интеллектуальной фрезерной обработки.** Все станки с ЧПУ обладают различными техническими характеристиками, качеством, конструкцией и множеством других параметров. В виду данных различий обработка одной и той же детали на каждом станке происходит по-разному, с различными режимами, стратегиями и другими показателями обработки, которые указываются в САМ-системе на этапе проектирования обработки.

При разработке управляющих программ (УП) в САМ-системе все показатели обработки в большинстве случаев не зависят от характеристик станка, инструмента и обрабатываемого материала, а полностью устанавливаются на усмотрение технолога-программиста, что чаще всего является не оптимально. В момент обработки происходит либо перегрузка станка

и инструмента, что ведет к снижению их срока службы, либо к неиспользованию всех возможностей станка и инструмента, что в свою очередь ведет к низкой производительности. Как видно и тот и другой случай являются не оптимальными, а найти ту золотую середину, когда обработка будет происходить максимально быстро, при этом обеспечивая долгий срок службы станка и инструмента, вручную довольно сложно, практически невозможно и не рентабельно.

Таким образом, появляется необходимость создания специальных программных модулей для САМ-систем, которые будут учитывать все характеристики оборудования, инструмента и обрабатываемого материала, таким образом, обработка будет протекать в благоприятных условиях без перегрузок при этом будет достигаться максимальная производительность, необходимое качество обработки, максимальный срок службы станка, а также и максимальная стойкость инструмента, т. е. та самая золотая середина.

УП, созданная в таком модуле будет максимально соответствовать конкретному станку, инструменту, обрабатываемому материалу, а обработка по данной УП будет называться интеллектуальной.

При разработке такой УП не требуется множество проверок показателей обработки, все режимы резания модуль рассчитывает самостоятельно, учитывая нагрузку на инструменте и станке, причем делает это в считанные секунды.

Сегодня технолог-программист следит за опасными моментами в траектории и регулирует режимы обработки практически вручную, чтобы не увеличить износ или не сломать инструмент, для чего требуется много знаний и опыта. Используя модуль для интеллектуальной обработки работать в САМ-системе сможет человек с более низкой квалификацией и небольшим опытом.

Над такими модулями работают несколько компаний, такие как SolidCAM, Siemens и другие, чьи

САМ-системы уже оснащены подобными модулями, и они довольно хорошо зарекомендовали себя и указали дальнейший путь развития всех остальных САМ-систем. Наиболее известный модуль iMachining от компании SolidCAM, являясь первопроходцем, реализовался уже по всему миру и имеет серьезные наработки в этом направлении (рис. 1).

Задача разработки модулей для адаптивной обработки является довольно сложной, выходит на уровень искусственного интеллекта, и реализовать ее сразу невозможно, это иногда прослеживается и в работе существующих модулей, когда в реальности станок работает на пределе, хотя работает по программе, созданной с помощью такого модуля. Либо характеристики станка не соответствуют действительности, либо обрабатываемый материал – своим характеристикам, либо расчеты модуля не верны, либо все сразу.

В данном направлении наибольший интерес представляет именно математическое обеспечение модулей интеллектуальной обработки, а характеристики станков и материалов принять заявленными ГОСТ и другими стандартами. Здесь необходимо обеспечить максимальное соответствие управляющей программы характеристикам оборудования, инструмента и материала.

Математическое обеспечение при построении траектории движения инструмента должно учитывать все рекомендации по обработки конкретного материала, конкретным инструментом и станком, т. е. обеспечивать плавные ходы инструмента, минимальные холостые перемещения, задействовать максимально возможную длину режущей кромки и множество других приемов оптимальной обработки, при этом обеспечивать одинаковую нагрузку на инструмент в любой точке траектории, при том, что геометрия деталей бывает довольно сложная. Также все это должно быть увязано с жесткостью технологической системы.

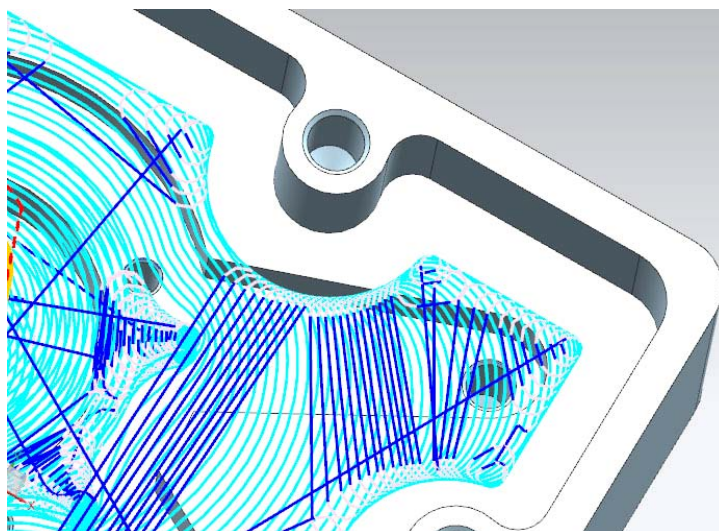


Рис. 1. Плавная траектория модуля iMachining

```

N1010 G03 X5.5896 Y1.2822 I.0302 J-.3304
N1020 X5.6103 Y1.2909 I.0791 J-.2186
N1030 G01 X5.63 Y1.3002
N1040 G03 X5.6996 Y1.3423 I.2771 J-.537
N1050 X5.8444 Y1.4765 I.4712 J-.6539
N1060 X5.9944 Y1.7034 I.9203 J-.7716
N1070 X6.0707 Y1.8781 I1.1674 J-.6133
N1080 X6.1577 Y2.2388 I1.5512 J-.5649
N1090 X6.1618 Y2.6118 I1.6198 J-.2043
N1100 X5.9955 Y3.1582 I1.4648 J.1472
N1110 X5.9118 Y3.2908 I1.0027 J.5399
N1120 X5.831 Y3.3845 I.6608 J.4889
N1130 X5.7649 Y3.4385 I.3617 J.3749
N1140 G01 X5.7594 Y3.442
N1150 G03 X5.7343 Y3.4559 I.1251 J.1959
N1160 X5.6515 Y3.4779 I.1 J.2098
N1170 X5.5943 Y3.4751 I.0172 J.2318
N1180 G02 X5.5459 Y3.4684 I.1219 J-.6981

```

Рис. 2. Управляющая программа модуля iMachining

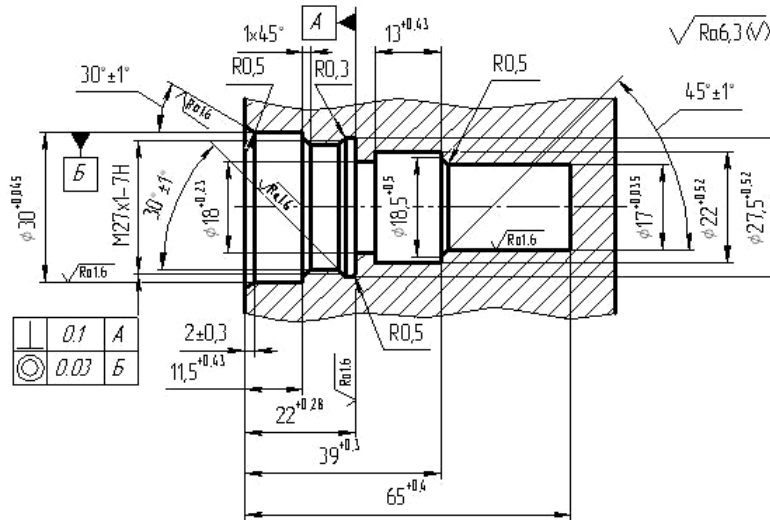


Рис. 3. Пример обрабатываемого точного отверстия

Для нахождения реальных показателей жесткости технологической системы станок–приспособление–инструмент–деталь модули оснащаются дополнительными возможностями для регулирования нагрузки на станок, в том числе и степень агрессивности обработки, таким образом, снижая степень агрессивности, мы снижаем нагрузку, но в тоже время увеличиваем время обработки.

Для плавности хода инструмента используются полиморфные спирали, возможно они похожи на троихиды, однако имеют более сложную геометрию, что также скажется на сложности кода УП. Ручной расчет траектории в виде данных спиралей и написание по ним УП, как видно, потребует много сил и времени, что является не рентабельным.

Особое значение подобные модули имеют при проектировании обработки труднообрабатываемых материалов, например, титан, аустенитная нержавеющая сталь, жаропрочные сплавы, закаленные стали и многие другие. Традиционная обработка таких материалов вызывает сложности в силу множества

причин, высоких сил резания, а в том числе и неиспользования всей режущей части инструмента, что сказывается на низкой стойкости инструмента. Использование модулей для интеллектуальной обработки не только делает обработку труднообрабатываемых материалов более стабильной и производительной, но и увеличивает стойкость инструмента, что всесторонне ведет к экономической выгоде. При этом еще и происходит снижение трудоемкости проектирования обработки деталей (рис. 2, 3).

**Модуль интеллектуальной обработки точных отверстий на станках с ЧПУ.** Привязка оборудования, инструментов и материала требуется не только для фрезерования, но также и для обработки точных, сложных отверстий, состоящих из множества различных ступеней. Обеспечение низкой шероховатости поверхности и высокой точности обрабатываемых отверстий является одной из сложных задач механической обработки на станках с ЧПУ. Небольшие неточности в режимах резания, припусках приводят к невозможности обеспечения необходимых высоких

параметров. Все эти параметры обработки также закладываются на усмотрение технолога-программиста и порой не точно, поэтому часто окончательная отладка обработки отверстий происходит опытным путем при наладке станка.

Создание модуля для обработки точных отверстий с привязкой к оборудованию, обрабатываемому материалу, инструменту позволяет более быстро достигать нужных результатов.

Разработанный модуль самостоятельно формирует маршрут обработки отверстия по заданным параметрам точности, а также произведет подбор инструмента из базы данных. Если необходимого инструмента нет, в базе данных модуль предложит ввести инструмент необходимого диаметра. Также модуль обладает способностью сгенерировать УП для станка с ЧПУ и карту его наладки. Модуль входит в состав системы САПР ТПП ЧПУ [3]. Отличается большой гибкостью и позволяет вести ручные корректировки, если это необходимо пользователю в каких-либо нестандартных случаях (рис. 3).

Модуль обработки точных отверстий соответствует принципам модульной технологии в машиностроении, т. е. представлению чертежа и модели детали в виде стандартизированных и унифицированных конструктивных элементов [4]. Это позволило разработать математическое обеспечение для автоматизированного построения технологии обработки отверстий.

Создание подобных модулей интеллектуальной обработки позволяет значительно повысить степень автоматизации современных CAD/CAM-систем, снизить трудоемкость и сроки разработки УП [2, 5]. Проектировать качественные УП смогут специалисты более низкой квалификации и не имеющих богатого опыта работы.

Совершенствование CAD/CAM-систем является одним из ключевых направлений в области обработки на станках с ЧПУ. И модули для интеллектуального проектирования обработки являются важным составляющим данного развития.

Как и все проекты Четвертой промышленной революции, интеллектуальная обработка направлена на повышение производительности и рентабельности предприятий, а также их конкурентоспособности на мировом уровне. Интеллектуальная обработка имеет важное значение, так как напрямую влияет на производительность обработки и повышение срока службы оборудования и инструментов. Внедрение Индустрии 4.0 и в частности модулей для интеллектуальной обработки в скором времени станет главным инструментом конкурентоспособности предприятий.

### Библиографические ссылки

1. Михалёв О. Н., Янюшкин А. С. Высокопроизводительная механическая обработка труднообрабатываемых материалов на станках с ЧПУ // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении : сб. науч. ст. Курск : Университетская книга, 2018. Вып. 3. С. 232–235.
2. Mikhalev O. N., Yanyushkin A. S. Perfection of the automated systems of machine-building manufactures // Materials, Methods & Technologies : тезисы докл. 12 Междунар. симпозиума (7–11.07.2011, Варна, Болгария). Варна, 2011. С. 76–81.
3. Янюшкин А. С., Михалев О. Н. Система автоматизированного проектирования технологической подготовки производства на станках с ЧПУ (САПР ТПП ЧПУ v. 1.0) // Свидетельство № 2008615315 2008.
4. Базров Б. М. Модульная технология в машиностроении. М. : Машиностроение, 2001. 368 с.
5. Михалёв О. Н., Янюшкин А. С. Повышение степени автоматизации CAD/CAM-систем при проектировании обработки точных отверстий на многоцелевых станках с ЧПУ // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2008. № 5. С. 33–38.

### References

1. Mikhalev O. N., Yanushkin A. S. High-performance machining of hard-to-work materials on CNC machines // Prospects for the development of processing technologies and equipment in engineering: Sat. scientific. Art. Kursk: JSC "University Book", 2018. 3rd issue. P. 232–235.
2. Mikhalev O. N., Yanyushkin A. S. Perfection of the automated systems of machine-building manufactures / O.N. Mikhalev, A.S. Yanyushkin // Materials, Methods & Technologies : theses dokl. 12th International Symposium. (Varna, Bulgaria on 7–11.07.2011). Varna, 2011. P. 76–81.
3. Yanushkin A. S., Mikhalev O. N. The automated design system for technological preparation of production on CNC machines (SAPR TPP CNC v. 1.0) // Certificate № 2008615315 2008.
4. Bazrov B. M. Modular technology in engineering. Moscow: Mechanical Engineering, 2001. 368 p.
5. Mikhalev O. N., Yanushkin A. S. Increasing the degree of automation of CAD / CAM-systems when designing the machining of precise holes on multi-purpose CNC machines // Herald of Computer and Information Technologies. 2008. № 5. P. 33–38.

© Михалев О. Н., Янюшкин А. С., Ереско В. С., 2018

УДК 621.9.02

## КИНЕМАТИКА ПРИВОДА МЕХАНИЗМА ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ДРЕВЕСНО-СТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ

П. В. Цаплин, С. П. Ереско, П. С. Шастовский, А. В. Мещерякова, Ю. Д. Алашкевич

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

*Рассматривается возможная кинематика движения привода механизма, предназначенного для обработки поверхности древесно-стружечных плит с целью уменьшения их шероховатости под ламинат и снижения при этом энергопотребления механизма.*

*Ключевые слова: термосиловое воздействие, древесно-стружечные плиты, тепловая энергия, шероховатость поверхности, суммарная функциональная мощность, трение, колебательно-поступательное движение.*

## THE KINEMATICS OF THE DRIVE MECHANISM FOR THE SURFACE TREATMENT OF CHIPBOARDS

P. V. Tsaplin, S. P. Eresko, P. S. Shastovsky, A. V. Meshcheryakova, Y. D. Alashkevich

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

*The article discusses the possible kinematics of the movement of the drive mechanism designed for surface treatment of particle board in order to reduce their roughness under the laminate and reduce the energy consumption of the mechanism.*

*Keywords: thermal and force effects, hardboard, heat energy, surface roughness, total functional capacity, friction, oscillatory motion.*

В последние годы становится актуальным вопрос получения древесно-стружечных плит для мебельного производства с наименьшими энергозатратами, но при этом более высокого качества. К основным можно причислить получение невозвратных отходов, повышенную шероховатость поверхности под ламинирование, высокую потребляемую мощность, крупногабаритность и т. д. Предлагаемый способ термосиловой обработки поверхности плит исключает вышеперечисленные недостатки. Главная особенность предлагаемого способа состоит в организованном резании фрезой для снятия припуска с последующим выглаживанием за счёт сил трения термопротяжным узлом.

Важным аспектом разработки технологии снижения шероховатости методом термосилового воздействия является предлагаемая схема кинематики движения привода механизма калибровки и шлифования поверхности плит. Такая кинематика привода может быть в двух вариантах; первая с поступательно-вращательным движением (рис. 1), с поступательно-колебательным движением (рис. 2).

Принимая за основу калибровку и снижения шероховатости плит по схеме (рис. 1), очевидно, что силы сопротивления резания и выглаживания плиты распределены на разных концах равноплечего рычага и могут иметь разные силы сопротивления. Кроме того, скорости выглаживания термопротяжной пластиной и режущей фрезой различны на разных участках плиты. Не равномерность такого хода связана

с собственной линейной скоростью вращения водила и скоростью подачи плиты.

Оценим результирующие скорости по четырём рассматриваемым точкам:

$$R_1 = \sqrt{V_{\text{лин вод}}^2 + V_{\text{под}}^2} = \sqrt{3,133^2 + 0,085} = 3,134 \text{ м/с};$$

$$R_2 = V_{\text{лин вод}} + V_{\text{под}} = 3,133 + 0,085 = 3,218 \text{ м/с};$$

$$R_3 = \sqrt{V_{\text{лин вод}}^2 + V_{\text{под}}^2} = \sqrt{3,133^2 + 0,085} = 3,134 \text{ м/с};$$

$$R_4 = V_{\text{лин вод}} - V_{\text{под}} = 3,133 - 0,085 = 3,048 \text{ м/с}.$$

Для оценки разности скоростей достаточно вычислить  $\Delta R$  для положений  $R_1$  и  $R_2$ :

$$\Delta R_1 = R_1 - V_{\text{лин вод}} = 3,134 - 3,133 = 0,001 \text{ м/с};$$

$$\Delta R_2 = R_2 - V_{\text{лин вод}} = 3,218 - 3,133 = 0,085 \text{ м/с}$$

В процентном соотношении от собственной линейной скорости водила составляет 0,03 % и 2,74 % соответственно. Таким образом, изменения скоростей обработки поверхности плиты не превышает 2,8 %, что не влияет существенным образом на результат разницы обработки в разных точках поверхности плиты. Однако одним из недостатков представленной кинематики привода механизма обработки поверхности плит является возникновение разных сил сопротивления калибрующего и шлифующих узлов, вследствие чего при может образовываться шероховатость поверхности таких плит превышающей современный ГОСТ 7016–2013, исходя из которого шероховатость

поверхности для шлифованных древесностружечных плит не должна превышать 63 мкм.

Устранить такой недостаток возможно изменением кинематики привода механизма обработки древесностружечных плит на колебательно-поступательное движение (рис. 2). Очевидно, что при внедрении такой кинематики должна быть существенно снижена скорость подачи плиты, для уменьшения угла вектора абсолютной скорости по отношению к вектору относительной скорости привода водила механизма. Привод движения водила может быть односторонней, либо двухсторонней с реверсивным вращением режущего инструмента.

В процессе обработки поверхности плит как резанием, так и термосиловым воздействием происходит

контакт между поверхностями плиты и обрабатываемого органа. В связи этим происходит износ, как режущего инструмента, так и термпротяжного органа. Интенсивность изнашивания зависит не только от усилия прижима термпротяжного органа, но и во многом зависит как от продолжительности времени работы обрабатываемого инструмента, так и от кинематических параметров работы станка, а именно: скорости подачи плиты, окружной скорости калибровально-термпротяжного узла.

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 [1–3].

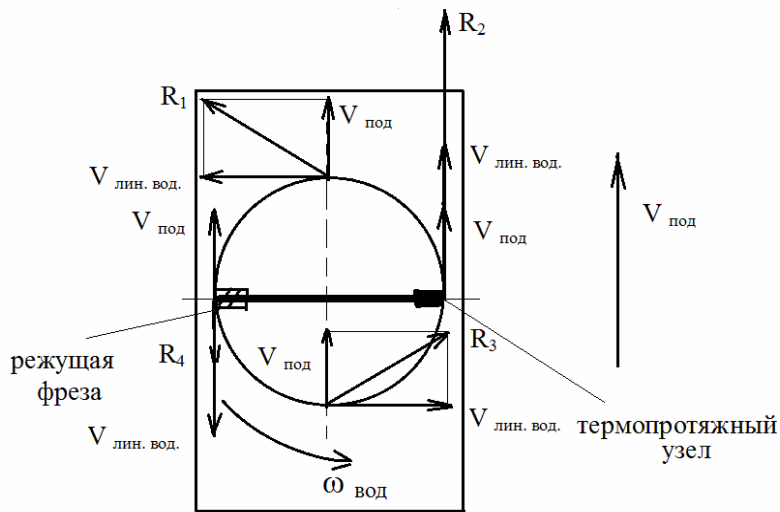


Рис. 1. Кинематическая схема привода калибровально-шлифовального механизма с поступательно-вращательным движением:

$V_{\text{лин. вод}}$  – линейная скорость водила;  $V_{\text{под}}$  – скорость подачи плиты;  
 $\Omega_{\text{вод}}$  – угловая скорость водила;  $R_1 R_2 R_3 R_4$  – результирующие скорости обрабатываемого инструмента

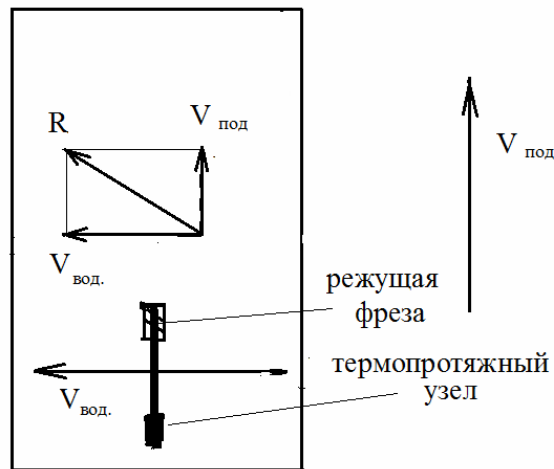


Рис. 2. Кинематическая схема привода калибровально-шлифовального механизма с поступательно-колебательным движением





Рис. 3. Станок по обработки поверхности древесно-стружечных плит, имеющий кинематику поступательно-колебательного движения

**Выводы:**

1. Предложен и обоснован способ обработки поверхности древесных плитных изделий методом термосилового воздействия.
2. Приведены две схемы кинематики привода термосилового узла.
3. Предложена предпочтительная схема привода с колебательно-поступательным движением механизма для повышения качества обработки поверхности древесно-стружечных плит.

**Библиографические ссылки**

1. Кутуков Л. Г., Зотов Г. А. Шлифовальные станки для обработки древесины. М. : Лесная промышленность, 1983. 80 с.
2. Пат. РФ № 2313450 С1. Способ снижения шероховатости и разнотолщинности древесностружечных плит устройство для его осуществления / Ермолович А. Г., Ермолович К. А., Ромашенко В. В. Заявл. 29.06.2006, № 2006123154/12 ; Опубли. в Б. И., 2007, № 36. МПК В 27М 1/02 ; СибГТУ.
3. Пат. РФ № 2376131. Способ фрезерования древесных материалов / Ермолович А. Г., Ромашенко В. В.,

Цаплин П. В., Шастовский П. С. Заявл. 07.04.2008, № 2008113536/02 (014698), опубли. в Б.И., 2009 № 15 МПК В 27G 1/02 (2006.01) ; СибГТУ.

**References**

1. Kutukov L. G., Zotov G. A. Shlifoval'nyye stan-ki dlya obrabotki drevesiny. M. : Lesnaya. promyshlennost', 1983. 80 s.
2. Pat. RF № 2313450 S1. Sposob snizheniya she-rokhovatosti i raznotolshchinnosti drevesnostruzhechnykh плит ustroystvo dlya ego osushchestvleniya / Ermolovich A. G., Ermolovich K. A., Romashenko V. V. Zayavl. 29.06.2006, № 2006123154/12 ; Opubl. v B. I., 2007, № 36. МПК V 27M 1/02. ; SibGTU.
3. Pat. RF № 2376131. Sposob frezerovaniya drevesnykh materialov / Ermolovich A. G., Romashenko V. V., Tsaplin P. V., SHastovskiy P. S. Zayavl. 07.04.2008, № 2008113536/02 (014698), publ. v B. I., 2009 № 15 МПК V 27G 1/02 (2006.01) ; SibGTU.

© Цаплин П. В., Ереско С. П., Шастовский П. С., Мещерякова А. В., Алашкевич Ю. Д., 2018

## РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ЗАЩИТНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ УДАРЕ

С. Г. Чулкин<sup>1</sup>, К. В. Елисеев<sup>2</sup>, Т. В. Зиновьева<sup>3</sup>, В. А. Пискунов<sup>2</sup><sup>1</sup>Санкт-Петербургский морской технический университет  
Российская Федерация, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
E-mail: sergej.chulkin@yandex.ru<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Российская Федерация, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29<sup>3</sup>Институт проблем машиноведения Российской академии наук  
Российская Федерация, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, Большой просп., 61

*При проектировании ракетно-космических комплексов особое внимание необходимо уделять надежности систем с учетом возможных внешних динамических воздействий. Проведен расчет на прочность люка защитной конструкции при ударе падающего объекта.*

*Ключевые слова: ударная нагрузка, прочность, жесткость, метод конечных элементов, явная схема интегрирования.*

## CALCULATION OF THE STRENGTH OF PROTECTIVE DESIGN UPON IMPACT

S. G. Chulkin<sup>1</sup>, K. V. Eliseev<sup>2</sup>, T. V. Zinovieva<sup>3</sup>, V. A. Piskunov<sup>2</sup><sup>1</sup> Saint. Petersburg Marine Technic University  
3, Lotsmanskaya Str., Saint-Petersburg, 190121, Russian Federation  
E-mail: sergej.chulkin@yandex.ru<sup>2</sup>Peter the Great Saint. Petersburg Polytechnic University  
29, Polytechnicheskaya Str., Saint-Petersburg, 195251, Russian Federation<sup>3</sup>Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences  
61, Bolshoj Av., V. O., Saint-Petersburg, 199178, Russian Federation

*When designing rocket and space systems, special attention should be paid to their reliability, taking into account possible external dynamic effects. Strength analysis of the protective design hatch upon impact of a falling object was performed.*

*Keywords: impact load, strength, stiffness, finite-element method, explicit integration scheme.*

**Введение.** В настоящее время при проектировании новых аппаратов и энергетических установок особое внимание уделяется надежности систем при воздействии внешних факторов во избежание аварий [1–3]. В связи с этим актуальными становятся вопросы расчета на прочность элементов защитных систем.

Цель данной работы – расчет жесткости и прочности люка защитной конструкции при ударе падающего объекта, например, осколка снаряда или элемента оборудования.

Расчет выполнялся с использованием программного комплекса Ansys v19.0, реализующего метод конечных элементов [4].

Объектом исследования стал стальной люк защитной конструкции, модель которого была создана с помощью системы САПР. Основные узлы конструкции: крышка люка с пазами, опора люка, соединенная с крышкой путем сварки, рукоятка и опорные петли (рис. 1).

Размеры крышки люка: 1860×980 мм.

В расчете используются объемные конечные элементы, преимущественно гексаэдры. Характерный размер элемента в плоскости крышки 6...8 мм. Для учета начала развития пластических деформаций при

изгибе пластин задано 6...8 элементов по толщине со сгущением к поверхностям.

Люк, шарнирно закрепленный в петлях и защемленный по поверхности соприкосновения с защищаемой конструкцией, испытывает нагрузку от падения стального цилиндра диаметром 0,1 м с высоты, обеспечивающей достижение энергии удара равной 5 кДж. Рассчитанная скорость в момент соударения равна 28,5 м/с. К жесткости люка выдвигается требование об ограничении прогиба значением 150 мм и пластической деформации значением 0,2.

Обычно в инженерной практике подобные задачи рассматриваются в статической постановке с использованием коэффициента динамичности, однако расчеты, проведенные в работе [5] показали, что при высоком уровне энергии ударного взаимодействия этот подход неприемлем. При высоких скоростях падающего объекта и малом времени его взаимодействия с защитной конструкцией неявные схемы интегрирования систем уравнений динамики по времени неэффективны.

Расчеты люка проведены в модуле программы Ansys AUTODYN [6], реализующем явные схемы интегрирования.

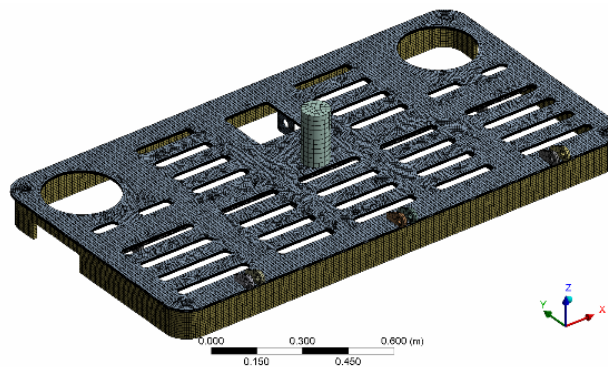


Рис. 1. Модель люка

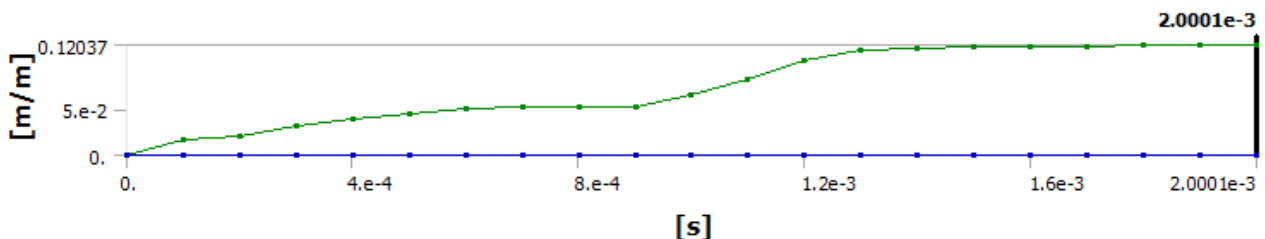


Рис. 2. Изменение максимальной эквивалентной пластической деформации во времени

В результате расчетов выявлено следующее:

- выполняется требование к жесткости, прогиб не превышает 2 мм;
- пластические деформации возникают, но не значительные, максимальное их значение равно 0,12 (рис. 2).

На основании выполненных расчетов сделан вывод о том, что при ударном воздействии на люк его крышка деформируется, но сохраняет свою защитную функцию для оборудования.

#### Библиографические ссылки

1. Анализ прочности конструкций из пространственно-разнесенных сталебетонных плит при высокоскоростном ударе составным металлическим ударником / Н. Н. Белов, Н. Т. Югов, С. А. Афанасьева и др. // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 1 (21). С. 41–51.
2. Анализ динамической прочности бронеплит при ударном нагружении расчетно-экспериментальным методом / А. Н. Ищенко, Н. Н. Белов, Н. Т. Югов и др. // Вестник Томского государственного университета. 2010. № 2 (10). С. 71–78.
3. Герасимов А. В., Пашков С. В., Христенко Ю. Ф. Защита космических аппаратов от техногенных и естественных осколков. Эксперимент и численное моделирование // Вестник Томского государственного университета. 2011. № 4 (16). С. 70–78.
4. Елисеев К. В., Зиновьева Т. В. Вычислительный практикум в современных CAE-системах : учеб. пособие. СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2008. 112 с.

5. Расчет и оптимизация люка защитной конструкции подводного манифольда под ударной нагрузкой / С. Г. Чулкин и др.

6. ANSYS Documentation, ANSYS Software Release 19, ANSYS, Inc., 2018.

#### References

1. Analiz prochnosti konstrukcij iz prostranstvenno-raznesennyh stalebetonnyh плит pri vysokoskorostnom udare sostavnym metallicheskim udarnikom / N. N. Belov, N. T. Yugov, S. A. Afanas'eva et al. // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. 2013. № 1 (21). P. 41–51.
2. Analiz dinamicheskoj prochnosti broneplit pri udarnom nagruzenii raschetno-ehksperimental'nym metodom / A. N. Ishchenko, N. N. Belov, N. T. Yugov et al. // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. 2010. № 2 (10). P. 71–78.
3. Gerasimov A. V., Pashkov S. V., Hristenko Ju. F. Zashhita kosmicheskikh apparatov ot tehnogennyh i estestvennyh oskolkov. Jeksperiment i chislennoe modelirovanie // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. 2011. № 4 (16). P. 70–78.
4. Eliseev K. V., Zinovieva T. V. Vychislitel'nyj praktikum v sovremennyh CAE-sistemah: ucheb. posobie. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2008. 112 p.
5. Chulkin S. G. [et al.] Raschet i optimizacija ljuka zashhitnoj konstrukcii podvodnogo manifol'da pod udarnoj nagruzkoy.
6. ANSYS Documentation, ANSYS Software Release 19, ANSYS, Inc., 2018.

© Чулкин С. Г., Елисеев К. В., Зиновьева Т. В., Пискунов В. А., 2018

УДК 621.313.13.1

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ УДАРЕ С УЧЕТОМ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

Н. А. Швалева\*, А. А. Фадеев, Т. Т. 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: natalyashvaleva@ya.ru

*Разработана математическая модель, которая позволяет оценить характеристики линейного электродинамического двигателя при ударе с учетом упругой деформации, а также рассчитать упругую деформацию в пятне контакта.*

*Ключевые слова: удар, математическая модель, упругая деформация, пятно контакта, линейный электродинамический двигатель.*

**MATHEMATICAL MODEL OF THE OPERATION OF A LINEAR ELECTRODYNAMIC MOTOR UPON IMPACT WITH ALLOWANCE FOR ELASTIC DEFORMATION**

N. A. Shvaleva\*, A. A. Fadeev, T. T. Eresko

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

\*E-mail: natalyashvaleva@ya.ru

*The mathematical model has been developed that makes it possible to evaluate the characteristics of a linear electrodynamic motor upon impact with allowance for elastic deformation, and also to calculate the elastic deformation in the contact mark.*

*Keywords: impact, mathematical model, elastic deformation, contact mark, linear electrodynamic engine.*

В настоящее время для повышения прочности деталей машин, в том числе деталей ракетно-космической техники, широко применяют динамические способы поверхностно-пластического деформирования, где совершается ударное деформационное воздействие на обрабатываемую поверхность в условиях прерывистого контакта, что обеспечивает повышение усталостной прочности и твердости поверхности детали под действием ударной нагрузки.

Известно, что одной из основных характеристик эффективности динамического нагружения при ППД является доля энергии удара, затрачиваемая на упругопластическую деформацию обрабатываемого материала в зоне деформации. С позиции волновой теории удар рассматривается в виде распространяющихся по соударяемым телам плоских акустических волн, имеющих период, амплитуду и длительность. Период такой волны называют ударным импульсом, форма которого представляет изменение амплитуды по времени. Форма импульса определяет эффективность динамического нагружения [1; 2].

В машиностроении для реализации ППД динамическими способами широкое применение нашли устройства с электрическим двигателем.

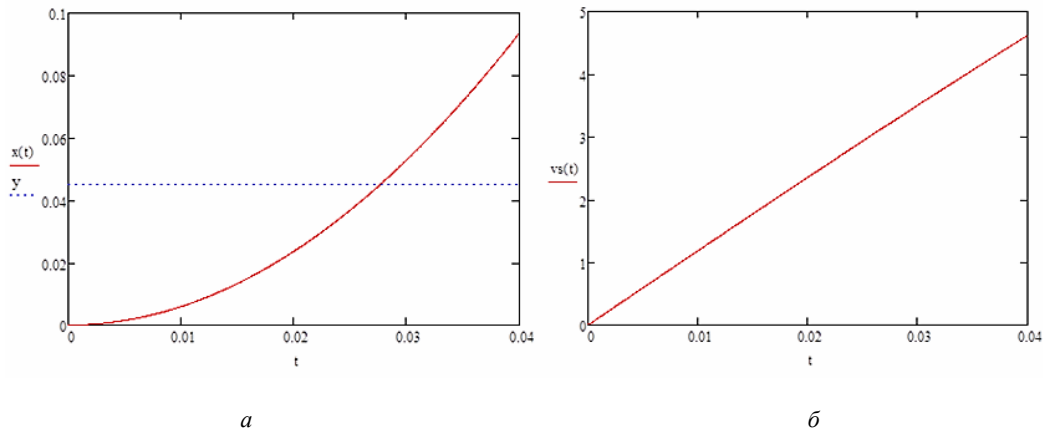
Известна конструкция ударного стенда на базе линейного электродинамического двигателя, работающего в ударно-импульсном режиме, разработанная сотрудниками СибГАУ [3]. Для данного стенда существует уравнение, описывающее движение якоря с инструментом в момент удара бойка о поверхность

[4]. В правой части уравнения первый член характеризует суммарное динамическое усилие, возникающее при изменении скорости движения якоря с инструментом. Второй член уравнения характеризует статическое усилие, развиваемое обмоткой якоря двигателя. Третий член уравнения упрощенно определяется величиной необходимой упругопластической деформации обрабатываемого материала и свойствами материалов «боек-поверхность» [5].

Цель исследования заключается в разработке математической модели работы линейного электродинамического двигателя в момент удара бойка о поверхность с учетом упругой деформации. Для реализации поставленной цели в пакете MathCAD разработан и выполнен расчет. Уравнение, описывающее движение якоря с инструментом с учетом упругой деформации, имеет вид:

$$\frac{d^2 x_6}{dt^2} = \left( \frac{z^2 B_3^2}{R_{я.А}} - \frac{k_d}{m_6} \right) \cdot \frac{dx}{dt} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right) + \frac{z B_3 I_{я}}{m_6} - k \cdot \frac{\alpha_0}{\sqrt[3]{1 + \frac{2h}{\alpha_y}}}$$

где  $\alpha_0$  – сближение инструмента с нагружаемой поверхностью при чисто упругом силовом контакте, мм;  $h$  – остаточное сближение, равное глубине восстановленного отпечатка;  $\alpha_y$  – упругое сближение;  $k$  – коэффициент сопротивления внедрению, для упругопластического внедрения инструмента в упрочняемую поверхность экспериментально установлено, что  $k = (2,4 \dots 7,5) 10^8$  Н/м.



Графики зависимостей  $x(t)$  и  $v(t)$  характеристик линейного электродинамического двигателя в момент удара бойка о поверхность:  
 $a$  – зависимость  $x(t)$ ;  $b$  – зависимость  $v(t)$

В ходе выполненного расчета, вычислена величина упругой деформации по динамической составляющей, которая составила  $7,3 \cdot 10^{-8}$  мм. Получены графики (см. рисунок,  $a$ ,  $b$ ) зависимостей  $x(t)$  и  $v(t)$ , которые иллюстрируют характеристики линейного электродинамического двигателя в момент удара бойка о поверхность. Параболический характер изменения графика  $x(t)$  говорит о существенном влиянии индуцированные электродвижущие силы в обмотке возбуждения индуктора за счет перемещения якоря, а также увеличения скорости движения якоря.

Разработанная и дополненная математическая модель позволяет оценить характеристики линейного электродинамического двигателя, работающего в ударно-импульсном режиме, в момент удара бойка о поверхность с учетом упругой деформации, а также рассчитать упругую деформацию в пятне контакта.

#### Библиографические ссылки

1. Киричек А. В., Соловьев Д. Л., Лазуткин А. Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. М. : Машиностроение, 2004. 287 с.
2. Швалева Н. А., Фадеев А. А., Ереско Т. Т. Моделирование ударного воздействия в среде APM Structure 3D // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства: Материалы Международной научно-технической конференции. 2018. С. 324–329.
3. Фадеев А. А., Шестаков И. Я., Ереско Т. Т. Использование линейного электродинамического привода для исследования ударного взаимодействия материалов // Вестник СибГАУ. 2017. Т. 17, № 4. С. 1077–1087.
4. Фадеев А. А., Шестаков И. Я., Ереско Т. Т. Математическая модель работы ударного устройства на основе линейного электродинамического привода // Решетневские чтения : материалы XVIII Междунар. науч. конф., посвящ 90-летию со дня рождения генер.

конструктора ракетно-космич. систем акад. М. Ф. Решетнева (11–14 нояб. 2014, г. Красноярск) : в 3 ч. Ч. 1 / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2014. С. 315–316.

5. Ереско С. П., Ереско Т. Т., Фадеев А. А. Совершенствование конструкций и методов проектирования виброударных механизмов : монография / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2017. С. 190.

#### References

1. Kirichek A. V., Solov'ev D. L., Lazutkin A. G. Tekhnologiya i obirudovanie statiko-impul'snoj obrabotki poverchnosti plasticheskim deformirovaniem: Biblioteka tekhnologa [Technology and equipment, static pulse processing surface plastic deformation: a Library technologist]. M. : Mashinostroenie, 2004. 228 p.
2. Shvaleva N. A., Fadeev A. A., Eresko T. T. Simulation of impact integration in APM Stricture 3D Nazemnyye transportnyye i tekhnologicheskiye komplekxy i sredstva: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. 2018. P. 324–329. (In Russ.)
3. Fadeev A. A., Chestakov I. Y., Eresko T. T. [Use of the linear electrodynamic actuator for the research of shock interaction of materials]. Vestnik SibSAU. 2017. No. 4. P. 1077–1087. (In Russ.)
4. Fadeev A. A., Chestakov I. Y., Eresko T. T. [A mathematical model of the percussion device on the basis of the linear electrodynamic actuator]. Materialy XVIII Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya" [Materials XVIII Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2014. P. 315–316. (In Russ.)
5. Eresko S. P., Eresko T. T., Fadeev A. A. Sovershenstvovaniye konstruksiy i metodov proyektirovaniya vibroudarnykh mekhanizmov [Improvement of designs and methods of design of vibro-shock mechanisms] : monografiya. Krasnoyarsk, 2017. P. 190.



**Секция**

**«НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ  
В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ»**

УДК 521; 521.1; 521.3; 629.78.086; 629.78.072/.077

## ЭВОЛЮЦИЯ ГЕОСИНХРОННОЙ РЕТРОГРАДНОЙ ОРБИТЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ И АНТАРКТИКИ

В. М. Владимиров<sup>1,2</sup>, В. А. Юксеев<sup>3</sup>, Е. Г. Лапухин<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр  
Сибирского отделения Российской академии наук»

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50

<sup>2</sup>ООО «Научно-производственная фирма «Электрон»

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50

<sup>3</sup>АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»

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

<sup>4</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: lapukhineg@mail.sibsau.ru

*Рассмотрены варианты геосинхронных ретроградных орбит для мониторинга Северного морского пути и Антарктики. Рассчитаны изменения орбитальных элементов на протяжении пяти лет без дополнительной коррекции.*

*Ключевые слова: орбитальные элементы, эволюция орбит, Северный морской путь, мониторинг.*

## EVOLUTION OF A GEOSYNCHRONOUS RETROGRADE ORBIT FOR MONITORING OF THE NORTHEAST PASSAGE AND ANTARCTIC REGION

V. M. Vladimirov<sup>1,2</sup>, V. A. Yukseev<sup>3</sup>, E. G. Lapukhin<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Krasnoyarsk Science Centre of the Siberian Branch of Russian Academy of Science

50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup>Research-and-production company "Electron"

50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>3</sup>JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems

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

<sup>4</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

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

\*E-mail: lapukhineg@mail.sibsau.ru

*The authors consider options of geosynchronous retrograde orbits for monitoring of the Northeast passage and Antarctic area. Changes of orbital elements for five years without additional correction are calculated.*

*Keywords: orbital elements, evolution of orbits, Northern Sea Route, monitoring.*

Введение. Коммерческая эксплуатация Северного Морского Пути (СМП) сопряжена рядом проблем: 1) отсутствие современных надёжных каналов связи для постоянного отслеживания движения грузов и работы поисково-спасательных служб [1]; 2) точность определения положения судов может быть снижена из-за того, что навигационные спутники для широты 75° уже не поднимаются выше ~60° (GPS) и ~75° (ГЛОНАСС) [2]; 3) отсутствие возможности получения актуальной информации о состоянии СМП для обеспечения безопасной навигации судов в акватории СМП и в арктическом регионе России и др.

Для решения этих проблем были рассмотрены орбиты спутников для проекта Космической системы мониторинга СМП и Антарктики, состоящей из 6 спутников, находящихся на геосинхронных ретроградных орбитах [3; 4]. Увеличение количества спутников до 12 обеспечивает проход над акваторией СМП с интерва-

лом в 2 часа по совпадающим трассам. Благодаря выбранным орбитам достигается возможность получения оптического (УФ, видимый и ИК-диапазон) и радиолокационного изображения поверхности при наличии облачного покрова с использованием бортового радиолокационного комплекса каждой точки трассы двумя-тремя космическими аппаратами (над СМП) и шестью-семью спутниками (над Антарктикой) [5].

В работе [6] представлен анализ устойчивости орбит «Гундра» с наклоном 63,4° и сделан вывод о необходимости коррекции один раз в 5–6 месяцев. В нашем случае орбиты ретроградные (наклонение – 100°). Расчет изменения параметров орбит показывает, что наиболее существенные изменения происходят с эксцентриситетом (снижается высота спутника в перигее) и аргументом перигея (орбита вращается в своей плоскости). За период ~180 дней высота пери-

гея снизится до высот спутников навигационной системы «Галилео» (~23 200 км). Другие спутники группировки, разнесенные по долготе восходящего узла и долготе перигея претерпевают меньшие изменения. Рассмотрены изменения параметров орбит в течение пяти лет без корректировок. Прогноз изменения орбитальных элементов КА производился с учетом несферичности гравитационного потенциала Земли и возмущений, обусловленных притяжением Луны и Солнца.

Таким образом, показано, что для спутников с выбранными орбитами для обеспечения мониторинга СМП и Антарктики необходимо проводить регулярную коррекцию орбит.

#### Библиографические ссылки

1. Лукин Ю. Ф. Северный морской путь: возможности и угрозы // Экономика Востока России. 2015. № 1 (3). С. 58–61.
2. Комаровский Ю. А. Аналитическое описание границы свободной от пролетов спутников области над северным морским путем. // Вестник Морского государственного университета. 2015. № 68. С. 55–60.
3. Владимиров В. М., Границкий Л. В., Лапухин Е. Г. Возможности дистанционного зондирования Северного морского пути с использованием геосинхронных орбит // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 10. С. 123–126.
4. Владимиров В. М., Границкий Л. В., Лапухин Е. Г. Возможности дистанционного зондирования Северного морского пути с использованием геосинхронных орбит // Системы связи и радионавигации : II Всероссийская науч.-практ. конф. (27–28 февраля 2015, г. Красноярск); Красноярск : АО «НПП «Радиосвязь», 2015. С. 111–118.
5. Владимиров В. М., Юксеев В. А., Лапухин Е. Г. Синхронное наблюдение Арктики и Антарктики в оптическом и радиодиапазонах // Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии : Всероссий-

ская радиоастрономическая конф., тез. докл. (17–21 сентября 2018, г. Санкт-Петербург). СПб. : ИПА РАН. 2018. С. 19.

6. Акимов А., Шевчук Д., Чазов В. Модификация орбиты «Тундра» для обслуживания территории России и анализ ее устойчивости // Технологии и средства связи. 2014. № 3 (102). С. 50–56.

#### References

1. Lukin Yu. F. [Northeast passage: opportunities and threats]. *Ekonomika Vostoka Rossii*. 2015. Vol. 1, № 3. P. 58–61. (In Russ.)
2. Komarovskiy Yu. A. [Analytical description of border of area, free from flights of satellites on the Northeast passage]. *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2015. № 68. P. 55–60. (In Russ.)
3. Vladimirov V. M., Granitskiy L. V., Lapukhin E. G. Possibilities of monitoring of the Northeast passage with using of geosynchronous orbits. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*. 2015. № 10. P. 123–126. (In Russ.)
4. Vladimirov V. M., Granitskiy L. V., Lapukhin E. G. [Possibilities of monitoring of the Northeast passage with using of geosynchronous orbits]. “*Sistemy svyazi i radionavigatsii*” : II *Vserossiyskaya nauch.-prakt. konf.* [Conf. “Communication system and radionavigation”]. Krasnoyarsk. 2015. P. 111–118. (In Russ.)
5. Vladimirov V. M., Yukseev V. A., Lapukhin E. G. [Synchronous monitoring of the Arctic and Antarctic in optical and radio ranges]. *Radioteleskopy, apparatura i metody radioastronomii* : *Vserossiyskaya radioastronomicheskaya konf.* [Conf. “Radio telescopes, equipment and methods of radio astronomy”]. SPb., 2018. P. 19. (In Russ.)
6. Akimov A., Shevchuk D., Chazov V. [Modification of an orbit “Tundra” for territory of Russia and the analysis of its stability]. *Tekhnologii i sredstva svyazi*. 2014. Vol. 3, № 102. P. 50–56. (In Russ.)

© Владимиров В. М., Юксеев В. А., Лапухин Е. Г., 2018



УДК 520.3/8; 520.2; 621.396.33:528.8

## ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ МОНИТОРИНГА СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ И АНТАРКТИКИ В УФ, ВИДИМОМ И ИК-ДИАПАЗОНАХ

В. М. Владимиров<sup>1,2</sup>, Е. Г. Лапухин<sup>3\*</sup>, В. А. Юксеев<sup>4</sup><sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр  
Сибирского отделения Российской академии наук»

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок 50,

<sup>2</sup>ООО «Научно-производственная фирма «Электрон»,

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50

<sup>3</sup>АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»

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

<sup>4</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: lapukhineg@mail.sibsau.ru

*Предложен вариант оптической системы для сбора информации в УФ, видимом и ИК-диапазонах для космического мониторинга Северного морского пути и Антарктики. Рассмотрены основные параметры и характеристики получаемых изображений.*

*Ключевые слова: оптическая система, Северный морской путь, мониторинг.*

## OPTICAL SYSTEMS FOR MONITORING OF THE NORTHEAST PASSAGE AND ANTARCTIC REGION

V. M. Vladimirov<sup>1,2</sup>, E. G. Lapukhin<sup>3\*</sup>, V. A. Yukseev<sup>4</sup><sup>1</sup>Krasnoyarsk Science Centre of the Siberian Branch of Russian Academy of Science  
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation<sup>2</sup>Research-and-production company «Electron»

50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>3</sup>JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation<sup>4</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: lapukhineg@mail.sibsau.ru

*The authors represented the optical system for space monitoring the Northeast passage and Antarctic area. It is calculated general parameters of optical systems and estimates images are made.*

*Keywords: optical systems, Northern Sea Route, monitoring.*

Система космического мониторинга Северного морского пути (СМП) и Антарктического региона (АР) для сбора информации в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном диапазонах предполагает использование оптической системы со следующими характеристиками: диаметр 1 м, фокусное расстояние ~5 м и поле зрения 2° [1; 2]. При таких характеристиках системы полоса охвата составляет ~900 км над СМП. При повороте сканирующего зеркала на ±11° можно получить видовую информацию от края до края диска планеты.

При расчете оптической системы для космического мониторинга была выбрана свободная от комы двухзеркальная оптическая схема Ричи–Кретьена (главное и вторичное зеркала – гиперboloиды вращения). Получение плоского поля достигается за счет равенства радиусов кривизны зеркал. Для исправления астигматизма предлагается использовать двухлинзовый корректор из плавленого кварца марки КИ.

Ограничение на рабочий спектральный диапазон определяется спектральным пропусканием плавленого кварца КИ: от 200 до 3 300 нм [3]. Для этого диапазона и производился расчет оптической системы. Также в пользу выбора кв. стекла КИ сказались низкий коэффициент линейного термического расширения ( $0,55 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), отсутствие флюоресценции и отсутствие линий поглощения в ИК-диапазоне, которые обусловлены, как правило, наличием молекул воды в материале. Для изготовления зеркал планируется использование ситалла марки СО115М [4] с коэффициентом термического расширения равным  $\sim 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ .

Дуга СМП по большому кругу (по трассе спутника) составляет ~41°, которая с орбиты в перигее (высота спутника ~23 600 км) видна под углом ~10,5°. Соответственно, для оптической системы с полем 4° достаточно сканировать на углы ±3,3° вдоль трассы спутника, чтобы получить изображение всей акватории СМП.

Рассчитанная оптическая система имеет следующие характеристики: диаметр – 1 000 мм, фокусное расстояние – 5 539 мм, поле зрения – 4° (386 мм в фокальной плоскости), расстояние между зеркалами – 1 850 мм, задний рабочий отрезок – 533 мм. Расчетный среднеквадратичный размер интегрального пятна рассеивания (суммарное пятно для всего спектрального диапазона) составляет 3, 4, 7, 16 и 10 мкм соответственно для угла поля 0°, 0,5°, 1°, 1,5° и 2° от центра изображения.

Гиперболоиды главного и вторичного зеркал имеют эксцентриситеты  $e_1^2 = 1,871$  и  $e_2^2 = 40,62$  соответственно. Отклонения от ближайшей сферы составляют 13 и 14 мкм. Для диаметров 1 000 и 465 мм такая асферичность не должна представлять особой трудности в изготовлении гиперболических поверхностей.

Для минимизации габаритных размеров системы, уменьшено расстояние между зеркалами. Это повлекло увеличение диаметра вторичного зеркал, а соответственно и экранирование до 50 % в диаметре по отношению к главному зеркалу. В [5] показано, что разрешающая способность оптической системы ухудшается медленно на 13 % при росте экранирования до 55 %. Другими словами, экранирование 50 % допустимо без особого ухудшения качества изображения.

Масштаб изображения для надира, когда спутник находится в перигее, составляет ~4,3 км на один миллиметр в фокальной плоскости. Полоса охвата составляет ~1 650 км. В апогее для подспутниковой точки масштаб составит ~8,3 км/мм и полоса охвата ~3 300 км.

Таким образом, использование предлагаемой оптической системы Ричи–Кретьена с двухлинзовым корректором с увеличенным полем до 4° способно решить поставленные задачи по сбору информации в УФ, видимом и ближнем ИК-диапазонах для мониторинга состояния СМП и Антарктики.

#### Библиографические ссылки

1. Владимиров В. М., Границкий Л. В., Лапухин Е. Г. Возможности дистанционного зондирования Северного морского пути с использованием геосинхронных

орбит // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 10. С. 123–126.

2. Владимиров В. М., Юксеев В. А., Лапухин Е. Г. Синхронное наблюдение Арктики и Антарктики в оптическом и радиодиапазонах // Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии : Всероссийская радиоастрономическая конф., тез. докл. (17–21 сентября 2018, г. Санкт-Петербург). СПб. : ИПА РАН, 2018. С. 19.

3. Материал кварцевое стекло КИ – плавленный кварц SiO<sub>2</sub> [Электронный ресурс]. URL: [http://www.elektrosteklo.ru/FS\\_rus.htm](http://www.elektrosteklo.ru/FS_rus.htm) (дата обращения: 15.09.2018).

4. Ситалл СО115М (Астроситалл) [Электронный ресурс]. URL: <http://lzos.ru/content/view/18/37/> (дата обращения: 15.09.2018).

5. Попов Г. М. Современная астрономическая оптика. М. : Наука, 1988. 192 с.

#### References

1. Vladimirov V. M., Granitskiy L. V., Lapukhin E. G. Possibilities of monitoring of the Northeast passage with using of geosynchronous orbits. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*. 2015. № 10. P. 123–126. (In Russ.)

2. Vladimirov V. M., Yukseev V. A., Lapukhin E. G. [Synchronous monitoring of the Arctic and Antarctic in optical and radio ranges]. *Radioteleskopy, apparatura i metody radioastronomii : Vserossiyskaya radioastronomicheskaya konf.* [Conf. “Radio telescopes, equipment and methods of radio astronomy”]. SPb., 2018. P. 19. (In Russ.)

3. *Material kvartsevoe steklo KI – plavlenyy kvarts SiO<sub>2</sub>* [Material a fused silica of KI]. Available at: [http://www.elektrosteklo.ru/FS\\_rus.htm](http://www.elektrosteklo.ru/FS_rus.htm) (accessed: 15.09.2018). (In Russ.)

4. Sitall SO115M (Astrosital) [Polycrystalline glass SO115M]. Available at: <http://lzos.ru/content/view/18/37/> (accessed: 15.09.2018). (In Russ.)

5. Popov G. M. *Sovremennaya astronomicheskaya optika*. [The modern astronomical optics]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 192 p.

© Владимиров В. М., Лапухин Е. Г., Юксеев В. А., 2018

**ПРОЯВЛЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ АНОМАЛИЙ РЭЛЕЯ  
В ПЕРИОДИЧЕСКИХ МАССИВАХ ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ, ВНЕДРЕННЫХ  
В ОДНОМЕРНЫЙ ФОТОННЫЙ КРИСТАЛЛ\***

В. С. Герасимов<sup>1,2,5,a</sup>, А. Е. Ершов<sup>1,2,5</sup>, Р. Г. Бикбаев<sup>2</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 имени 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

<sup>a</sup>E-mail: gerasimov@icm.krasn.ru

*Представлена модель, описывающая взаимодействие мод 1D ФК с 2D решеткой плазмонных наночастиц, внедренной в его дефектный слой, для разработки оптических сенсоров, модуляторов и лимитеров, используемых в сложных спутниковых системах.*

*Ключевые слова: фотонный кристалл, аномалия Рэля, связанные моды, плазмоника, наночастицы.*

**THE MANIFESTATION OF ADDITIONAL RAYLEIGH ANOMALIES IN PERIODIC PLASMONIC  
ARRAYS EMBEDDED INTO A ONE-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTAL**

V. S. Gerasimov<sup>1,2,5,a</sup>, A. E. Ershov<sup>1,2,5</sup>, R. G. Bikbaev<sup>2</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, Krasnoyarsk, 660036, 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, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>5</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>a</sup>E-mail: gerasimov@icm.krasn.ru

*We introduce analytical model, which describe the interaction between 1D photonic crystal and 2D array of plasmonic nanoparticles embedded in its defect layer for optimal design of sensors, light limiters, modulators for use in complex satellite systems.*

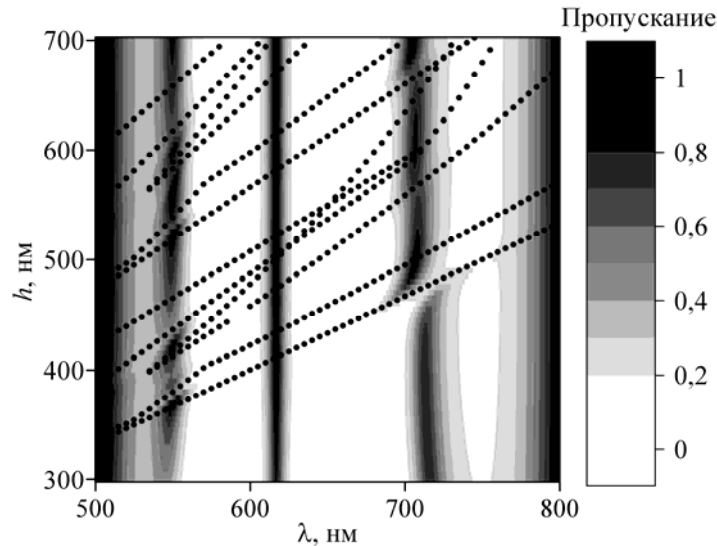
*Keywords: photonic crystal, Rayleigh anomaly, mode coupling, plasmonics, nanoparticle.*

На сегодняшний день существует ряд хорошо известных численных методов и теоретических моделей, позволяющих рассчитывать электромагнитные свойства наночастиц, в полупространстве [1] или слоистых средах [2].

Существование различных сценариев связи между плазмонными и фотонными модами в слоистых средах используются в оптических сенсорах, наноантеннах и других актуальных приложениях, перспективных для применения в системах управления космиче-

ских аппаратов. В последнее десятилетие значительное внимание исследователей привлекают так называемые поверхностные решеточные резонансы (ПРР) [3], что прежде всего связано с их уникальными свойствами. Сильная связь между локализованным поверхностным плазмонным резонансом (ЛППР) и аномалиями Рэля [4] в периодических массивах наночастиц (НЧ) приводит к появлению чрезвычайно узких резонансов с исключительно высокой добротностью.

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18-42-240013.



Спектры пропускания двумерной решетки золотых нанодисков радиусом  $R = 40$  нм и высотой  $H = 50$  нм, внедренной в ФК с дефектным слоем толщиной  $L = 1230$  нм для разных значений периода решетки  $h$ . Точками показаны предсказанные разработанной моделью аномалии

В настоящей работе исследуется гибридная наноструктура, состоящая из одномерного фотонного кристалла (ФК) с дефектным слоем и двумерной периодической решетки золотых нанодисков, внедренную в нее. Нами разработана теоретическая модель для прогнозирования положения дополнительных аномалий Рэля, порождаемых присутствием ФК. В работе рассматривается ФК с элементарной ячейкой, которая состоит из двух слоев: двуокиси кремния ( $\text{SiO}_2$ ) с толщиной  $d_a = 120$  нм и двуокиси циркония ( $\text{ZrO}_2$ ) с толщиной  $d_b = 70$  нм и  $\epsilon_b = 4,16$ . Будем использовать ФК, состоящий из шести элементарных ячеек и дефектного слоя между ними (с толщиной  $L$  и  $\epsilon_{\text{def}} = 25$ ). Двумерный массив золотых нанодисков высотой  $H$  и радиусом  $R$  с периодом  $h$ , внедрен в центр дефектного слоя ФК. Оптические свойства описанных структур были рассчитаны методом конечных разностей во временной области (FDTD). Для начала рассмотрим модель, позволяющую предсказать положение аномалий Рэля в исследуемой системе. В общем случае волновой вектор  $k$  в дефектном слое может быть записан как:

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \epsilon_{\text{def}} \left( \frac{2\pi}{\lambda_{p,q,s}} \right)^2, \quad (1)$$

где  $k_{x,y,z}$  — соответствующие компоненты  $k$ . Условия конструктивной интерференции для ФК с НЧ, внедренными в его дефектный слой, можно найти из выражения:

$$k_x h = 2\pi p, \quad k_y h = 2\pi q, \quad k_z L = 2\pi s - \varphi. \quad (2)$$

Здесь  $p, q, s$  это целые числа, которое обозначает порядок разности фаз в направлении  $x, y, z$ . Уравнение (1) учитывает связь НЧ через множественные отражения от ФК. Кроме того, оно учитывает фазовый сдвиг  $\varphi$  [5], который сопровождает эти множественные отражения:

$$\varphi = \arg \left[ \frac{CU_{N-1}}{AU_{N-1} - U_{N-2}} \right]. \quad (3)$$

Здесь  $U_N = \sin [(N + 1) K\Lambda] / \sin [K\Lambda]$ ,  $K = \arccos [(A + D) / 2] / \Lambda$  — волновое число Блоха,  $\Lambda = d_a + d_b$ , а  $N$  — число периодов ФК.  $A, C$  и  $D$  являются элементами комплексной матрицы  $2 \times 2$   $ABCD$ , которая связывает амплитуды плоских волн в слое 1 элементарной ячейки с соответствующими амплитудами для эквивалентного слоя в следующей ячейки ФК [5].

На рисунке представлены спектры пропускания исследуемой системы для разных периодов решетки  $h$ . Из рисунка видно, что множественные расщепления дефектных мод ФК возникают для разных  $h$  только для нечетных мод. При этом четная мода остается неизменной, несмотря на то, что ее частота почти совпадает с частотой ЛППР. Кроме того, на рисунке показаны положения как обычных аномалий Рэля, так и дополнительных аномалий, которые проявляются вследствие взаимодействия НЧ в решетке друг с другом посредством отражений от слоев ФК. Следует отметить, что обычные аномалии Рэля взаимодействуют только с длинноволновыми модами ФК. Это можно объяснить сильной связью ЛППР и аномалий Рэля в длинноволновом крыле спектра ФК, что связано с поведением дипольных суммы и обратной дипольной поляризуемостью НЧ [6].

Таким образом, разработана простая, но достаточно универсальная аналитическая модель, которая объясняет появление дополнительных аномалий Рэля в двумерных массивах НЧ, внедренных в дефектный слой одномерного ФК, вызванных множественными отражениями внутри ФК. Моделирование с использованием метода FDTD показывают хорошее согласие между прогнозируемыми положениями аномалий Рэля и областями гибридизации мод ФК.

### References

1. Panasyuk G. Y., Schotland J. C, Markel V. A. Short-distance expansion for the electromagnetic half-space Green's tensor: general results and application to radiative lifetime computations // *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*. 2009. 7. Vol. 42, No. 27. P. 275203.
2. Paulus M., GayBalmaz P., Martin O. J. F. Accurate and efficient computation of the Green's tensor for stratified media // *Physical Review E*. 2000. 10. Vol. 62, No. 4. P. 5797–5807.
3. Refractory titanium nitride two-dimensional structures with extremely narrow surface lattice resonances at telecommunication wavelengths / V. I. Zakomirnyi, I. L. Rasskazov, V. S. Gerasimov et al. // *Applied Physics Letters*. 2017. 9. Vol. 111, No. 12. P. 123107.
4. Rayleigh L. On the Dynamical Theory of Gratings // *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1907. 8 Vol. 79, 532. P. 399–416.
5. Yeh P., Yariv Amnon, Hong ChiShain Electromagnetic propagation in periodic stratified media i general theory // *Journal of the Optical Society of America*. 1977. apr. Vol. 67, No. 4. P. 423.
6. 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, No. 7. P. L115–L121.

© Герасимов В. С., Ершов А. Е., Бикбаев Р. Г.,  
Рассказов И. Л., Карпов С. В., 2018

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАСШТАБА ЦИРКУЛЯЦИИ ТОКА\***

Д. М. Гохфельд<sup>1, а</sup>, В. С. Герасимов<sup>2, 3</sup>, А. Е. Ершов<sup>2, 3</sup>, И. Л. Исаев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики имени Л. В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50

<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 ФИЦ КНЦ СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50

<sup>а</sup>E-mail: gokhfeld@iph.krasn.ru

*Сверхпроводящие материалы перспективны для использования в авиационной и космической электронике. Предложен новый метод для определения масштаба циркуляции тока и критического тока сверхпроводников из магнитных измерений.*

*Ключевые слова: критический ток, намагниченность, сверхпроводимость, поверхность, пиннинг.*

**ESTIMATION OF THE SCALE OF CURRENT CIRCULATIONS**

D. M. Gokhfeld<sup>1, а</sup>, V. S. Gerasimov<sup>2, 3</sup>, A. E. Ershov<sup>2, 3</sup>, I. L. Isaev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS  
50, Akadengorodok, 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>Institute of Computational Modeling FRC KSC SB RAS  
50, Akadengorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>а</sup>E-mail: gokhfeld@iph.krasn.ru

*Superconducting materials are perspective to be applied as electronic devices in the aerospace industry. A new method is suggested to determine the current-carrying length scale and the critical current density of superconductors.*

*Keywords: critical current, magnetization, superconductivity, surface, pinning.*

Развитие криогенной техники вызвало рост применения сверхпроводников в микроэлектронике, энергетике и технике, в том числе аэрокосмической. Также внедрению сверхпроводников способствует значительный прогресс в получении сверхпроводящих лент и монокристаллических образцов [1]. В то же время, значительная часть поисковых исследований по воздействию изменений структуры или состава на свойства сверхпроводников продолжает проводиться на поликристаллических материалах. Это связано с относительной простотой синтеза и модификаций поликристаллических сверхпроводников по сравнению с монокристаллами и лентами.

Для поликристаллических сверхпроводников транспортные измерения позволяют определить плотность межгранульного критического тока. Внутри гранул могут циркулировать токи, чья плотность на несколько порядков превышает плотность межгранульного критического тока. В гранулах высокотемпературных сверхпроводников при температуре 4,2 К плотность критического тока может достигать до

$\sim 10^{12}$  А/м<sup>2</sup>, что близко к значениям плотности тока распаривания сверхпроводника.

Для определения плотности критического тока  $J_c$  из магнитных измерений используется формула Бина:

$$J_c(H) = \Delta M(H)/kR, \tag{1}$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от геометрической формы образца,  $k = 2/3$  для цилиндрического образца;  $R$  – радиус циркуляции тока;  $\Delta M(H)$  – ширина гистерезиса намагниченности в внешнем магнитном поле  $H$ ;  $\Delta M(H) = M_{\downarrow}(H) - M_{\uparrow}(H)$ ,  $M_{\uparrow}(H)$  – ветвь петли намагниченности при увеличении  $H$ ;  $M_{\downarrow}(H)$  – ветвь петли намагниченности при уменьшении  $H$ .

Намагниченность поликристаллического сверхпроводника определяется токами, которые могут циркулировать на разных масштабах. Размер  $R$  может быть радиусом образца, усредненным радиусом гранул, или радиусом кластеров, образованных несколькими гранулами. Точность определения плотности критического тока  $J_c$  зависит от точности оценки величины  $R$ . Неверный выбор размера  $R$  приводит к значительной недооценке или переоценке величины  $J_c$ .

\* Работа поддержана РФФИ совместно с правительством Красноярского края и Красноярским краевым фондом поддержки научной и научно-технической деятельности, грант 18-42-240015p\_a.

Метод определения масштаба циркуляции тока был предложен в работе [2]. Авторы рассматривали сверхпроводящую пластину с радиусом  $R$  и толщиной  $t < R$ , перпендикулярную внешнему полю. Была найдена связь между масштабом циркуляции  $R$  и наклоном линейного участка  $M_{\downarrow}(H)$  при начале уменьшения поля после достижения максимального значения  $H_{\max}$ . Для определения  $R$  требуются тщательные, с малым шагом по  $H$ , измерения участка  $M_{\downarrow}(H)$  вблизи  $H_{\max}$ . Такой метод применим для сверхпроводящих монокристаллов и пленок с размерами  $R > t$ . В случае поликристаллических образцов метод [2] позволяет получить качественную оценку  $R$  [3].

В данной работе предлагается использовать расширенную модель критического состояния (РМКС) [4; 5] для определения масштаба циркуляции тока из асимметрии петли намагниченности относительно оси  $H$ . Асимметрия петли приводит к тому, что значения  $|M_{\uparrow}(H)|$  больше значений  $|M_{\downarrow}(H)|$  в полях  $|H| > H_p$ . В РМКС асимметрия петли намагниченности связана с отношением  $l_s$ , глубины поверхностной области с равновесной намагниченностью, к радиусу циркуляции экранирующего тока  $R$ . При протекании тока через образец, поверхностная область не участвует в переносе сверхтока [4], то есть сверхток течет только в центральной области с радиусом  $R - l_s$ . Усредненная по сечению плотность критического тока зависит от отношения  $l_s/R$ :

$$J_c(H) = J_{cb}(H) (1 - l_s(H)/R)^n, \quad (2)$$

где  $J_{cb}$  это плотность критического тока образца с размером  $R \gg l_s$ ,  $n$  это параметр, зависящий от геометрии образца [5].

Для сверхпроводника с размером  $R \gg l_s$  петли намагниченности практически симметричны относительно оси  $H$ , выполняется равенство  $|M_{\uparrow}(H)| = |M_{\downarrow}(H)|$ . Поэтому для такого образца можно записать формулу Бина в виде  $J_{cb}(H) = 2|M_{\uparrow}(H)|/kR$ . Подставив это выражение и выражение (1) для  $J_c(H)$  в формулу (2), получим

$$R = l_s(H) / [1 - (\Delta M(H)/2|M_{\uparrow}(H)|)^{1/n}]. \quad (3)$$

Глубина поверхностной области  $l_s$  при  $H = 0$  принимается равной глубине проникновения магнитного поля  $\lambda$  [4]. Значения  $M_{\uparrow}$  и  $M_{\downarrow}$  также следует определять для малых полей, но формула Бина применима при  $|H| \geq H_p$ . Оптимальная оценка  $R$  может быть получена при определении  $\Delta M$  и  $M_{\uparrow}$  в поле  $H_p$ :

$$R = \lambda / [1 - (\Delta M(H_p)/2|M_{\uparrow}(H_p)|)^{1/n}]. \quad (4)$$

С помощью выражения (4) проводилось определение  $R$  для различных сверхпроводников из измеренных или рассчитанных петель намагниченности.

Для поликристаллических образцов  $n = 3$ . В поликристаллических сверхпроводниках Y-123, Bi-2212 и Bi-2223 значение  $R$  совпадало с усредненным радиусом гранул (в  $ab$  плоскостях).

Предложенный метод может давать ошибочные значения при анализе петель намагниченности чистых материалов. В таких материалах пиннинг слабый, и петли намагниченности могут быть обратимыми даже у образцов с большими размерами. Для таких образцов значение  $l_s$  может значительно превышать  $\lambda$ .

#### Библиографические ссылки

1. Miryala M., Koblischka M. R. High-temperature superconductors: occurrence, synthesis and applications. New York : Nova Publ., 2018. 392 p.
2. Non-destructive determination of the current-carrying length scale in superconducting crystals and thin films / M. A. Angadi, A. D. Caplin, J. R. Laverty, Z. X. Shen // *Physica C*. 1991. Vol. 177. P. 479–486.
3. Study of the pinning behaviour in yttrium-doped Eu-123 superconductors / Y. Li, G. K. Perkins, A. D. Caplin et al // *Supercond. Sci. Technol.* 2000. Vol. 13. P. 1029–1034.
4. Гохфельд Д. М. Расширенная модель критического состояния // ФТТ. 2014. Т. 56. С. 2298–2304.
5. Gokhfeld D. M. Critical current density and trapped field in HTS with asymmetric magnetization loops // *J. Phys. Conf. Ser.*, 2016. Vol. 695. P. 012008.

#### References

1. Miryala M., Koblischka M. R. High-temperature superconductors: occurrence, synthesis and applications. New York : Nova Publ., 2018. 392 p.
2. Non-destructive determination of the current-carrying length scale in superconducting crystals and thin films / M. A. Angadi, A. D. Caplin, J. R. Laverty, Z. X. Shen // *Physica C*, 1991. Vol. 177. P. 479–486.
3. Study of the pinning behaviour in yttrium-doped Eu-123 superconductors / Y. Li, G. K. Perkins, A. D. Caplin et al // *Supercond. Sci. Technol.*, 2000. Vol. 13. P. 1029–1034.
4. Gokhfeld D. M. An extended critical state model // *Phys. Solid State*. 2014. Vol. 56. P. 2380–2386.
5. Gokhfeld D. M. Critical current density and trapped field in HTS with asymmetric magnetization loops // *J. Phys. Conf. Ser.* 2016. Vol. 695. P. 012008.

© Гохфельд Д. М., Герасимов В. С., Ершов В. С., Исаев И. Л., 2018

УДК 535.8; 544.77.03

## ФОТОХРОМНЫЕ ЭФФЕКТЫ В КОМПОЗИТНЫХ СРЕДАХ, СОДЕРЖАЩИХ АГРЕГАТЫ ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ В ИМПУЛЬСНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПОЛЯХ\*

А. Е. Ершов<sup>1, 2, 3, a</sup>, А. П. Гаврилюк<sup>1, 3</sup>, В. С. Герасимов<sup>1, 2, 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 имени Л. В. Киренского СО РАН

Российская Федерация, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/38

<sup>a</sup>E-mail: alexander.ershov@icm.krasn.ru

*Разработана модель фотомодификации агрегатов плазмонных наночастиц. Модель может использоваться при разработке элементов памяти и оптических интегральных микросхем нового поколения в сложных спутниковых системах.*

*Ключевые слова: поверхностный плазмонный резонанс, коллоидные агрегаты, фотомодификация.*

## PHOTOCHROMIC EFFECTS IN COMPOSITE MEDIA WITH PLASMONIC NANOPARTICLE AGGREGATES IN PULSED LASER FIELDS

A. E. Ershov<sup>1, 2, 3, a</sup>, A. P. Gavriilyuk<sup>1, 3</sup>, V. S. Gerasimov<sup>1, 2, 3</sup>, S. V. Karpov<sup>2, 3, 4</sup>

<sup>1</sup>Institute of Computational Modeling SB RAS

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

<sup>3</sup>Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

<sup>4</sup>L.V. Kirensky Institute of Physics SB RAS

50/38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>a</sup>E-mail: alexander.ershov@icm.krasn.ru

*A model of photomodification of plasmonic nanoparticle aggregates is developed. The model can be used in fabrication of the memory elements and optical integrated circuits of new generation for complex satellite systems.*

*Keywords: surface plasmon resonance, colloid aggregate, photomodification.*

Физика взаимодействия агрегатов металлических наночастиц с импульсным лазерным излучением является важной частью наноплазмоники и охватывает широкий спектр исследований и прикладных задач – от технологии создания логических элементов для перспективных типов оптических процессоров, до новых методов в медицине. Одним из интересных эффектов в таких системах является лазерная фотомодификация неупорядоченных агрегатов плазмонных наночастиц. Данное явление лежит в основе эффектов оптической памяти и имеет широкие перспективы практического применения, в том числе и в ракетно-космической отрасли. Моделирование процесса фотомодификации охватывает взаимосвязанные термодинамические, оптические и физико-химические, механические явления. Фотохромный эффект был

впервые обнаружен в [1]. Он проявляется в случае попадания частоты лазерного излучения в полосу плазмонного поглощения агрегатов и при превышении энергетического порога, что вносит значительный вклад в формирование инерционной компоненты оптического отклика.

Целью настоящей работы является разработка модели оптодинамических эффектов в многочастичных коллоидных агрегатах. До начала лазерного импульса соседние частицы в агрегате находятся в положении устойчивого равновесия ван-дер-ваальсовых и упругих сил.

Поглощение частицами излучения приводит к нагреву их металлического ядра и передаче тепловой энергии полимерному адсорбционному слою (АС) и уменьшению его модуля упругости.

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18-42-243023.



Это сопровождается нарушением баланса сил и сближением частиц вплоть до полного контакта их металлических поверхностей. Изменение межчастичного зазора проявляется в сдвиге максимума полосы плазмонного поглощения относительно лазерной длины волны. Этим обусловлены статические изменения в спектре, сохраняющиеся после окончания импульса (эффект оптической памяти). В модели движение частиц описывается методом броуновской динамики следующим образом:

$$\frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \mathbf{v}_i, \quad i = 1 \dots N, \quad (4)$$

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = (\mathbf{F}_{\text{vdw}})_i + (\mathbf{F}_{\text{el}})_i + (\mathbf{F}_v)_i + (\mathbf{F}_f)_i,$$

$$(\mathbf{F}_{\text{opt}})_i = -\frac{\partial U_{\text{opt}}}{\partial \mathbf{r}_i}, \quad (\mathbf{F}_{\text{vdw}})_i = -\sum_{j=1}^N \frac{\partial (U_{\text{vdw}})_{ij}}{\partial \mathbf{r}_i},$$

$$(\mathbf{F}_{\text{el}})_i = -\sum_{j=1}^N \frac{\partial (U_{\text{el}})_{ij}}{\partial \mathbf{r}_i}, \quad (5)$$

$$(\mathbf{F}_v)_i = -6\pi\eta(R_i + h_i)\mathbf{v}_i, \quad (\mathbf{F}_f)_i = -\mu \sum_{j=1}^N |(\mathbf{F}_{\text{el}})_{ij}| \mathbf{q}_{ij},$$

$$(U_{\text{vdw}})_{ij} = \frac{A_H}{6} \left( \frac{-2R_i R_j}{h_{ij}(h_{ij} + 2R_i + 2R_j)} - \frac{2R_i R_j}{h_{ij}(h_{ij} + 2R_i + 2R_j) + 4R_i R_j} - \ln \frac{h_{ij}^2 + 2R_i h_{ij} + 2R_j h_{ij}}{h_{ij}(h_{ij} + 2R_i + 2R_j) + 4R_i R_j} \right), \quad (6)$$

$$(U_{\text{el}})_{ij} = \frac{8}{15} (h_i + h_j - h_{ij})^{5/2} \left[ \frac{(R_i + h_i)(R_j + h_j)}{R_i + h_i + R_j + h_j} \right]^{1/2} \times$$

$$\times \frac{(E_{\text{el}})_i \cdot (E_{\text{el}})_j}{(E_{\text{el}})_i + (E_{\text{el}})_j} H(h_i + h_j - h_{ij}), \quad (7)$$

$$\frac{d(E_{\text{el}})_i}{dt} = -\frac{(E_{\text{el}})_i}{\tau_r (T_m)_i}, \quad \tau_r = \tau_0 \exp\left(\frac{U}{k_B T_m}\right), \quad (8)$$

где  $t$  – время с начала импульса,  $m_i$ ,  $R_i$ ,  $\mathbf{v}_i$ ,  $\mathbf{r}_i$ ,  $\mathbf{F}_i$  – масса, радиус, скорость, радиус вектор центра и сила действующая на  $i$ -ю частицу;  $N$  – число частиц в агрегате,  $(\mathbf{F}_{\text{vdw}})_i$ ,  $(\mathbf{F}_{\text{el}})_i$ ,  $(\mathbf{F}_v)_i$ ,  $(\mathbf{F}_f)_i$  – сила ван-дер-ваальсова притяжения частиц, упругого отталкивания АС, силы вязкого и упругого трения соответственно;  $(U_{\text{vdw}})_{ij}$ ,  $(U_{\text{el}})_{ij}$  энергии ван-дер-ваальсова и упругого взаимодействий;  $\eta$  – динамическая вязкость межчастичной среды;  $h_i$  – толщина недеформированного АС;  $\mu$  – эффективный коэффициент трения,  $\mathbf{q}_{ij}$  нормализованный вектор проекции относительной скорости частиц на плоскость контакта их АС;  $A_H$  – константа Гамакера;  $h_{ij}$  – межчастичный зазор;  $\mathbf{r}_{ij}$  – межчастичный радиус-вектор;  $(E_{\text{el}})_i$ ,  $(E_{\text{el}})_j$  – модули упругости АС частиц;  $H(x)$  – функция Хэвисайда;  $\tau_r$  – время релаксации полимерных связей в АС, значение  $\tau_0$  принято  $10^{-12}$  с,  $U$  – энергия химических связей в АС (принято 1 eV);  $(T_m)_i$  – средняя температура нагретой области вблизи  $i$ -й частицы. Нагрев и плавление металлического ядра частиц и обмен энергией с внешней средой описывается следующим образом:

$$(C_e)_i \frac{d(T_e)_i}{dt} = -g[(T_e)_i - (T_i)_i] + \frac{W_i}{V_i}, \quad (9)$$

$$\frac{d(Q_i)_i}{dt} = gV_i[(T_e)_i - (T_i)_i] + (q_1)_i V_i,$$

$$(Q_i)_i - [(Q_i)_i - (Q_1)_i] H((Q_i)_i - (Q_1)_i) +$$

$$+ [(Q_i)_i - (Q_2)_i] H((Q_i)_i - (Q_2)_i)$$

$$(T_i)_i = \frac{C_i V_i}{C_i V_i}, \quad (10)$$

где  $(T_e)_i$ ,  $(T_i)_i$  – электронная и ионная температуры  $i$ -й частицы;  $(C_e)_i$  – объемная теплоемкость электронной компоненты  $g$  – скорость обмена энергией между ионной и электронной компонентами;  $W_i$  – мощность поглощенного излучения, рассчитываемая с использованием обобщенной теории Ми [2];  $V_i$  – объем частицы;  $(q_1)_i$  – поток тепла на единицу объема частицы, описывающий тепловые потери;  $T_L(R_i)$  – температура плавления, зависящая от размеров частицы;  $(Q_i)_i$  – количество теплоты в ионной компоненте частицы;  $(Q_1)_i$ ,  $(Q_2)_i$  – количество теплоты, соответствующее началу и окончанию плавления.

Нагрев влечет увеличение константы электронной релаксации свободных электронов, что описывается с привлечением модели Друде:

$$\varepsilon(R_i, (T_i)_i) = \varepsilon_{\text{tab}} + \omega_p^2 / [\omega(\omega + i\gamma_{\text{bulk}}(T = T_0))] - \omega_p^2 / [\omega(\omega + i\gamma(R_i, (T_i)_i))], \quad (11)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала частиц;  $\varepsilon_{\text{tab}}$  – табулированные значения проницаемости макрообразца;  $\omega_p$  – плазменная частота;  $\omega$  – частота внешнего излучения;  $\gamma_{\text{bulk}}$  – константа электронной релаксации макрообразца;  $\gamma$  – константа электронной релаксации, зависящая от температуры и размера частиц;  $T_0$  – начальная температура среды. Это приводит к снижению добротности плазмонного резонанса, а, значит, также и к изменению взаимодействия лазерного излучения с агрегатом при ухудшении резонансных свойств системы. Это является причиной динамических спектральных изменений, проявляющихся лишь за время действия импульса, что особенно характерно в пикосекундном диапазоне длительностей. В разработанной оптодинамической модели взаимодействия агрегатов с импульсным лазерным излучением учитывается достаточно широкий ряд взаимосвязанных термодинамических, оптических, физико-химических, механических процессов. Реализация модели позволит воспроизвести наиболее реалистичную картину процесса фотомодификации.

## References

1. Karpov S. V., Popov A. K., Rautian S. G., Safonov V. P., Slabko V. V., Shalaev V. M., Shtokman M. I. Observation of a wavelength- and polarization-selective photomodification of silver clusters // JETP Letters, Vol. 48, No. 10. P. 571–573.
2. Yu-lin Xu. Electromagnetic scattering by an aggregate of spheres // Applied Optics. 1995. Vol. 34, No. 21. P. 4573.

© Ершов А. Е., Гаврилюк А. П., Герасимов В. С., Карпов С. В., 2018

УДК 544.77+541.18+535.8+616-006.04

**ОПТИМИЗАЦИЯ ФОТОТЕРМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ЛАЗЕРНОЙ ГИПЕРТЕРМИИ  
ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ КЛЕТОК С ПРИМЕНЕНИЕМ БИОКОНЬЮГАТОВ  
МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОЧАСТИЦ С ДНК-АПТАМЕРАМИ\***

А. С. Костюков<sup>1,2</sup>, С. А. Филимонов<sup>1,3</sup>, А. Е. Ершов<sup>1,2,4</sup>, В. С. Герасимов<sup>2,4</sup>, С. В. Карпов<sup>1,2,5,а</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 теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН

Российская Федерация, 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1

<sup>4</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН,

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44

<sup>5</sup>Институт физики имени Л. В. Киренского

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/38

<sup>а</sup>E-mail: karpov@iph.krasn.ru

*Изучение влияния высокой радиационной нагрузки на организм человека в условиях космического полета является важным направлением онкологии и космической медицины. В работе исследуются особенности импульсной лазерной гипертермии злокачественных клеток с помощью многослойных плазмонных наночастиц.*

*Ключевые слова: плазмонная фототермическая терапия, многослойные наночастицы.*

**OPTIMIZATION OF PHOTOTHERMAL METHODS OF HYPERTHERMIA OF MALIGNANT CELLS  
USING NANOPARTICLE CORE-SHELL BIOCONJUGATES WITH DNA APTAMERS**

A. S. Kostyukov<sup>1,2</sup>, S. A. Filimonov<sup>1,3</sup>, A. E. Ershov<sup>1,2,4</sup>, V. S. Gerasimov<sup>2,4</sup>, S. V. Karpov<sup>1,2,5,а</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>Kutateladze Institute of Thermophysics

1, Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

<sup>4</sup>Institute of Computational Modelling, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>5</sup>L. V. Kirensky Institute of Physics

50/38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>а</sup>E-mail: karpov@iph.krasn.ru

*Effect of corpuscular radiation on a human organism during space flight is an important area of oncology and space medicine. Peculiarities of pulsed laser hyperthermia of malignant cells are studied using multilayer plasmonic nanoparticles.*

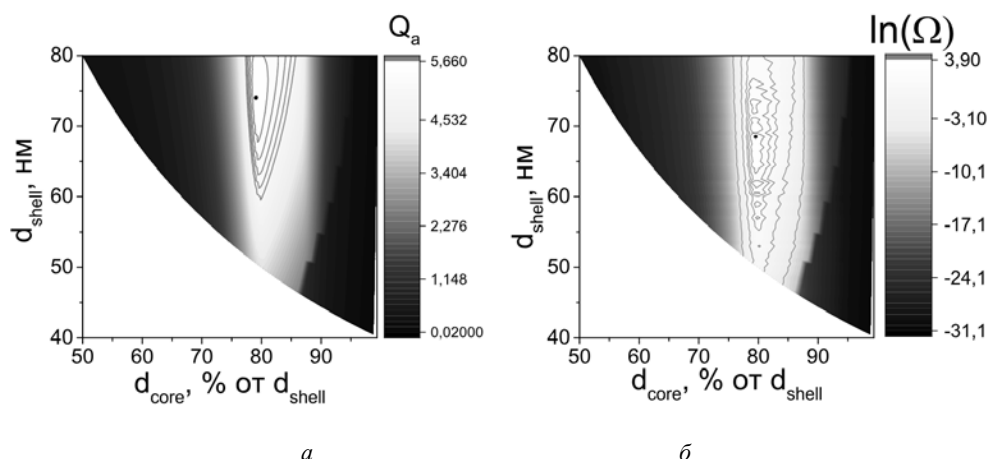
*Keywords: plasmonic photothermal therapy, multilayered core-shell nanoparticles.*

Конъюгаты плазмонных наночастиц с биомолекулами относятся к числу важнейших объектов в области биомедицины и биотехнологий [1].

Биологические комплексы на основе плазмонных наночастиц могут применяться для диагностики, терапии, визуализации и мониторинга процесса лечения злокачественных новообразований. Эти направления относятся в том числе и к космической медицине.

К числу перспективных подходов решения этих задач относится технология термического избирательного воздействия лазерным излучением на злокачественную опухоль (плазмонно-резонансная фототермическая терапии [2]). Данный метод, обладая высокой избирательностью воздействия на организм, вызывает локальный перегрев мембраны злокачественных клеток в месте расположения поглощающей наночастицы, не затрагивая здоровую ткань.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, Госзадание для Сибирского федерального университета для выполнения научных исследований в 2017–2019 гг.



Эффективность поглощения (а) и повреждающий фактор (в логарифмическом масштабе) (б) двухслойных наночастиц

Для применения всех этих методов важен выбор длины волны излучения, которая совпадает как с полосой минимального поглощения гемоглобина, что позволяет излучению проникать на наибольшую глубину, так и с полосой плазмонного поглощения наночастиц. Однородные металлические сферические наночастицы обладают существенным недостатком, связанным с тем, что максимум поглощения (плазмонный резонанс) таких частиц лежит вне области прозрачности биологических тканей. Одним из решений этой проблемы является использование многослойных наночастиц с диэлектрическим ядром, покрытым золотой оболочкой [3]. При использовании импульсного лазерного излучения пикосекундной длительности в реальной среде в ближайшем окружении поглощающей частицы возникают высокоградиентные тепловые поля, при этом параметры частицы, обладающей наибольшим оптическим поглощением, и частицы, приводящей к наиболее эффективному повреждению мембраны злокачественной клетки, могут сильно отличаться. В рамках данного исследования была разработана модель и компьютерная программа, позволяющая рассчитать эффективность воздействия нагрева частицы на мембрану клетки. В модели учитываются оптические свойства многослойных плазмонно-резонансных наночастиц, нагрев частиц лазерным излучением, теплообмен между частицей и окружающей средой. Для расчетов оптического поглощения использовалась теория Ми для многослойных частиц [4; 5]. Описание тепловых процессов в системе основано на решении нестационарного уравнения теплопроводности методом контрольных объемов [6].

Дискретизация расчетной области выполнялась на полиэдральной неструктурированной сетке. На пикосекундных импульсах большую роль начинает играть теплообмен между ионной и электронной компонентами. Он также учитывается в разработанной модели.

Процесс термического повреждения клеточной мембраны связан с процессом разрушения входящих в нее липидов в окружающей водной электролитиче-

ской среде и конформационными переходами белков мембраны [7]. Данный процесс характеризуется повреждающим фактором – вероятностью разрушения мембраны.

В ходе исследования были выполнены расчеты спектров поглощения и повреждающих факторов для двухслойных частиц, состоящих из ядра, состоящего из AZO (оксида цинка, допированного алюминием), и равномерно покрывающей его золотой оболочки. Длина волны излучения различна для каждой частицы. Она лежит в диапазоне 700–800 нм, что соответствует перестраиваемой длине волны александритового лазера, и рассчитывается, исходя из условия максимального поглощения. Длительность импульса составила 70 пс. Изменяемыми параметрами являются полный диаметр частицы  $d_{shell}$  и диаметр внутреннего ядра  $d_{core}$ .

Градиентным распределением (на рисунке, а) обозначена эффективность поглощения  $Q_a$ , а (на рисунке, б) – повреждающий фактор  $\Omega$ .

В результате выполнения работы было установлено, что в задачах лазерной гипертермии злокачественных клеток с учетом теплопереноса от частицы к мембране клетки, максимальный эффект повреждения мембраны достигается с использованием частиц меньшего размера по сравнению с максимально поглощающими частицами.

Следовательно, при выборе наночастиц для лазерной гипертермии злокачественных клеток необходимо учитывать не только оптическое поглощение используемых наночастиц и окружающей среды, но и высокоградиентные температурные поля вблизи частицы, возникающие при её облучении лазерными импульсами пикосекундной длительности.

## References

1. Khlebtsov N. G. Optics and biophotonics of nanoparticles with a plasmon resonance // Quantum Electronics, 2008. Vol. 38, No. 6. P. 504–529.
2. Plasmonic photothermal therapy (PPTT) using gold nanoparticles / X. Huang, P. K. Jain, I. H. El-Sayed et al.

// *Lasers in Medical Science*, 2008. Vol. 23, No. 3. P. 217–228.

3. Nanoshell-mediated near-infrared thermal therapy of tumors under magnetic resonance guidance / L. R. Hirsch, R. J. Stafford, J. A. Bankson et al. // *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2003. Vol. 100, No. 23. P. 13549–13554.

4. Wu Z. S., Wang Y. P. Electromagnetic scattering for multilayered sphere: Recursive algorithms // *Radio Science*, 1991. Vol. 26, No. 6. P. 1393–1401.

5. Bohren C. F., Huffman D. R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* // Weinheim, Germany, Wiley-VCH Verlag GmbH, 1998. 530 p.

6. Patankar S. V. *Numerical heat transfer and fluid flow* // Hemisphere Pub. Corp., 1980. 197 p.

7. *Biophysical Mechanisms of Cell Membrane Damage in Electrical Shock* / Raphael Lee, John Aarsvold, Wei Chen et al. // *Seminars in Neurology*, 1995. Vol. 15, No. 4. P. 367–374.

© Костюков А. С., Филимонов С. А., Ершов А. Е., Герасимов В. С., Карпов С. В., 2018

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ СЕЛЕНИДОВ МАРГАНЦА

В. В. Кретинин, О. Б. Фисенко\*, 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: fisenko\_o@mail.ru

*В твердых растворах  $Gd_xMn_{1-x}Se$  обнаружен магнетоемкостный эффект в парамагнитной области, для двух составов найдена смена знака магнетоемкости. Найдена функциональная зависимость частоты релаксации диэлектрических потерь от температуры. Обнаружен гистерезис электрической поляризации и остаточная поляризация в области протекания ионов гадолиния, критическая температура исчезновения поляризации.*

*Ключевые слова: магнетоемкость, электрическая поляризация, мультиферроики, релаксация.*

## ELECTRICAL POLARIZATION OF SOLID SOLUTIONS SELENIDES OF MANGANESE

V. V. Kretinin, O. B. Fisenko\*, M. Yu. Yukhno

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

*In solid solutions  $Gd_xMn_{1-x}Se$ , a magnetocapacitance effect was detected in the paramagnetic region, and for two compositions a change in the sign of the magnetocapacity was found. The functional dependence of the relaxation frequency of dielectric losses on temperature is found. A hysteresis of the electric polarization and residual polarization in the region of the gadolinium ions are observed, the critical temperature of the disappearance of the polarization.*

*Keywords: magnetocapacity, electric polarization, multiferroics, relaxation.*

Материалы, в которых проявляется взаимосвязь магнитных и электрических свойств, магнитоэлектрики и мультиферроики представляют интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения. Линейный магнитоэлектрический эффект может возникнуть в результате зависимости орбитальных магнитных моментов от полярных искажений, индуцированных под действием электрического поля, так называемый «ионно-орбитальный» вклад в магнитоэлектрический отклик [1]. В электрически неоднородных системах эффект Максвелла-Вагнера может привести к гигантским значениям диэлектрической проницаемости и диэлектрической релаксации в отсутствие дипольной релаксации [2]. Эффект Максвелла-Вагнера также может индуцировать магнетоемкость в отсутствие взаимодействия между магнитной и электрической подсистемами, при условии существования магнитосопротивления в материале [3]. Такие эффекты ясно демонстрируют, что наличие магнетоемкости не достаточно для отнесения этих соединений к мультиферроикам. С другой стороны, магнетоемкость без магнитоэлектрической связи может быть более практичным для технологических применений, так как не требуется существование дальнего магнитного порядка.

Электрически неоднородную систему с орбитальным вырождением получим путем замещения двухвалентных ионов марганца трехвалентными ионами

гадолиния. Так исходные соединения селенид марганца и селенид гадолиния относятся соответственно к полупроводникам и вырожденным полуметаллам, электрическое сопротивление которых отличается в  $10^6$ – $10^9$  раз [4]. Селенид гадолиния имеет кубическую кристаллическую структуру типа каменной соли и антиферромагнитную структуру 2-го типа упорядочения с температурой Нееля  $T_N = 63$  К. Селенид марганца с ГЦК решеткой имеет аналогичную магнитную структуру с  $T_N = 137$  К. Спин-орбитальное и Ян–Теллеровское взаимодействие снимают вырождение  $t_{2g}$  электронных состояний и индуцирует расщепление спектра электронных возбуждений по спину.

В результате диэлектрическими свойствами можно управлять электрическим и магнитным полями.

Цель данных исследований установить вклад в магнитоэлектрическую связь за счет орбитального упорядочения электронов и эффекта Максвелла-Вагнера в спин-неупорядоченной области в твердых растворах  $Gd_xMn_{1-x}Se$ .

В твердых растворах  $Gd_xMn_{1-x}Se$  проведено измерение удельного электросопротивления четырехзондовым методом в нулевом и магнитном поле 12 кЭ, направленным перпендикулярно току. Емкость и тангенс угла диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ) измерены на анализаторе компонентов АМ-3028 в интервале температур 90–450 К без магнитного поля и в магнитном

поле  $H = 8$  кЭ. Магнитное поле прикладывалось параллельно пластинам плоского конденсатора. Заряд на поверхности образца регистрировался на Keithley 6517b electrometer. Магнитоёмкостный эффект  $\delta\epsilon_H = (\epsilon(H, T) - \epsilon(0, T)) / \epsilon(0, T)$  определяется в результате исследования комплексной диэлектрической проницаемости.

В результате проведенных исследований в твердых растворах  $Gd_xMn_{1-x}S$  обнаружен магнитоёмкостный эффект в парамагнитной области, для двух составов найдена смена знака магнитоёмкости. Логарифм частоты релаксации диэлектрических потерь экспоненциально растет при нагревании и зависит от магнитного поля. Для концентраций ионов гадолиния в области протекания найден гистерезис электрической поляризации и остаточная поляризация, которая растет при нагревании и исчезает выше критической температуры. Остаточная поляризация связана с накоплением носителей заряда на интерфейсе ионов марганца и гадолиния, которая зависит от подвижности поляронов с перескоковым механизмом проводимости.

Экспериментальные данные объясняются в модели с орбитальным упорядочением. Замещение двухвалентного иона марганца трехвалентным ионом гадолиния приводит к вырождению  $t_{2g}$  электронных состояний, которое снимается с понижением температуры с образованием орбитальных поляронов с анизотропными эффективными массами и орбитальных корреляций магнитного углового момента на интер-

фейсе ионов марганца и гадолиния. При температуре ниже температуры Дебая поляроны пиннингуются с образованием локальных решеточных деформаций на интерфейсе, орбитального магнитного момента на узле и анизотропии диэлектрической проницаемости. Для концентраций ионов гадолиния, меньших концентрации протекания, образуется орбитальное стекло, а для более высоких концентраций индуцируется дальний орбитальный порядок на интерфейсе.

Изменение орбитальных корреляций магнитного углового момента в магнитном поле меняет анизотропию диэлектрической проницаемости. Делокализация электронов и переход к зонному типу проводимости приводит к положительной магнитоёмкости в результате эффекта Максвелла-Вагнера.

### References

1. Scaramucci A., Bousquet E., Fechner M., Mostovoy M., Spaldin N. A. Phys. Rev. Lett. 2012. Vol. 109. P. 197203.
2. G. Catalan. Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 88. P. 102902.
3. Parish M. M, Littlewood P. B. Phys. Rev. Lett. 2008. Vol. 101. P. 166602.
4. Prasad M., Pandit A. K., Ansari T. H., Singh R. A. Materials Chemistry and Physics. 1991. Vol. 30. P. 13.

© Кретинин В. В., Фисенко О. Б., Юхно М. Ю., 2018

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ В ТЕЛЛУРИДЕ КАДМИЯ

Ю. Ю. Логинов<sup>1</sup>, А. В. Мозжерин<sup>2</sup>, Н. Н. Паклин<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 компьютерного моделирования изучено образование междоузельных атомов и вакансий, а также их кластеров в виде дислокационных петель и пор в теллуриде кадмия при облучении электронами. Зависимости радиусов дислокационных петель и пор были рассчитаны в зависимости от времени облучения. Результаты моделирования сравниваются с экспериментальными данными об облучении CdTe в просвечивающем электронном микроскопе.*

*Ключевые слова: теллурид кадмия, полупроводниковые материалы, численное моделирование, дислокационные петли.*

## COMPUTER SIMULATION OF THE STRUCTURAL DEFECTS FORMATION IN CADMIUM TELLURIDE

Y. Y. Loginov<sup>1</sup>, A. V. Mozzherin<sup>2</sup>, N. N. Paklin<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 formation of interstitial atoms and vacancies has been conducted, as well as their clusters in the form of dislocation loops and voids in cadmium telluride under irradiation by electrons, has been carried out. The dependences of the radii of dislocation loops and voids have been calculated depending on the irradiation time. The results of the simulation are being compared with the experimental data on the irradiation of CdTe in a transmission electron microscope.*

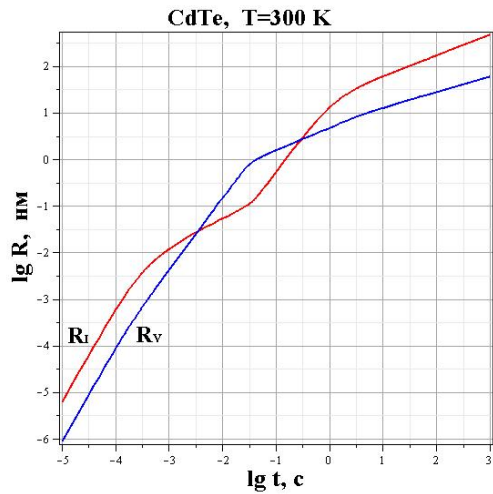
*Keywords: cadmium telluride, semiconductor materials, computer simulation, dislocation loops*

Теллурид кадмия (CdTe) является одним из основных материалов полупроводниковой микроэлектроники и имеет ширину запрещенной зоны 1,5 эВ, что обеспечивает хорошее соответствие солнечному спектру. Относительно высокий средний атомный номер материала и способность достигать высоких значений удельного сопротивления позволяют использовать CdTe для детекторов гамма и рентгеновского излучения [1]. Однако материал 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 в просвечивающем электронном микроскопе вызывает образование и эволюцию структурных дефектов [2]. Ранее была определена скорость химической реакции в CdTe, чтобы описать динамику повреждения при электронном облучении в CdTe [3]. Основываясь на экспериментальных исследованиях, описанных в [2], известно, что в дополнение к образованию между-

узельных кластеров в CdTe наблюдаются кластеры вакансий, поэтому наша модель модифицирована с учетом образования вакансионных кластеров, а результаты моделирования сравниваются с ранее полученными экспериментальными данными.

На рисунке приведены данные расчетов зависимости радиусов междоузельных скоплений и вакансионных пор от времени облучения при 300 К.

Сравнивая результаты численного моделирования процессов образования кластеров точечных дефектов междоузельного и вакансионного типов в теллуриде кадмия с экспериментальными данными, можно сделать вывод о хорошем согласии эксперимента и теории. Для достижения максимальной согласованности необходимо улучшить существующую модель и ввести в нее параметр, учитывающий изменение количества полупроводниковых узлов решетки, уменьшающихся при облучении тонкой фольги в электронном микроскопе.



Зависимость радиуса междуузельных скоплений ( $u_5$ ) и пор ( $u_6$ ) от времени облучения при температуре 300 К

### Библиографические ссылки

1. Elsharkawy M., Kanda G., Abdel-Hady E. Keeble D 2016 Appl. Phys. Lett., 108 242102.
2. Логинов Ю. Ю., Браун П. Д., Дьюроуз К. Закономерности образования структурных дефектов в полупроводниках А2В6. М. : Логос, 2003. 304 с.
3. Gué A, Djafari-Rouhani M, Estève D, IdrissiSaba H 1991 J. Phys. I, 1 97.

### References

1. Elsharkawy M., Kanda G., Abdel-Hady E. Keeble D 2016 Appl. Phys. Lett., 108 242102
2. Loginov Y., Brown P., Durose K. The Regularities of Structural Defect Formation in Semiconductors II–VI. Moscow, Logos, 2003.
3. Gué A, Djafari-Rouhani M, Estève D, IdrissiSaba H 1991 J. Phys. I, 1 97.

© Логинов Ю. Ю., Мозжерин А. В.,  
Паклин Н. Н., Брильков А. В., 2018



## МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ПЛЕНКАХ ВИСМУТ-НЕОДИМОВЫХ ФЕРРИТОВ-ГРАНАТОВ\*

А. Н. Масыгин<sup>1</sup>, О. Б. Фисенко

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

<sup>1</sup>E-mail: albert.masyugin@mail.ru

*Исследована температурная зависимость магнитострикции и электрострикции на эпитаксиальных пленках висмут-неодимовых ферритов-гранатов. Изучено поведение диэлектрической проницаемости пленок в магнитном поле при температурах 80–500 К. Полученные результаты вносят вклад в фундаментальное развитие новых электрооптических устройств и как следствие в ракетно-космической отрасли.*

*Ключевые слова: магнитострикция, электрострикция, мультиферроик, эпитаксия, висмут-неодимовый феррит-гранат.*

## MAGNETOELECTRIC EFFECT IN BISMUTH-NEODYMIUM FERRITE-GRANATE FILMS

A. N. Masyugin<sup>1</sup>, O. B. Fisenko

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

<sup>1</sup>E-mail: albert.masyugin@mail.ru

*We investigated the temperature dependence of the magnetostriction and electrostriction on epitaxial films of bismuth-neodymium ferrite-garnets. We studied the behavior of the dielectric permittivity of films in a magnetic field at temperatures of 80–500 K. The results obtained contribute to the fundamental development of new electro-optical devices and as a result in the rocket and space industry.*

*Keywords: magnetostriction, electrostriction, multiferroic, epitaxy, bismuth-neodymium ferrite-garnet.*

Висмут замещенные иттриевый феррит гранаты находят применение в качестве пространственных модуляторов света, индикаторов и других магнитооптических устройств (МО) в области видимого света [1]. Иттриевый феррит гранат имеет кубическую симметрию с центром инверсии [2] и при низких температурах (ниже 130 К) в них обнаружен структурный переход с триклинным искажением решетки [3]. В пленках (BiLu)<sub>3</sub>(FeGa)<sub>5</sub>O<sub>12</sub> толщиной 10 мкм, выращенных методом жидкофазной эпитаксии на подложке Gd<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> с ориентацией подложки (210) найдена электрическая поляризация доменных стенок, которую можно переключать внешним магнитным полем [4].

Исследовались два типа пленок Nd<sub>1</sub>Bi<sub>2</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>(450nm)/Nd<sub>2</sub>Bi<sub>1</sub>Fe<sub>4</sub>Ga<sub>1</sub>O<sub>12</sub>(90nm) на подложке из стекла и Nd<sub>0.5</sub>Bi<sub>2.5</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>(450nm) на монокристаллической подложке Gd<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub>(GGG) в направлении (111). Пленки получены методом эпитаксиального осаждения.

Магнитные свойства пленок исследовались на основе петель гистерезиса M(H), измеренных градиентным магнитометром в магнитных полях до 2 кЭ, направленных перпендикулярно и параллельно поверхности пленки. Установлено уменьшение намагничен-

ности насыщения и коэрцитивного поля при замещении железа ионами галлия. Проведено исследование диэлектрической проницаемости в интервале температур 80–500 К и магнитных полей до 13 кОе. Обнаружено увеличение емкости пленки в магнитном поле ниже температуры перехода в магнитоупорядоченное состояние. Максимум магнетоемкости пленки на стекле достигает двух процентов при T = 200 К (рис. 1). Если подложку и пленку представить в виде последовательно соединенных конденсаторов, измерить емкость подложки и выделить емкость пленки. В этом случае магнетоемкость пленки увеличится на порядок.

Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты (рис. 2) при низких температурах удовлетворительно описывается в модели Дебая с частотой релаксации 5МГц. В области низких частот  $\omega < 300$  Гц диэлектрическая релаксация обусловлена перескоком электронов по дефектам пленки  $\text{Im}(\epsilon) \sim \sigma/\omega$ . При температурах выше комнатной в диэлектрическую восприимчивость добавляется диффузионный вклад доменных границ в виде

$$\begin{aligned} \text{Re}(\epsilon) &= \epsilon_0 + \chi_0 / (1 + (\omega\tau)^2) - v \lg(\omega), \\ \text{Im}(\epsilon) &= \chi_0 \omega\tau / (1 + (\omega\tau)^2) + \sigma/\omega. \end{aligned} \quad (1)$$

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ-БРФФИ № 18- 52-00009, № 18-32-00079 mol\_a.

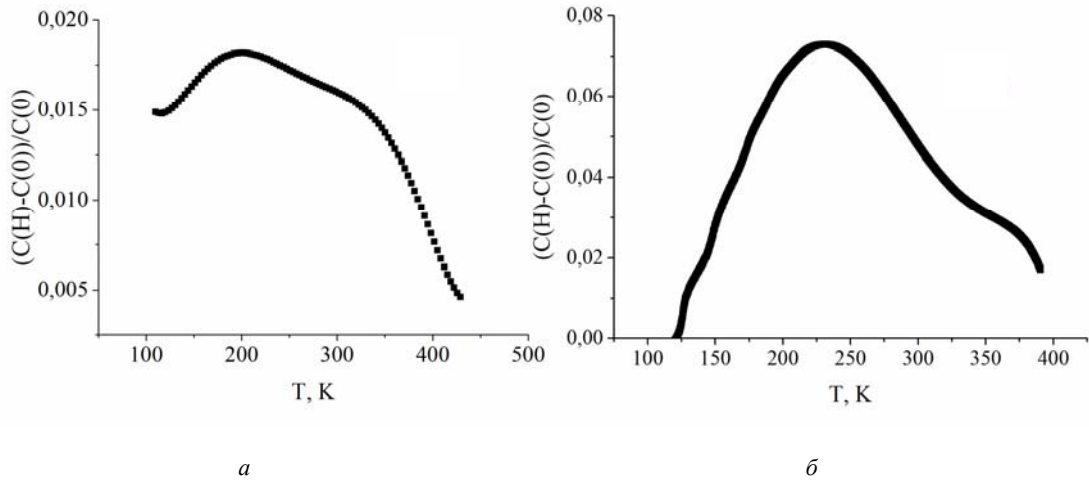


Рис. 1. Магнетоемкость пленок  $\text{Nd}_1\text{Bi}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}(450\text{nm})/\text{Nd}_2\text{Bi}_1\text{Fe}_4\text{Ga}_1\text{O}_{12}(90\text{nm})$  на подложке из стекла (а) и  $\text{Nd}_{0,5}\text{Bi}_{2,5}\text{Fe}_5\text{O}_{12}(450\text{nm})$  на монокристаллической подложке  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  (GGG) (б) от температуры

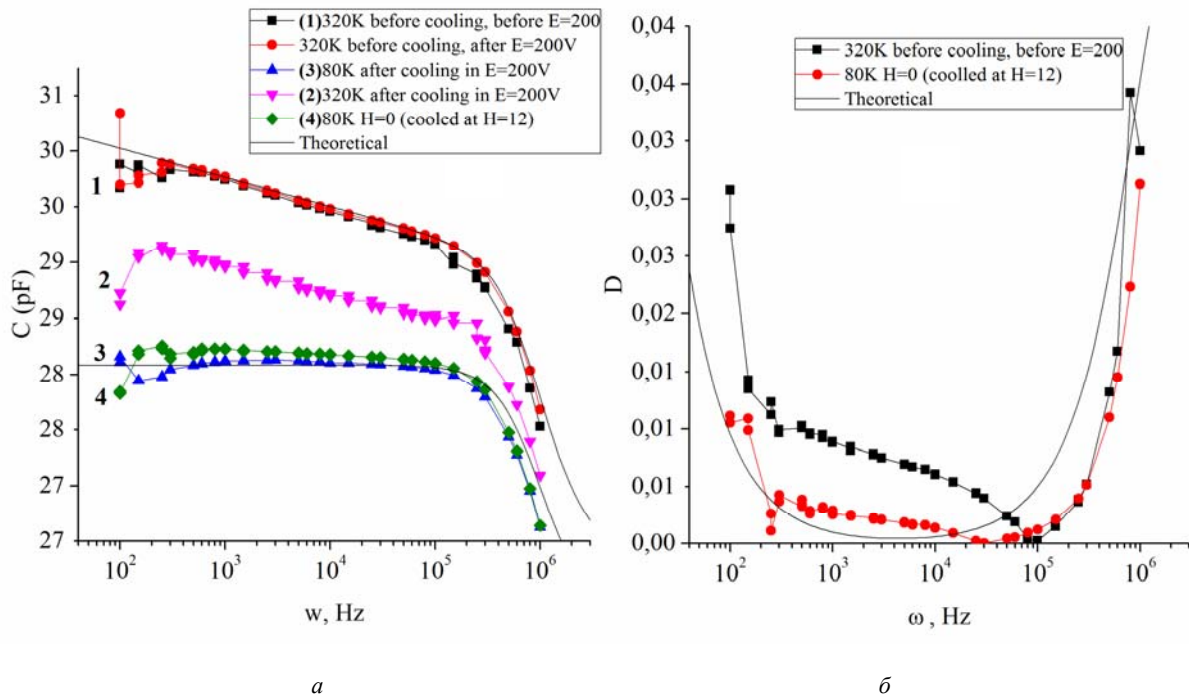


Рис. 2. Частотная зависимость емкости пленки  $\text{Nd}_1\text{Bi}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}(450\text{nm})/\text{Nd}_2\text{Bi}_1\text{Fe}_4\text{Ga}_1\text{O}_{12}(90\text{nm})$  на стекле (а) и тангенс диэлектрических потерь (б):  
 1 – исходное состояние при  $T = 320\text{ K}$ ; 2 – после охлаждения в поле  $E = 400\text{ в/см}$  и нагреве до  $T = 320\text{ K}$ ;  
 3 – после охлаждения в поле  $E = 400\text{ в/см}$  при  $T = 80\text{ K}$ , 4 – после охлаждения в магнитном поле  $H = 12\text{ кОе}$  при  $T = 80\text{ K}$ . Емкость и диэлектрические потери, вычисленные в модели Дебая (1) (сплошные линии)

Динамические характеристики электрической поляризации на больших временах определим путем измерения заряда при включении прямоугольного импульса напряжения с амплитудой  $E = 400\text{ в/см}$  с частотой  $\omega = 0.01, 0.003\text{ Гц}$ . Зависимость релаксации поляризации от времени невозможно описать одной функциональной зависимостью типа экспоненты, логарифма или степенной функцией.

При включении и выключении электрического поля  $E = 400\text{ в/см}$  изменение электрической поляриза-

ции в магнитном поле достигает 40 % и зависит от направления магнитного поля относительно пленки. Поляризация линейно растет с увеличением магнитного поля и коэффициент магнитоэлектрического взаимодействия является тензором второго ранга  $P_i = \alpha_{ij} H_j$ , температурная зависимость которого имеет два максимума.

Неоднородные электрические состояния, типа доменов и доменных границ, определены импедансной спектроскопией. Импеданс и сопротивление на пере-

менном токе квадратично растут с увеличением магнитного поля.

### References

1. Ishikawa H., Nakajima K., Machida K., Tanii A. Optical isolators using Bi-substituted rare-earth iron garnet films. *Opt. Quantum Electron*, 22. P. 517–528 (1990). Doi: 10.1007/BF02189502.
2. Krichevsov B. B., Pavlov V. V., Pisarev P. V. The giant linear magnetoelectric effect in garnet ferrite films, *J. Exp. Theor. Phys. Lett.*, 49 (8) (1989). P. 466–469.
3. Kita E., Takano S., Tasaki A., Siraatori K., Kohn K., Kimura S. Low-temperature phase of yttrium iron garnet (YIG) and its first-order magnetoelectric effect, *J. Appl. Phys.* 64 (1988) 5659–5661. Doi: 10.1063/1.342262.
4. Pyatakov A. P., Sechin D. A., Sergeev A. S., Nikolaev A. V., Nikolaeva E. P., Logginov A. S., Zvezdin A. K. Magnetically switched electric polarity of domain walls in iron garnet films, *EPL*. 93 (2011). Doi: 10.1209/0295-5075/93/17001.

© Масюгин А. Н., Фисенко О. Б., 2018

УДК: 661.844 [544.541+538.958]

## О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОРОШКОВ $BaSO_4$ В КАЧЕСТВЕ ПИГМЕНТОВ ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ\*

М. М. Михайлов, А. А. Ловицкий<sup>1</sup>

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 40

<sup>1</sup>E-mail: aleksey\_pavlodar@mail.ru

*Проведено сравнение радиационной стойкости порошка  $BaSO_4$  и используемых в качестве пигментов ТРП космических аппаратов порошков  $ZnO$  и  $TiO_2$ . Исследовано влияние модифицирования наночастицами  $SiO_2$  и  $ZrO_2$  на увеличение радиационной стойкости порошка  $BaSO_4$ .*

*Ключевые слова: сульфат бария, терморегулирующие покрытия, модифицирование, пигменты, наночастицы, космические аппараты, излучения.*

## ABOUT THE POSSIBILITY OF USING $BaSO_4$ POWDERS AS PIGMENTS OF THERMOREGULATING COATINGS OF SPACE APPLIANCES

M. M. Mikhailov, A. A. Lovitskiy<sup>1</sup>

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
40, Lenina Av., Tomsk, 634050, Russian Federation

<sup>1</sup>E-mail: aleksey\_pavlodar@mail.ru

*The radiation resistance of  $BaSO_4$  powder and the  $ZnO$  and  $TiO_2$  powders used as pigments for TRP are compared. The effect of modification of  $SiO_2$  and  $ZrO_2$  nanoparticles on the increase in radiation resistance of  $BaSO_4$  powder is studied.*

*Keywords: barium sulfate, thermoregulatory coatings, modification, pigments, nanoparticles, space vehicles, radiation.*

Порошки  $BaSO_4$  обладают высокой отражательной способностью в УФ, видимой и ближней ИК-областях спектра. Поэтому они используются в качестве отражающих покрытий интегрирующих сфер спектрофотометров во всех странах.

Ширина запрещенной зоны  $BaSO_4$  такова, что край основного поглощения находится в области  $\lambda < 200$  нм. Эти свойства порошков обуславливают почти полное отсутствие поглощения основной части солнечного спектра. Поэтому интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения ( $a_s$ ) порошков  $BaSO_4$  с соответствующим гранулометрическим составом и при отсутствии или малом содержании примесей может быть меньше 0,1. Реально достигнутое значение  $a_s$  составляет порядка 0,07 [1].

На терморегулирующие покрытия (ТРП), расположенные на внешних поверхностях космических аппаратов (КА), действуют различные виды излучений. Поэтому исследования фото- и радиационной стойкости порошков  $BaSO_4$ , предназначенных для применения в качестве пигментов ТРП, представляют научный интерес и практическую значимость. В настоящее время в космической отрасли очень распространено использование  $ZnO$  и  $TiO_2$  в качестве пигментов для ТРП КА.

Целью работы было сравнение радиационной стойкости порошков  $ZnO$  и  $TiO_2$ , используемых в качестве пигментов ТРП, с радиационной стойкостью порошка  $BaSO_4$  и определение эффективности модифицирования порошка  $BaSO_4$  наночастицами  $SiO_2$  и  $ZrO_2$ .

В исследованиях использовали порошок  $BaSO_4$  фирмы NACALAI TESQUE, INC класса EP (Extra Pure Reagent), нанопорошок  $SiO_2$  фирмы «Plasmotherm» с удельной поверхностью  $120 \text{ м}^2/\text{г}$  и нанопорошок  $ZrO_2$  с размером зерен 20–40 нм, изготовленный на Сибирском химическом комбинате. Модифицирование осуществляли высокотемпературным способом: диспергирование в дистиллированной воде, выпаривание при  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , прогрев в муфельной печи в течение 2 часов при  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , перетирание в фарфоровой ступке. Порошки запрессовывали в металлические чашечки диаметром 28 мм под давлением 1 МПа, которые устанавливали в установке – имитаторе условий космического пространства «Спектр» [2]. Спектры диффузного отражения регистрировали в вакууме в диапазоне 0,2–2,1 мкм до облучения ( $\rho_{\lambda 0}$ ), затем облучали электронами [ $E = 30 \text{ кэВ}$ ,  $\varphi = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ,  $T = 300 \text{ К}$ ,  $P = 5 \cdot 10^{-7} \text{ тор}$ ], регистрировали спектры облученных образцов ( $\rho_{\lambda \Phi}$ ) на месте облучения (in situ). Использовали порошок  $ZnO$  квалификации ОСЧ-14-2, порошок  $TiO_2$  – марки «Kronos».

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы Министерства образования и науки РФ, проект № 14.574.21.0176.

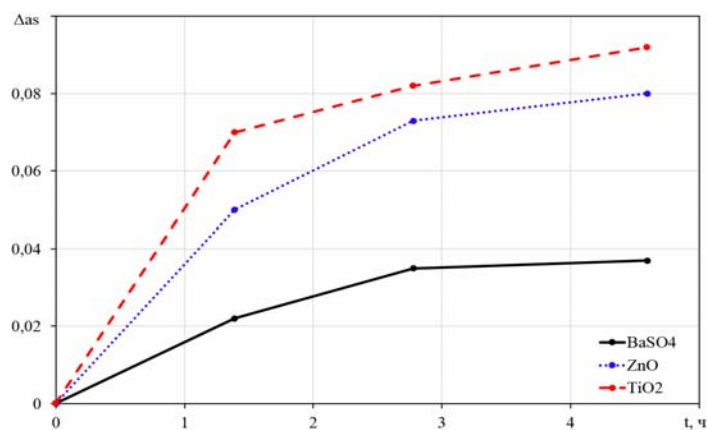


Рис. 1. Зависимость изменений коэффициента поглощения  $a_s$  после облучения электронами порошков BaSO<sub>4</sub>, ZnO и TiO<sub>2</sub>

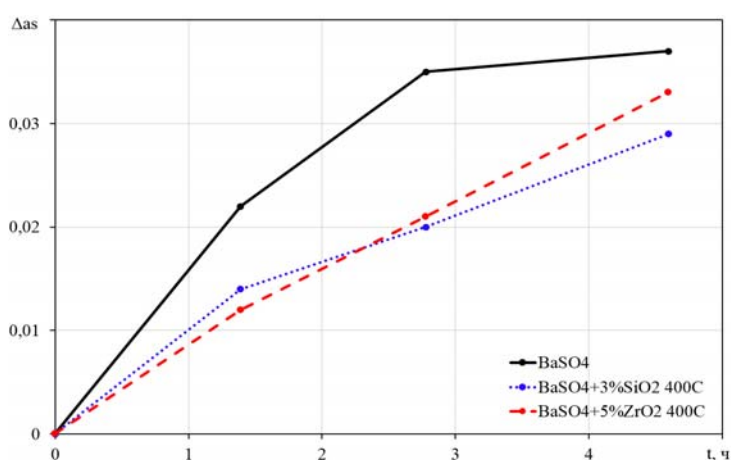


Рис. 2. Зависимость изменений коэффициента поглощения  $a_s$  от времени облучения электронами порошка BaSO<sub>4</sub>, модифицированного наночастицами SiO<sub>2</sub> и ZrO<sub>2</sub>

Для сравнения радиационной стойкости порошки BaSO<sub>4</sub>, ZnO и TiO<sub>2</sub> облучали электронами ( $E = 30$  кэВ,  $E = 300$  К) и рассчитывали изменения коэффициента поглощения  $a_s$  после каждого периода облучения. Результаты сравнения показаны на рис. 1.

Из рисунка следует, что порошок BaSO<sub>4</sub> обладает лучшей радиационной стойкостью по сравнению с порошками ZnO и TiO<sub>2</sub>. Изменения коэффициента поглощения  $a_s$  у порошка BaSO<sub>4</sub> в 2,2 раза, чем у порошка ZnO и в 2,5 раза меньше, по сравнению с порошком TiO<sub>2</sub>.

Предварительно нами было установлено оптимальное значение концентрации наночастиц SiO<sub>2</sub> и ZrO<sub>2</sub> для модифицирования порошка BaSO<sub>4</sub>, равное 3 и 5 масс. % соответственно. Поэтому модифицирование осуществляли при этих значениях концентрации. На рис. 2 приведены зависимости  $\Delta a_s$  от времени облучения электронами с энергией 30 кэВ при интенсивности  $\phi = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Из рис. 2 следует, что радиационная стойкость порошка BaSO<sub>4</sub>, модифицированного наночастицами выше по сравнению с не модифицированным порошком. Наиболее эффективным является модифицирование наночастицами SiO<sub>2</sub> при концентрации 3 %.

Значение  $\Delta a_s$  этого порошка при различном времени облучения в 1,3–1,8 раз меньше по сравнению с не модифицированным порошком.

Выполненные исследования позволяют заключить, что по своим оптическим свойствам и радиационной стойкости порошок BaSO<sub>4</sub> имеет лучшие значения, по сравнению с порошками ZnO и TiO<sub>2</sub> и может быть рекомендован для использования в качестве пигмента ТРП КА, а его модифицирование наночастицами SiO<sub>2</sub> и ZrO<sub>2</sub> позволит существенно увеличить радиационную стойкость.

## References

1. Gilmore D. G. Spacecraft Thermal Control Handbook. Vol. 1: Fundamental Technologies 2 edition. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), Reston, Virginia, 2002. 836 p.
2. Apparatus for study of diffuse-reflection and luminescence spectra of solids in vacuum / L. G. Kositsyn, M. M. Mikhailov, N. Y. Kuznetsov, M. I. Dvoretckii // Instruments and experimental techniques New York, 1985. Vol. 28. P. 929–932.

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ ГЕТЕРОГЕННОГО РАДИАЦИОННОГО ЭКРАНА**

И. К. Райхерт, 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: irina.raikhert@mail.ru

*В настоящее время одной из приоритетных задач в ракетно-космической сфере является разработка новых комбинаций защитных экранов и определение из них композиций с минимальной массой, обеспечивающих надежность систем управления спутника.*

*Ключевые слова: оптимизация, экранирование, композиционный материал, излучение, толщина покрытия, компьютерное моделирование.*

**OPTIMIZATION OF THE LAYER THICKNESS OF A HETEROGENEOUS RADIATION SHIELD**

I. K. Rayhert, S. V. Telegin

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

*Currently, one of the priorities in the rocket and space sector is the development of new combinations of protective screens and the definition of compositions with a minimum mass, ensuring the reliability of satellite control systems.*

*Keywords: optimization, shielding, composite material, radiation, coating thickness, computer modelling.*

В эпоху развития ракетно-космической техники человечество разрабатывает новые модели спутников. И одна из наиболее важных задач – это защита космических аппаратов от излучения. Для защиты спутников от ионизирующего излучения естественных радиационных поясов Земли [1] был рассмотрен гетерогенный радиационный слой и проведен сравнительный анализ с основным радиационно-защитным материалом для космических аппаратов – алюминием [2]. Моделирование выполнено методом Монте-Карло в программе ЕРНСА [3; 4] с характерным спектром геостационарной орбиты и энергией излучения 0,04–7 МэВ. Основные критерии для сравнения: толщина и масса материала, массовая толщина, число электронов, прошедших через барьер и число фотонов, вышедших из барьера.

Необходимость поиска оптимальной толщины, прежде всего, связана с решением задачи минимизации массы при максимальном ослаблении [5].

При выборе материалов учитывались их физические свойства. Были рассмотрены гетерогенный и алюминиевый экраны. Радиационный защитный эк-

ран состоит из трех слоев (табл. 1). Вещества в нем расположены по мере возрастания плотности. Для первого (внешнего) слоя выбран композит карбида бора с эпоксидной смолой в процентном соотношении 40 % : 60 %. Второй слой – алюминиевый сплав АМг6. Третий слой из никеля – вещества, обладающего наибольшей плотностью.

Для определения оптимальной толщины каждого вещества было выполнено моделирование ионизирующего излучения, действующее на каждый материал по отдельности при цилиндрической форме образцов с радиусом равным 5 см.

Сравнение экранирующих свойств материалов защитных экранов представлено в табл. 2. Количество прошедших через экран электронов и образовавшихся фотонов нормируется на одну частицу.

Многослойная структура экрана уступает алюминию по минимальной массе и толщине. Однако она обладает преимуществом по радиационной защите в сравнении с алюминием, что является основной целью в решении задачи радиационной устойчивости материалов.

Таблица 1

**Структура гетерогенного радиационного экрана**

Экран	$B_4C+ЭС(40\% ; 60\%)$	АМг6	Ni
Толщина, мм	0,435	1	0,127

## Сравнение свойств материалов

Вещество	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Толщина, мм	Массовая толщина, кг/м <sup>2</sup>	Масса материала, г	Доля прошедших электронов	Доля вышедших фотонов
В <sub>4</sub> С+ЭС (40 %; 60 %)	1 518	0,435	66,03	5,19	0,024 5	0,001 3
АМг6	2 650	1,000	265,00	20,81	0,001 8	0,001 0
Ni	8 902	0,127	113,06	8,88	0,000 5	0,000 6
Весь экран	2 843*	0,156	197,24*	34,88	0,000 5	0,000 6
Алюминий	2 700	0,073	197,24	15,49	0,003 1	0,001 5

Примечание. \* – среднее значение.

Таким образом, данная композиция может найти применение в аэрокосмической отрасли в качестве защитных экранов космических аппаратов.

## Библиографические ссылки

1. Кимель Л. Р., Машкович В. П. Защита от ионизирующих излучений : справ. 2-е изд. М. : Атомиздат, 1972. 312 с.
2. Гетерогенный радиационно-защитный экран для космических аппаратов / С. В. Телегин, В. Н. Саунин, М. Н. Драганюк и др. // Вестник СибГАУ. 2015. № 4 (16). С. 969–974.
3. Беспалов В. И. Пакет программ ЕРНСА для статистического моделирования поля излучения фотонов и заряженных частиц // Изв. вузов. Физика. Приложение. 2000. № 4. С. 159–165.
4. Телегин С. В., Драганюк О. Н. Компьютерная лаборатория: метод. указания по работе с пакетом программ PCLab по дисциплине «Специальный физический практикум» для магистрантов направления подготовки 03.04.02 «Физика» / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2015. С. 13–45.
5. Райхерт И. К., Телегин С. В. Оптимизация толщин слоёв защитных экранов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики (9–13 апреля 2018, г. Красноярск) : в 3 т. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2018. С. 311–313.

## References

1. Kimmel L. R., Mashkovich V. P. *Zashhita ot ionizirujushhih izluchenij* [Protection against ionizing radiation] : right. 2nd ed. M. : Atomizdat, 1972. 312 p.
2. Geterogennyy radiatsionno-zashchitnyy ekran dlya kosmicheskikh apparatov / S. V. Telegin, V. N. Saunin, M. N. Draganyuk et al. // *Vestnik SibGAU*. 2015. № 4 (16). P. 969–974.
3. Беспалов В. И. *Paket programm EPHCA dlja statisticheskogo modelirovaniya polja izlucheniya fotonov i zarjzhennyh chastic* [The software Package BURNS for statistical modeling of radiation fields of photons and charged particles] // *Izv. higher educational. Physics. Application*. 2000. № 4. P. 159–165.
4. Telegin S. V., Draganic O. N. Computer lab: method. guidelines for working with the PCLab software package on the subject “Special physical practicum” for students training areas 03.04.02 “Physics”. Krasnoyarsk: Publishing house of SibSAU, 2015. P. 13–45.
5. Raihert I. K., Telegin S. V. *Optimizacija tolshhin slojov zashhitnyh jekranov* [Optimization of the thickness of layers of protective shields] // *Actual problems of aviation and cosmonautics* (9–13 April 2018, Krasnoyarsk) : in 3 t. / under the General editorship of Y. Y. Loginov ; Sib. state. un-so-called Krasnoyarsk, 2018. P. 311–313.

© Райхерт И. К., Телегин С. В., 2018

УДК 544.653.1

**НАНОСТРУКТУРНЫЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ НЕОРГАНИЧЕСКИЕ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ, СФОРМИРОВАННЫЕ МЕТОДОМ МИКРОПЛАЗМЕННОГО ОКСИДИРОВАНИЯ**

А. Е. Рябиков\*, Ю. Н. Долгова, А. И. Мамаев, Т. А. Баранова, А. К. Чубенко

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 36  
E-mail: aer000093@mail.ru

*Методом микроплазменного оксидирования получены неметаллические неорганические радиопоглощающие покрытия для деталей космических аппаратов. Покрытия сформированы на сплавах алюминия и титана, в электролитах, содержащих ионы переходных металлов. Данные рентгеноструктурного анализа подтверждают наличие наноразмерных фаз металлического железа и кобальта, а также ферритов. Измеренные коэффициенты отражения в диапазоне частот от 680–900 составляют не более 45 %.*

*Ключевые слова: микроплазменное оксидирование, электромагнитное излучение, магнитоактивные материалы, ферриты, наноструктурные материалы.*

**NANOSTRUCTURAL NON-METALLIC INORGANIC RADIO-ABSORBING COATINGS FOR SPACE TECHNOLOGY, GENERATED BY MICRO-ARC OXIDATION METHOD**

A. E. Ryabikov\*, U. N. Dolgova, A. I. Mamaev, T. A. Baranova, A. K. Chubenko

National Research Tomsk State University  
36, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation  
E-mail: aer000093@mail.ru

*Nonmetallic inorganic coatings on aluminum and titanium alloys were produced by using microplasma oxidation method for parts of space devices. Coatings are formed on alloys of aluminum and titanium, in electrolytes containing ions of transition metals. X-ray diffraction data confirm the presence of nanoscale phases of metallic iron and cobalt, as well as ferrites. The measured reflection coefficient in the frequency range from 680–900 is not more than 45 %.*

*Keywords: microplasma oxidation, electromagnetic radiation, magnetoactive materials, ferrites, nanostructured materials.*

Радиопоглощающие материалы (РПМ) – современный класс материалов, предназначенный бороться с проблемами, возникающими при использовании электромагнитного излучения (ЭМИ). В современном мире высоких технологий ЭМИ используется для функционирования подавляющего числа электронных устройств в различных отраслях и сферах деятельности, в том числе и ракетно-космической отрасли. Для такой наукоемкой отрасли чрезвычайно остро стоит вопрос о помехозащищенности радиоэлектронной аппаратуры, ускорении их работы с применением более мощных частот электромагнитного спектра, а также защите от вредного воздействия ЭМИ операторов, контактирующих с этим оборудованием.

Существование такого спектра проблем делает актуальной задачу разработки эффективных материалов, поглощающих ЭМИ. К настоящему моменту известно множество примеров материалов, обладающих внушительными показателями поглощения в различных частотных диапазонах, различающихся по геометрии, фазовому и элементному составу, способам оформления и т. д. [1]. Однако основной задачей при создании РПМ является формирование материалов,

обладающих минимальным отражением в широкой области электромагнитного спектра.

Последние исследования показали, что формирование РПМ возможно методом микроплазменного оксидирования (МПО). Данный метод активно используется с конца 70-х годов XX-го века для обработки изделий из металлов и сплавов вентильной группы (Mg, Al, Ti, Zr и т. д.) [2; 3]. Его ключевой особенностью является локализация высоких энергетических потоков на обрабатываемой детали (аноде), вследствие чего происходит формирование неметаллического слоя, за счет металла основы и компонентов электролита. В настоящее время ведутся разработки в области совершенствования режимов ведения процесса, оборудования, теории метода, в том числе и в ТГУ под руководством профессора А. И. Мамаева [4].

РПМ, полученный данным способом, представляет собой покрытие, состоящее из окисленной формы металла основы (оксид-гидроксид) и компонентов электролита. Таким образом, используя различные составы электролитов, а также параметры обработки (напряжение, длительность импульса, время обработки), возможно получать покрытия, отличающиеся как



качественным, так и количественным составом. Возможность встраивания компонентов электролита в покрытие объясняется пробоем оксидного слоя металла основы и воздействия на электролит, поступающий в каналы пробоя, образующихся плазменных разрядов. За счет этого протекают высокотемпературные химические превращения (в том числе и плазмохимические), которые позволяют формировать кристаллические оксидные фазы.

В данной работе для достижения высокого уровня поглощения ЭМИ при минимальном отражении в состав базовых электролитов для МПО (силикат и тетраборат натрия, фосфаты и пирофосфаты щелочных металлов, а также щелочи) вводились добавки, содержащие ионы переходных металлов (Fe, Co, Ni, Mn, V) [5]. Как известно, элементы триады железа, а также ряд их соединений с другими переходными металлами, обладают высокими магнитными характеристиками за счет ферро- и ферримагнитного упорядочивания. По данным рентгеноструктурного анализа сформированные в результате МПО покрытия в электролитах, содержащих гексацианоферрат (III) калия и этилендиаминтетраацетатный комплекс кобальта (II), содержали в своем составе наноразмерные включения металлического железа и кобальта, а также фазу сложных оксидов – ферритов. Проведенные исследования радиопоглощения показали, что коэффициент отражения в диапазоне частот от 680–900 ГГц составлял не более 30 % для титанового сплава и не более 45 % для алюминиевого сплава.

Таким образом, благодаря формированию наноразмерных включений магнитоактивных фаз, покрытия, сформированные методом МПО, обладают радиопоглощающими свойствами в терагерцовой области. Подобные наноразмерные включения формируются, как на титановых, так и алюминиевых сплавах, но в предложенном диапазоне частот наибольший эффект достигается для титановых сплавов (менее 10 %).

#### Библиографические ссылки

1. Латыпова А. Ф., Калинин Ю. Е. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8, № 6. С. 70–76.
2. Мамаев А. И., Мамаева В. А. Сильноточковые процессы в растворах электролитов. Новосибирск : Изд-во СО РАН. 2005. 254 с.

3. Butyagin P. I., Khokhryakov Ye. V., Mamaev A. I. Microplasma systems for creating coatings on aluminium alloys // *Materials Letters*. 2003. Vol. 57, № 11. P. 1748–1751

4. Пат. 2637871 Российская Федерация, МПК C25D 11/02, Способ получения радиопоглощающего покрытия на вентильных металлах и их сплавах и покрытие, полученное данным способом / Мамаев А. И., Чубенко А. К., Суслыев В. И. ; заявитель и патентообладатель Мамаев А. И. (RU). № 2015141241 ; заявл. 28.09.2015, опубл. 07.12.2017, Бюлл. № 34. 15 с.

5. Microarc synthesis of nanostructured radiation-absorbing coatings on aluminum and titanium surfaces / T. A. Baranova, A. K. Chubenko, A. E. Ryabikov et al. // *IOP Conference series: materials science and engineering*. 2017. Vol. 286. 012037. Doi: 10.1088/1757-899X/286/1/012037.

#### Reference

1. Latypova A. F., Kalinin Yu. E. Analysis of promising radio-absorbing materials // *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2012. T. 8, № 6. P. 70–76.
2. Mamaev A. I., Mamaeva V. A. High-current processes in solutions of electrolytes. Novosibirsk : Publishing house of the SB RAS. 2005. 254 p.
3. Butyagin P. I., Khokhryakov Ye. V., Mamaev A. I. Microplasma systems for creating coatings on aluminium alloys // *Materials Letters*. 2003. Vol. 57, № 11. P. 1748–1751.
4. Patent 2637871 Russian Federation, IPC C25D 11/02, Method for obtaining a radio-absorbing coating on valve metals and their alloys and a coating obtained by this method / Mamaev A. I., Chubenko A. K., Suslyev V. I. ; applicant and patent holder Mamaev Anatoly Ivanovich (RU). No. 2015141241; claimed. September 28, 2015, publ. 12/07/2017, Bull. № 34. 15 p.
5. Microarc synthesis of nanostructured radiation-absorbing coatings on aluminum and titanium surfaces / T. A. Baranova, A. K. Chubenko, A. E. Ryabikov et al. // *IOP Conference series: materials science and engineering*. 2017. Vol. 286. 012037. Doi: 10.1088/1757-899X/286/1/012037.

© Рябиков А. Е., Долгова Ю. Н., Мамаев А. И., Баранова Т. А., Чубенко А. К., 2018

## ЗАКОН ГУКА КАК ГРУППА ЛИ

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

*Предлагается классификация анизотропных линейных упругих материалов с остаточными деформациями, предполагая, что материальные константы зависят от остаточных деформаций. Каждому обобщенному закону Гука ставится в соответствие некоторая точечная группа Ли, а ей в свою очередь алгебра Ли. Каждой двумерной подалгебре этой алгебры соответствует некоторый эксперимент на сложное нагружение, что позволяет определить зависимость материальных констант от остаточных деформаций. Это позволяет провести классификацию таких материалов и разбить их на достаточно большее количество классов.*

*Ключевые слова: закон Гука, группа Ли, упругие материалы.*

## HOOKE'S LAW AS A LIE GROUP

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

*We propose a classification of anisotropic linear elastic materials with residual deformations in this paper. We assume that the material constants depend on the residual strain. We put each generalized Hooke law in correspondence with a certain point Lie group, and to it in turn the Lie algebra. Each two-dimensional subalgebra of this algebra corresponds to some experiment on complex loading, which allows us to determine the dependence of material constants on residual deformations. This allows for the classification of such materials and break them down into a reasonably larger number of classes.*

*Keywords: Hooke's law, Lie group, elastic materials.*

Одна из основных задач математики – классификация. Пример такой задачи, прекрасно решенной средствами теории групп – классификация кристаллов.

Ряд авторов заметили аналогии между теорией упругости и группами непрерывных преобразований (группами Ли). Первым следует упомянуть А. Лява [1]. Он показал, что линейные однородные деформации упругого тела порождают группу непрерывных преобразований. Подобных взглядов придерживался и один из авторов статьи. Некоторые соображения по этому поводу содержатся в работах [2; 3].

Сама идея классификации упругих материалов по виду закона Гука не нова. Она восходит к классификации кристаллов. Считается, что упругий материал наследует симметричные свойства составляющих его кристаллов. Поэтому упругие материалы классифицируют по сингониям.

Напомним, что Никола Стентон (1669 г.) разбивает все кристаллы на семь сингоний (сходноугольных): триклинную, моноклинную, ромбическую, тригональную, гексагональную, тетрагональную и кубическую. Далее, используя понятие решетки кристалла, Огюст Браве (1848 г.) делит кристаллы на 14 классов. В 1867 г. Аксель Вильгельмович Гадолин вводит

32 кристаллических класса и в 1890–1894 гг. завершает классификацию Евграф Степанович Федоров введением 230 кристаллических групп. Необходимо отметить, что все эти гениальные открытия были сделаны задолго до экспериментального открытия кристаллической решетки с помощью рентгеновских лучей. Эта классификация актуальна до сих пор и широко используется в разных областях науки.

Упругие материалы, которые описываются линейным законом Гука тоже, в соответствии кристаллической симметрией (сингонией) удастся классифицировать по количеству постоянных входящих в закон Гука. Их число может быть 81, 21, 13, 9, 5 и 2.

В этой работе предлагается классификация анизотропных линейных упругих материалов с остаточными деформациями, предполагая, что материальные константы зависят от остаточных деформаций. Каждому обобщенному закону Гука ставится в соответствие некоторая точечная группа Ли, а ей в свою очередь алгебра Ли. Каждой двумерной подалгебре этой алгебры соответствует некоторый эксперимент на сложное нагружение, что позволяет определить зависимость материальных констант от остаточных деформаций. Это позволяет провести классификацию

таких материалов и разбить их на достаточно большее количество классов.

План статьи следующий:

1) пользуясь определением группы Ли и алгебры Ли непрерывных преобразований, написать закон Гука для материалов с остаточными деформациями и проверить, что эти законы удовлетворяют всем свойствам группы непрерывных преобразований;

2) по данным группам построить алгебры Ли для разных вариантов теории анизотропной упругости;

3) описать возможные эксперименты, которые позволяют классифицировать упругие материалы.

#### Библиографические ссылки

1. Ляв А. Математическая теория упругости / ОНТИ. М. ; Ленинград, 1935. 751 с.

2. Сенашов С. И., Киряков П. П., Яхно А. Н. Приложение симметрии и законов сохранения к решению дифференциальных уравнений. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2001. 192 с.

3. Сенашов С. И. Группы Ли и классификация упругих материалов // ДАН АН СССР. 1994. Т. 335, № 6. С. 712–715.

#### References

1. Lyav A. *Matematicheskaya teoriya uprugosti / ONTI*. [Mathematical theory of elasticity]. Moscow; Leningrad, 1935. 751 p.

2. Senashov S. I., Kiryakov P. P., Yakhno A. N. *Prilozheniye simmetrii i zakonov sokhraneniya k resheniyu differentsial'nykh uravneniy*. [Application of symmetry and conservation laws to the solution of differential equations]. Novosibirsk: SO RAN, 2001. 192 p.

3. Senashov S. I. *Gruppy Li i klassifikatsiya uprugikh materialov*. [Lie groups and classification of elastic materials]. DAN AN USSR, 1994. T. 335, № 6. P. 712–715.

© Сенашов С. И., Савостьянова И. Л., 2018

УДК 539.21:537.86

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА $Tm_xMn_{1-x}S^*$

М. Н. Ситников<sup>1</sup>, А. М. Харьков, А. Н. Масюгин, О. Б. Фисенко, В. В. Мироненко

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

<sup>1</sup>E-mail: kineru@mail.ru

*Проведены синтез и исследование электрических свойств соединений с переменной валентностью  $Tm_xMn_{1-x}S$  ( $0 < x < 0,15$ ) в области температур 80–1100 К. Определены области существования твердых растворов сульфидов  $Tm_xMn_{1-x}S$  с ГЦК-решеткой типа NaCl. Установлен рост сопротивления при замещении катионов марганца ионами тулия.*

*Ключевые слова: твердые растворы, удельное сопротивление, электропроводность.*

### ELECTRICAL PROPERTIES $Tm_xMn_{1-x}S$

M. N. Sitnikov<sup>1</sup>, A. M. Kharkov, A. N. Masyugin, O. B. Fisenko, V. V. Mironenko

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

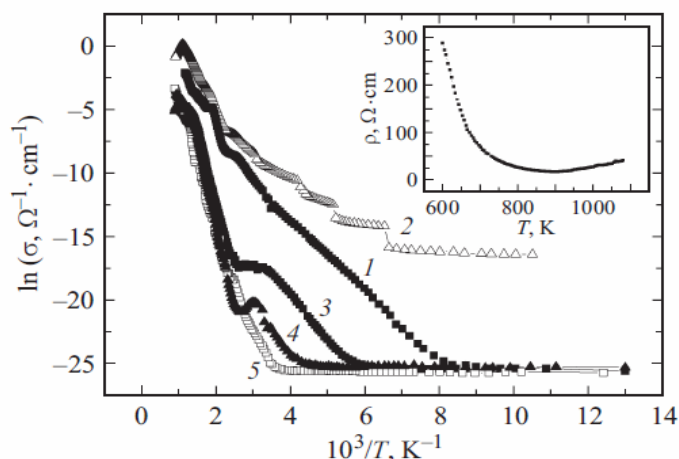
<sup>1</sup>E-mail: kineru@mail.ru

*The electrical properties of compounds with variable valence  $Tm_xMn_{1-x}S$  ( $0 < x < 0.15$ ) in the temperature range 80–1100 K have been synthesized and studied. The regions of existence of solid solutions of sulfides  $Tm_xMn_{1-x}S$  with FCC NaCl type have been determined. The growth of resistance is established when manganese cations are replaced with thulium ions.*

*Keywords: solid solutions, resistivity, electrical conductivity.*

Материалы на основе твердых растворов  $Tm_xMn_{1-x}S$ , в перспективе могут использоваться для элементной базы в микроэлектронике. Измерения удельного электросопротивления были проведены в интервале температур 80–1100 К двухзондовым методом на установке, устройство и принцип работы

которой описаны в работе [1]. Установка позволяет проводить измерения электросопротивления при заданном градиенте температуры в непрерывном режиме без переустановки образца. Электропроводность твердых растворов  $Tm_xMn_{1-x}S$  представлена на рисунке.



Температурная зависимость электропроводности для образцов системы  $Tm_xMn_{1-x}S$  с концентрацией  $x = 0$  (1), 0.01 (2), 0.05 (3), 0.1 (4), 0.15 (5).  
На вставке – температурная зависимость удельного электросопротивления в области высоких температур для состава с  $x = 0,01$

\* Работа поддержана грантами РФФИ № 18-52-00009 Бел\_а, № 18-32-00079 Мол\_а.

Ход зависимостей  $\ln \sigma (10^3/T)$  характерен для веществ с полупроводниковой проводимостью. В области низких температур для состава с  $x = 0,01$  температурную зависимость проводимости можно представить в виде трех ступенек, наблюдавшихся при  $T = 151$  К, 188 К и 240 К. Следует отметить, что незначительный рост проводимости в окрестности температуры Нееля наблюдается и для состава с  $x = 0,05$  при  $T = 135$  К и для  $x = 0,1$  при  $T = 132$  К. Для этих составов также обнаружены небольшие максимумы на зависимости  $\sigma (T)$  при 92 К для  $x = 0,05$  и при 102 К и 180 К для  $x = 0,1$ . Для  $x = 0,15$  также можно выделить скачки в проводимости в пределах 3–6 % при температурах  $T = 112$  К, 170 К, 192 К. Резкий рост проводимости наблюдается при температурах  $T = 170$  К для  $x = 0,05$ ,  $T = 215$  К для  $x = 0,1$  и  $T = 270$  К для  $x = 0,15$ .

По тангенсу угла наклона линейной части зависимости  $\lg \rho(1/T)$  в интервале  $180 \text{ К} < T < 320 \text{ К}$  определена энергия активации, которая возрастает от 0,2 eV для состава с  $x = 0,05$  до 0,4 eV для  $x = 0,1$ . В интервале температур 320–420 К, как видно из зависимости  $\ln \sigma (10^3/T)$ , проводимость практически не зависит от температуры для концентраций  $x = 0,05$ , 0,1, и ее поведение характерно для примесных полупроводников. Выше температуры 500 К энергия активации увеличивается до 1,03 eV для  $x = 0,05$  и до 1,1 eV для  $x = 0,1$ .

Для образца  $\text{Tm}_{0,01}\text{Mn}_{0,99}\text{S}$  малое допирование ионами тулия приводит к увеличению проводимости и появлению скачков на температурной зависимости  $\ln \sigma (10^3/T)$ . На вставке рисунка наблюдается минимум при  $T = 880$  К и рост сопротивления при возрастании температуры до 1100 К. Для  $x = 0,05$  в области высоких температур зависимость  $\sigma (T)$  имеет

минимум при  $T = 790$  К и максимум при  $T = 880$  К, а для  $x = 0,1$  наблюдается минимум при  $T = 790$  К и небольшой максимум при  $T = 820$  К. Наличие максимумов на температурной зависимости проводимости в высокотемпературной области может быть обусловлено рассеянием электронов на  $4f$ -уровне. Для всех исследуемых образцов характерно высокоомное состояние даже при комнатной температуре. С ростом концентрации замещения редкоземельного металла в решетке MnS величина электросопротивления растет от 200 kOhm для  $x = 0,01$  до 280 GOhm для  $x = 0,15$  [2].

#### Библиографические ссылки

1. Магнитные и электрические свойства катион-замещенных сульфидов  $\text{Me}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  ( $\text{Me} = \text{Co}, \text{Gd}$ ) / С. С. Аплеснин, Л. И. Рябинкина, О. Б. Романова и др. // ФТТ. 2009. Т. 51. С. 661–664.
2. 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.

#### References

1. Aplesnin S. S., Ryabinkina L. I., Romanova O. B. et al. [Magnetic and electric properties of the cation-substituted sulfides  $\text{Me}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  ( $\text{Me} = \text{Co}, \text{Gd}$ )]. *FTT*. 2009. Vol. 51. P. 661–664. (In Russ.)
2. Aplesnin S. S., Romanova O. B., Galyas A. I., Sokolov V. V. [Investigation of electrical and thermoelectric properties of sulfides  $\text{Tm}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ ]. *FTT*. 2016. Vol. 58. P. 21–26. (In Russ.)

© Ситников М. Н., Харьков А. М., Масюгин А. Н., Фисенко О. Б., Мироненко В. В., 2018

УДК 535.8; 544.77.03

## СВЕРХУЗКОПОЛОСНЫЕ ВЫДЕЛЯЮЩИЕ ПЛАЗМОННЫЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН\*

А. Д. Утюшев<sup>1</sup>, А. Е. Ершов<sup>1,2</sup>, В. С. Герасимов<sup>2,3</sup>, И. Л. Рассказов<sup>4</sup>, С. В. Карпов<sup>1,3,4,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>Институт вычислительного моделирования СО РАН

Российская Федерация, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/44

<sup>3</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 имени 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 наночастиц нитрида титана (TiN) могут служить в качестве управляющих оптических элементов в системах глобальной космической коммуникации с полосой пропускания менее 1 нм.*

*Ключевые слова: поверхностный плазмонный резонанс, решеточный поверхностный плазмонный резонанс, высокочастотный спектральный фильтр.*

## SUPER-NARROW SELECTIVE PLASMONIC FILTERS FOR TELECOMMUNICATION WAVELENGTH RANGE

A. D. Utyushev<sup>1</sup>, A. E. Ershov<sup>1,2</sup>, V. S. Gerasimov<sup>2,3</sup>, I. L. Rasskazov<sup>4</sup>, S. V. Karpov<sup>1,3,4,a</sup>

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

<sup>2</sup>Institute of Computational Modeling SB RAS

50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>3</sup>Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

<sup>3</sup>Institute of Optics, University of Rochester, USA,

14627, New York, Rochester, Boulevard. Joseph Wilson, 500

<sup>4</sup>L.V. Kirensky Institute of Physics SB RAS

50/38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>a</sup>E-mail: karpov@iph.krasn.ru

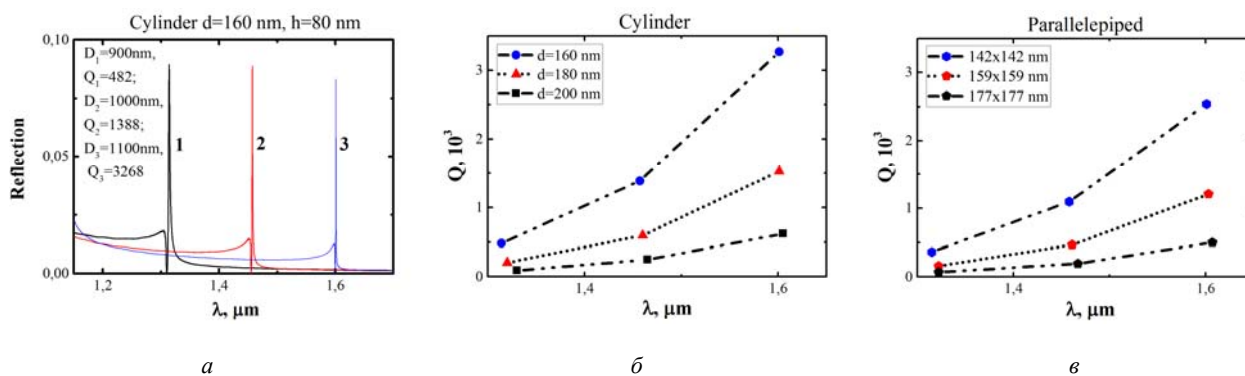
*We have shown that two-dimensional periodic structures (PS) from titanium nitride (TiN) nanoparticles can serve as control optical elements in global space communication systems with a bandwidth of less than 1 nm.*

*Keywords: surface plasmon resonance, lattice surface plasmon resonance, high-Q spectral filter.*

Не вызывает сомнения актуальность создания управляющих оптических элементов для телекоммуникационного диапазона длин волн ( $\lambda = 1,25\text{--}1,65$  мкм) 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

двумерных (2D) периодических структур (ПС), состоящих из плазмонных наночастиц, теоретические исследования которых были впервые выполнены в работах Маркеля и Шаца [1–3]. В соответствии с предсказаниями, такие ПС демонстрируют в спектрах поглощения сверхузкий резонанс [1–3], положение и добротность которого зависят 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 и Министерства науки и высшего образования РФ, Госзадание для Сибирского федерального университета для выполнения научных исследований в 2017–2019 гг.



Спектры отражения от ПС (а), зависимость добротности резонанса ( $Q$ ) от длины волны для основных спектральных линий решеточного ППР для НД (б) и НП (в) и трех значений периода решетки ( $D = 900, 1000, 1100$  нм):  $\lambda_{900} = 1322$  нм (1),  $\lambda_{1000} = 1461$  нм (2),  $\lambda_{1100} = 1603$  нм (3)

К настоящему времени опубликованы десятки работ, посвященных резонансам Маркеля–Шаца. В работе [4] предложено использовать в таких 2D ПС плазмонные наночастицы из нитрида титана ( $TiN$ ), что позволило придать такому устройству высокую лучевую стойкость и долговечность, а также и сместить резонанс в ближний ИК-диапазон. В работах других авторов в качестве материала частиц использовалось золото или серебро, температура плавления которых вдвое ниже. Подчеркнем, что в предыдущих работах сверхузкие структурные резонансы наблюдались лишь в спектре поглощения, что не позволяло использовать их для выделения из широкого спектра падающего излучения узкой спектральной области с требуемой длиной волны.

Периодические структуры (ПС) из плазмонных наночастиц способны сочетать возбуждение поверхностных плазмонов в отдельных наночастицах и 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 могут порождать в спектре поглощения или отражения сверхузкие оптические резонансы, которые вызваны интерференцией полей отдельных частиц и появлением аномалии Рэлея. В общем случае аномалия Рэлея или решеточный резонанс (РР) возникает в ПС, в которой фаза внешнего поля плоской волны вблизи отдельного элемента ПС совпадает с фазой поля, создаваемого соседним элементом. Если это условие выполняется в пределах всей ПС, то на данной длине волны наблюдается оптический резонанс.

Таким образом, резонансное поглощение или отражение порождается гибридной связью локализованных низкодобротных поверхностных плазмонных резонансов (ППР) наночастиц и их нелокализованных взаимодействий, охватывающих всю ПС. При этом добротность таких резонансов ( $Q$ -фактор) в  $10^2$ – $10^3$  раз может превышать добротность ППР отдельных частиц.

В настоящей работе исследуются спектры отражения широкополосного излучения от ПС с квадратной

структурой из наночастиц  $TiN$  и поиск условий, при которых в обратном рассеянном падающего излучении появляются сверхузкие спектральные моды (РППР), являющиеся результатом конструктивной интерференции взаимодействующих полей.

Расчеты выполняются методом FDTD, который является одним из наиболее востребованных, экспериментально верифицированных вычислительных методов электродинамики, основанных на дискретизации уравнений Максвелла в дифференциальной форме [5]. Отметим, что форма наночастицы является важным фактором, который влияет на добротность ( $Q$ -фактор) решеточных ППР (РППР) в ПС –  $Q = \lambda/\Delta\lambda$  – отношению резонансной длины волны к ширине контура на полувысоте). Выполненные расчеты ограничиваются нанопараллелепипедами (НП) и нанодисками (НД).

Полученные результаты показывают, что РППР в отраженном излучении возникают во всем телекоммуникационном диапазоне длин волн путем изменения периода решетки  $D$  (см. рисунок, а). Для точного расчета положения спектральной линии важно выбрать соответствующий размер НП и НД: для фиксированного периода решеточный ППР становится чрезвычайно узким. Например, ширина РППР при периоде  $D = 1100$  нм и размере частицы  $d = 160$  нм уменьшается до 1 нм (см. рисунок, а).

Обнаружено, что увеличение периода решетки может значительно повысить добротность РППР в реальном эксперименте (см. рисунок, б, в).

Таким образом, показано, что периодические структуры, состоящие из плазмонных наночастиц, с решеточным поверхностным плазмонным резонансом могут использоваться в схеме отражения в качестве выделяющих сверхузкополосных 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. Zakomirnyi V. I., Rasskazov I. L., Gerasimov V. S. et al. Refractory titanium nitride two-dimensional

structures with extremely narrow surface lattice resonances at telecommunication wavelengths. *Applied Physics Letters*. 2017. Vol. 111. P. 123107-1–123107-4.

5. Finite-difference time-domain method. Available at: <https://elck.ru/DWzUV> (date of visit: 10.06.2018).

© Утюшев А. Д., Ершов А. Е., Герасимов В. С.,  
Рассказов И. Л., Карпов С. В., 2018



## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВЕРХПРОВОДНИКИ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО СИНТЕЗА ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ\*

Л. Ю. Фёдоров<sup>1,2</sup>, А. В. Ушаков<sup>1,2</sup>, И. В. Карпов<sup>1,2</sup>, А. А. Лепешев<sup>1,2</sup>, Л. А. Иртыго<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44

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

*Синтезированы образцы сверхпроводящей керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  и  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  /  $nanoCuO$  композитов. Исследовано влияние технологии приготовления образцов на степень завершенности формирования структуры ВТСП.*

*Ключевые слова: сверхпроводники, оксид меди, вакуумная дуга, калориметрия.*

## HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS OF VACUUM ARC SYNTHESIS FOR SPACE TECHNOLOGY

L. Yu. Fedorov<sup>1,2</sup>, A. V. Ushakov<sup>1,2</sup>, I. V. Karpov<sup>1,2</sup>, A. A. Lepeshev<sup>1,2</sup>, L. A. Irtyugo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Krasnoyarsk Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences  
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

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

*Samples of superconducting ceramics  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  and  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  /  $nanoCuO$  composites were synthesized. The influence of the technology of preparation of samples on the degree of completeness of the formation of the structure of high-temperature superconductors is studied.*

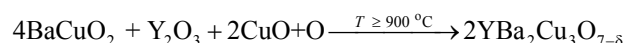
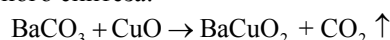
*Keywords: superconductors, copper oxide, vacuum arc, calorimetry.*

Среди возможных применений высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в устройствах космической техники можно перечислить следующие: универсальные системы бесконтактной связи между космическими объектами, герметичные вводы движения, большие космические конструкции с бесконтактными связями, бесконтактные сверхпроводящие опоры, системы причаливания и стыковки космических летательных аппаратов (КЛА), устройства связи с переменной жесткостью, системы защиты КЛА от радиации, различные энергетические и приборные системы для работы на Луне [1].

В связи с этим, научно значимой является проблема разработки высокотемпературных сверхпроводящих материалов с высокой токонесущей способностью. Одним из направлений по улучшению функциональных характеристик ВТСП при синтезе материала, является использование порошков с повышенной реакционной способностью для интенсификации протекания твердофазных реакций [2–7].

Образцы  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  и композиты с содержанием наночастиц  $CuO$  были синтезированы по стандартной

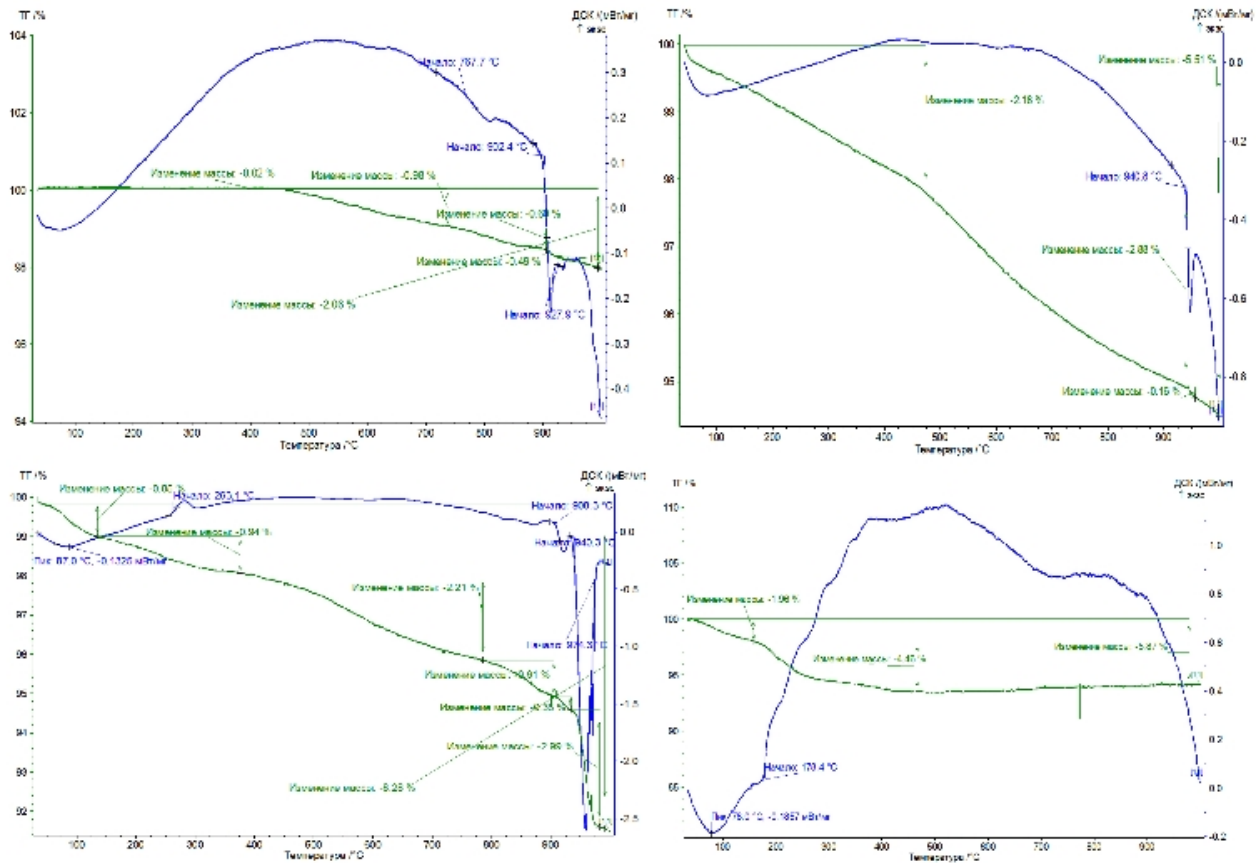
керамической технологии [7]. Основные реакции твердофазного синтеза:



Определяющим фактором при формировании структуры керамики стехиометрического состава, с как можно большим содержанием сверхпроводящей фазы 1–2–3, является продолжительность отжига. Были рассмотрены образцы, подвергнутые отжигу в течение 20 и 100 часов, а также образец, модифицированный в плазмохимическом реакторе нанодисперсными частицами  $CuO$ , по технологии подробно описанной в [6].

Сравнительный анализ ДСК/ТГ-кривых образцов отличающихся временем отжига демонстрирует (см. рисунок) различное поведение калориметрической кривой в диапазоне температур 200–700 °С. У образца с продолжительностью отжига 100 часов отсутствуют экзотермические реакции в названном диапазоне, что обусловлено полнотой протекания твердофазной реакции.

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10054).



ДТА анализ ВТСП: вверху  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (слева – полученный при времени отжига 20 часов; справа – 100 часов); внизу: композита  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ /нано CuO (слева), нанопорошка CuO (справа)

Напротив, у образца, отожженного 20 часов, наблюдается значительный экзотермический эффект, достигая значения 0,4 мВт/мг. Подобное поведение свидетельствует о незавершенности твердофазных реакций при формировании структуры керамики. Это приводит к снижению доли сверхпроводящей фазы в образце и, как следствие, понижению токонесущей способности материала.

С целью сокращения времени отжига при синтезе ВТСП керамики, был рассмотрен образец, модифицированный в вакуумно-дуговом реакторе введением в сверхпроводящую керамику наночастиц CuO. Он характеризуется началом экзотермических реакций также после достижения температуры 200 °С, однако принимает меньшие значения. При этом есть основания полагать, что значительный вклад вносит собственная энергонасыщенность нанопорошка CuO.

Проведённые исследования обнаруживают качественные изменения продолжительности отжига для образца композита  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ /наноCuO. Благодаря энергонасыщенности свежееосажденных наночастиц формирование структуры материала ВТСП происходит наиболее полно при меньшем времени отжига.

Таким образом, использование метода вакуумно-дугового синтеза ВТСП композитов позволяет значительно сократить время отжига, требуемое для формирования структуры, что позволяет улучшить электротехнические характеристики сверхпроводников.

### Библиографические ссылки

1. Применение объемных высокотемпературных сверхпроводников в перспективных космических системах / В. А. Матвеев, В. А. Маевский, В. В. Асеев и др. // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 1. С. 15–32.
2. Механизмы ионизации в катодном пятне вакуумной дуги / А. В. Ушаков, И. В. Карпов, А. А. Лепешев // Вестник СибГАУ. 2015. № 16 (4). С. 983–989.
3. Высокотемпературные сверхпроводники вакуумно-дугового синтеза для космической техники / А. А. Лепешев, А. В. Ушаков, И. В. Карпов и др. // Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф. (08–11 ноября 2017, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2017. С. 624–625.
4. Particularities of the magnetic state of CuO nanoparticles produced by low-pressure plasma arc discharge / A. A. Lepeshev, A. V. Ushakov., I. V. Karpov et al. // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2017. Vol. 30. No. 4. P. 931–936.
5. Ushakov A. V., Karpov I. V., Lepeshev A. A., Fedorov L. Yu. Copper Oxide of Plasma-Chemical Synthesis for Doping Superconducting Materials // International Journal of Nanoscience, 2017. Vol. 16, No. 4. P. 1750001.

6. Устройство для увеличения пиннинга магнитного потока в гранулярных нанокompозитах на основе высокотемпературной сверхпроводящей керамики / И. В. Карпов, А. В. Ушаков, А. А. Лепешев и др. // Журнал технической физики. 2018. № 88 (2). С. 238–242.

7. Ushakov A. V., Karpov I. V., Lepeshev A. A., Petrov M. I. Enhancing of magnetic flux pinning in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{CuO}$  granular composites // *J. Appl. Phys.*, 2015. Vol. 118, No. 2. P. 023907.

### References

1. Matveev V. A., Maevsky V. A., Aseev V. V. et al. [The use of bulk high-temperature superconductors in promising space systems]. *Vestnik MGTU im. N. E. Baubana. Ser. Priborostroyeniye*. 2016. No. 1. P. 15–32. (In Russ.)

2. Ushakov A. V., Karpov I. V., Lepeshev A. A. [Mechanisms of ionization in a cathode spot of a vacuum arc]. *Vestnik SibGAU*. 2016. No. 4. P. 983–989. (In Russ.)

3. Lepeshev A. A. Ushakov A. V., Karpov I. V. et al. [Modeling of ionization processes in a cathode spot of a vacuum arc]. *Materialy XXI Mezhdunar. nauch. konf.*

“Reshetnevskie chteniya” [Materials XXI Intern. Scientific. Conf “Reshetnev reading”]. Krasnoyarsk, 2017. P. 624–625. (In Russ.)

4. Lepeshev A. A., Ushakov A. V., Karpov I. V. et al. Particularities of the magnetic state of CuO nanoparticles produced by low-pressure plasma arc discharge. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 2017. Vol. 30, No. 4. P. 931–936.

5. Ushakov A. V., Karpov I. V., Lepeshev A. A. Copper Oxide of Plasma-Chemical Synthesis for Doping Superconducting Materials. *International Journal of Nanoscience*, 2017. Vol. 16, No. 4. P. 1750001.

6. Karpov I. V., Ushakov A. V., Lepeshev A. A. et al. Device for Increasing the Magnetic Flux Pinning in Granular Nanocomposites Based on the High-Temp Supercond Ceramic. *Techn Phys*, 2018. Vol. 63. P. 230–234.

7. Ushakov A. V., Karpov I. V., Lepeshev A. A., Petrov M. I. Enhancing of magnetic flux pinning in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{CuO}$  granular composites. *J. Appl. Phys.*, 2015. Vol. 118, No. 2. P. 023907.

© Фёдоров Л. Ю., Ушаков А. В., Карпов И. В., Лепешев А. А., Иртыго Л. А., 2018

УДК 539.21:537.86

**ИНДУКТИВНОСТЬ И ДОБРОТНОСТЬ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ  
Tm<sub>x</sub>Mn<sub>1-x</sub>S (x = 0.05, 0.15)\***

А. М. Харьков<sup>1</sup>, М. Н. Ситников, В. В. Кретинин, В. В. Мироненко, У. И. Рыбина

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

<sup>1</sup>E-mail: khark.anton@mail.ru

*Представлены результаты измерения индуктивности и добротности в твердых растворах Tm<sub>x</sub>Mn<sub>1-x</sub>S, (x = 0,05, 0,15) с ГЦК решеткой типа NaCl в области температур 80–400 К. Магнитная проницаемость определялась из индуктивности, а из добротности определялось время релаксации.*

*Ключевые слова: твердые растворы, индуктивность, добротность, магнитная проницаемость, время релаксации.*

**INDUCTIVITY AND GOOD QUALITY SOLID SOLUTIONS  
Tm<sub>x</sub>Mn<sub>1-x</sub>S (x = 0.05, 0.15)**

A. M. Kharkov<sup>1</sup>, M. N. Sitnikov, V. V. Kretinin, V. V. Mironenko, U. I. Rybina

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

<sup>1</sup>E-mail: khark.anton@mail.ru

*This paper presents the results of measurements the inductivity and good quality in solid solutions Tm<sub>x</sub>Mn<sub>1-x</sub>S, (x = 0,05, 0,15) with FCC NaCl type in the temperature range 80-400 K. The magnetic permeability was determined from the inductance, and the good quality was determined by the relaxation time.*

*Keywords: solid solutions, inductivity, good quality, magnetic permeability, relaxation time.*

Материалы на основе твердых растворов Tm<sub>x</sub>Mn<sub>1-x</sub>S, в перспективе могут использоваться в качестве сенсоров, датчиков, устройств записывания информации. Взаимосвязь магнитных и электрических свойств является важным фактором для создания электронных устройств, и нахождение новых перспективных материалов для микроэлектроники [1].

Цель работы измерение индуктивности и добротности для установления влияния предыстории образца Tm<sub>x</sub>Mn<sub>1-x</sub>S на динамическую магнитную восприимчивость и релаксацию магнитного момента.

Для решения поставленной задачи использовалась методика измерения индуктивности (магнитной проницаемости) и добротности в интервале частот 100 Hz – 100 kHz и температур 80 K < T < 400 K с учетом предыстории образца, который охлаждался без поля и в магнитном поле 12 кОе.

Индуктивность катушки с образцом измерялась при нагревании без магнитного поля.

Магнитная проницаемость образца Tm<sub>x</sub>Mn<sub>1-x</sub>S определялась из индуктивности соленоида с внутренним

диаметром  $d = 2$  мм и длиной 10 мм, внутрь которого помещался образец.

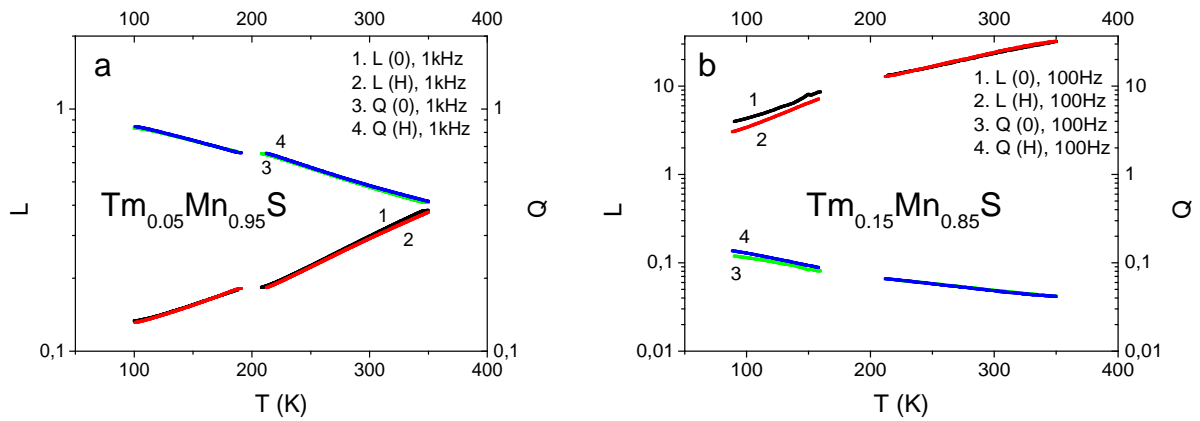
Измерялась индуктивность катушки с образцом ( $L_f$ ) и без образца ( $L_s$ ), так как индуктивность соленоида пропорциональна:  $L = n^2 \mu_0 V$ , то магнитную проницаемость  $\mu_r$  образца с объемом  $V_f$  найдем как:  $\mu_r = (L_f - L_s) / L_s + 1$  [2]. Температурная зависимость индуктивности и добротности магнитных колебаний для образцов: Tm<sub>0,05</sub>Mn<sub>0,95</sub>S, Tm<sub>0,15</sub>Mn<sub>0,85</sub>S, показана на рисунке.

Добротность колебаний монотонно уменьшается при нагревании, как видно на рисунке *a* и *б*.

В магнитоупорядоченной фазе добротность колебаний и время релаксации колебаний намагниченности обнаруживают зависимость от предыстории образца.

В неравновесных системах время релаксации зависит от частоты. Частоту релаксации найдем из добротности:  $Q = \omega\tau/2$ , следовательно:  $\tau = 2Q/\omega$ . Время релаксации электромагнитных колебаний в катушке с образцом, охлажденной без поля, возрастает в магнитоупорядоченной фазе.

\* Работа поддержана грантами РФФИ № 18-52-00009 Бел\_а, № 18-32-00079 Мол\_а.



Температурная зависимость индуктивности ( $L$ ) катушки с образцом  $Tm_xMn_{1-x}S$ ,  $x = 0.05$  на частоте  $\omega = 1$  kHz (а) и с образцом  $Tm_xMn_{1-x}S$ ,  $x = 0.15$  на частоте  $\omega = 100$  Hz (б), без магнитного поля (1) и в магнитном поле 12 kOe (2). Добротность магнитных колебаний в образце ( $Q$ ), охлажденном без поля (3) и в магнитном поле (4) от температуры

### Библиографические ссылки

1. Исследование транспортных свойств катион-замещенных твердых растворов  $Yb_xMn_{1-x}S$  / С. С. Аплеснин, О. Б. Романова, А. М. Харьков, А. И. Галяс // ФТТ. 2015. Т. 57. С. 872–876.
2. Магнитные и электрические свойства твердых растворов  $Yb_xMn_{1-x}S$  / С. С. Аплеснин, А. М. Харьков, О. Б. Романова и др. // Известия РАН. Серия физическая, 2013. Т. 77, № 10. С. 1472–1474.

### References

1. Aplesnin S. S., [et al.] [Investigation of transport properties of cation-substituted solid solutions  $Yb_xMn_{1-x}S$ ] / *FTT*, 2015. Vol. 57. P. 872–876. (In Russ.)
2. Aplesnin S. S. [et al.] [Magnetic and electrical properties of solid solutions  $Yb_xMn_{1-x}S$ ]. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya*, 2013. Vol. 77, No. 10. P. 1472–1474. (In Russ.)

© Харьков А. М., Ситников М. Н., Кретинин В. В., Мироненко В. В., Рыбина У. И., 2018



**Секция**

**«МЕХАНИКА СПЛОШНЫХ СРЕД  
(ГАЗОДИНАМИКА, ГИДРОДИНАМИКА,  
ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ,  
РЕОЛОГИЯ)»**

УДК 519.6

**ОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ЭМИССИИ МЕТАНА В ЗОНАХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ**

В. М. Белолипецкий, С. Н. Генова

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
 Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
 E-mail: sv@icm.krasn.ru

*Рассмотрена одномерная модель вертикальных распределений температуры в талых и мерзлых слоях и модель генерации диффузии метана, позволяющая получить грубую оценку эмиссии метана в зонах вечной мерзлоты.*

*Ключевые слова: вечная мерзлота, мерзлые, талые слои, эмиссия метана.*

**ONE-DIMENSIONAL MODEL OF METHANE EMISSION IN PERMAFROST ZONES**

V. M. Belolipetskii, S. N. Genova

Institute of Computational Modeling SB RAS  
 50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
 E-mail: sv@icm.krasn.ru

*The one-dimensional model of vertical distributions of temperature in thawed and frozen layers and the methane diffusion generation model allowing to receive a rough estimate of methane emission in permafrost zones is considered.*

*Keywords: permafrost, frozen, thawed layers, methane emission.*

**Введение.** В связи с изменением глобальной температуры воздуха представляет интерес оценка реакции вечной мерзлоты на изменение климата. Имеется обширная литература по математическому моделированию вечной мерзлоты (см., например, [1–5]). В вертикальном направлении выделяются талый грунт, мерзлый грунт, снег. В работе [6] сформулирована математическая модель вертикальных распределений температуры в талых и мерзлых слоях, учитывающая образование новых и аннулирование существующих слоев.

В настоящей работе рассматривается малоразмерная численная модель вертикальных распределений температуры в талых и мерзлых слоях, учитывающая образование новых и аннулирование существующих слоев. В работах [2; 3] предлагаются математические модели эмиссии метана из озер и болот зоны вечной мерзлоты. В настоящей работе в предположении зависимости производства метана от температуры почвы с учетом потоков метана в виде пузырьков получена грубая оценка изменения эмиссии метана в зонах вечной мерзлоты.

**Математическая модель динамики заморозания-оттаивания вечной мерзлоты.** Теоретическое описание температурного поля в почвах при их промерзании или оттаивании осуществляется с помощью решений задач Стефана.

Математическая модель основывается на одномерных в вертикальном направлении уравнениях теплопроводности для мерзлой и талой зон. На границах фазового перехода (заморозания-таяния) ставятся условия равенства температур температуре фазового перехода и условие Стефана. Сформулированная математическая модель вертикальных распределений температуры в талых и мерзлых слоях учитывает образование новых и аннулирование существующих слоев [5; 6].

Возможны различные варианты расположения мерзлых и талых слоев. При переходе с одного варианта на другой слои добавляются или исключаются.

Рассматриваются пять вариантов (см. таблицу). Определены условия переходов с одного варианта на другой.

**Варианты расположения мерзлых и талых слоев**

№ варианта	Снег	Мерзлый грунт	Талый грунт	Мерзлый грунт	Талый грунт	Мерзлый грунт	Талый грунт
1	+					+	+
2					+	+	+
3	+			+	+	+	+
4			+	+	+	+	+
5	+	+	+	+	+	+	+

**2. Одномерная модель генерации и диффузии метана в зонах вечной мерзлоты.** После определения температуры и толщин мерзлых и талых слоев оцениваются вертикальные распределения биохимических компонентов. Математическая модель динамики концентраций биохимических компонентов основана на уравнении диффузии:

$$\frac{\partial S_m}{\partial t} = K_{sm} \frac{\partial^2 S_m}{\partial z^2} + f_m(t, z, S_j, T), \quad m = 1, 2, \dots, M.$$

Здесь  $t$  – время;  $z$  – вертикальная координата;  $S_m$  – концентрация соответствующей компоненты;  $K_{sm}$  – коэффициент диффузии. Функции  $f_m(t, z, S_j, T)$  описывают процессы биохимической трансформации субстанций  $S_1, S_2, \dots, S_M$ . Предполагается, что в мерзлой фазе отсутствует диффузия примесей и прекращается трансформация субстанций (т. е. при замерзании талого грунта биохимические компоненты депонируются,  $K_{sm} = 0, f_m = 0$ ). При таянии мерзлого грунта биохимические процессы и диффузия примесей возобновляются.

На верхней границе талого грунта ( $z = 0$ ) ставится условие

$$K_{sm} \frac{\partial S_m}{\partial z} = \alpha(S_m - S_{\text{атм}}),$$

где  $\alpha$  – коэффициент обмена;  $S_{\text{атм}}$  – концентрация субстанции в атмосфере.

На нижней границе слоя талого грунта поток субстанции полагается равным нулю.

При  $t = 0$  задаются начальные условия.

Особый интерес представляет моделирование генерации и эмиссии метана ( $S$ ) в зоне вечной мерзлоты. Модель эмиссии метана строится с учетом двух основных механизмов его транспорта в почвах: диффузии газа через воду, заполняющую поры в почве, и пузырьковый перенос. Используется модельная параметризация этих процессов.

$$f(t, z, S, T) = P - E,$$

где  $P$  – генерация метана в ходе анаэробного разложения органики;  $E$  – сток метана за счет образования пузырьков.

$$P = \mu [\exp(0,16 \cdot T) - 1], \quad E = \mu_e (S - 0,4 \cdot S_{kr}).$$

Здесь  $T$  – температура грунта;  $S_{kr}$  – критическое значение концентрации метана, при превышении которого происходит образование пузырьков;  $\mu_e$  – подгоночные коэффициенты.

Сформулированная задача с учетом вычисленных толщин талых слоев и вертикальных распределений температуры почвы решается численно по неявной схеме. Разработанный программный модуль для исследования биохимических процессов в зоне вечной мерзлоты, встроенный в компьютерную модель процессов замерзания/оттаивания, позволяет получить грубую оценку изменения эмиссии метана в зонах вечной мерзлоты при изменении климата.

## Библиографические ссылки

1. Будыко М. Изменение климата. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 280 с.
2. Анисимов О., Белолуцкая М. Влияние изменения климата на вечную мерзлоту: прогнозирование и оценка неопределенности // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2003. Т. XIX. СПб.: Гидрометеоздат. С. 21–38.
3. Моделирование эмиссии метана из озер вечной мерзлоты / В. М. Степаненко, Е. Е. Мачульская, М. В. Глаголев, В. Н. Лыкосов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. № 2 (47). С. 275–288.
4. Sazonova T., Romanovsky V. A model for regional-scale estimation of temporal and spatial variability of activelayer thickness and mean annual ground temperatures. Permafrost and Periglacial Processes. 2003. № 2. С. 125–140.
5. Belolipetskii V., Genova S. A numerical model of the seasonal thawing of permafrost in the bog-lake landscapes // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2016. № 9 (2). С. 158–165.
6. Belolipetskii V., Genova S. One-dimensional vertical model of permafrost dynamics // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018.

## References

1. Budyko M. Izmeneniye klimata [Change of climate]. L.: Hydrometeoizdat, 1974. 280 p. (In Russ.)
2. Anisimov O., Belolutskaia M. Vliyaniye izmeneniya klimata na vechnyuyu merzlotu: prognozirovaniye i otsenka neopredelennosti [Influence of climate change on permafrost: forecasting and estimation of uncertainty]. V kn.: Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem. 2003. T. XIX. SPb.: Gidrometeoizdat. P. 21–38. (In Russ.)
3. Modelirovaniye emissii metana iz ozer vechnoy merzloty [Modeling of methane emissions from permafrost lakes] / V. M. Stepanenko, Ye. Ye. Machul'skaya, M. V. Glagolev, V. N. Lykosov // Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana. 2011. № 2 (47). P. 275–288. (In Russ.)
4. Sazonova T., Romanovsky V. A model for regional-scale estimation of temporal and spatial variability of activelayer thickness and mean annual ground temperatures. Permafrost and Periglacial Processes. 2003. № 2. P. 125–140.
5. Belolipetskii V., Genova S. A numerical model of the seasonal thawing of permafrost in the bog-lake landscapes // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2016. № 9 (2). P. 158–165.
6. Belolipetskii V., Genova S. One-dimensional vertical model of permafrost dynamics // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018.



УДК 550.34.09

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА «ЕНИСЕЙ»\*

М. П. Варыгина

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
E-mail: vmp@icm.krasn.ru

*Для численного исследования процессов распространения сейсмических волн, вызванных электромагнитным импульсным источником «Енисей» разработан эффективный параллельный алгоритм для суперкомпьютеров с графическими ускорителями.*

*Ключевые слова: генерация сейсмических волн, электромагнитный импульсный источник, слоистая среда, параллельные вычисления, технология CUDA.*

## NUMERICAL MODELING OF SEISMIC WAVE PROPAGATION GENERATED BY THE ELECTROMAGNETIC PULSE SOURCE “YENISEI”

M. P. Varygina

Institute of Computational Modeling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
E-mail: vmp@icm.krasn.ru

*In order to research processes of seismic wave propagation generated by the electromagnetic pulse source “Yeni-sei”, effective parallel algorithm for supercomputers with graphical processor units is developed.*

*Keywords: seismic wave generation, electromagnetic pulse source, layered medium, parallel computations, CUDA technology.*

Нефтегазодобывающие компании заинтересованы в эффективных методах поиска и локализации насыщенных углеводородами пластов. Экстремальные климатические условия и сложная геологическая структура почвы затрудняют сейсморазведку с помощью традиционных технологий, основанных на использовании взрывных и вибрационных источников возбуждения сейсмических колебаний. По сравнению со взрывными работами и вибрационным методом, электромагнитные импульсные источники «Енисей» дают четко определенные параметры воздействия на среду и обеспечивают идентичность излучаемого сигнала [1].

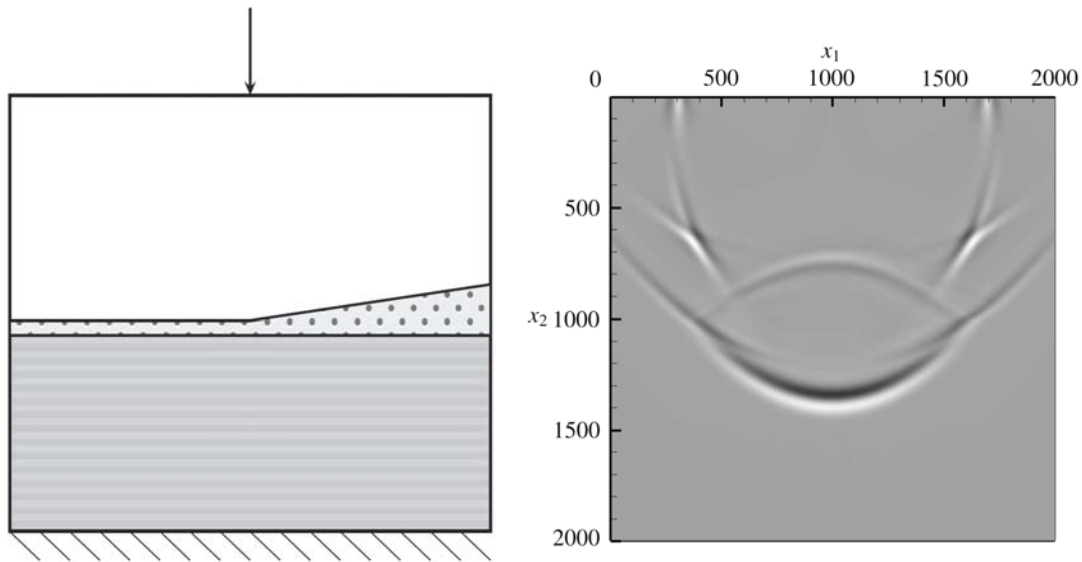
Задачи оптимизации механических и геометрических характеристик импульсного источника не могут быть решены без математического моделирования распространения сейсмических волн в средах со сложной реологической структурой. Моделирование волновых процессов в средах с различными физическими свойствами представляет большой интерес для исследований [2]. Изучению волновых процессов в блочных средах с прослойками различного типа посвящена статья [3]. В этой работе рассматриваются

процессы распространения сейсмических волн в слоистых средах, вызванных электромагнитным импульсным источником «Енисей».

Алгоритм численного решения задачи основан на методе двуциклического расщепления по пространственным переменным [4]. На этапах расщепления метода используется монотонная разностная ENO-схема с предельной реконструкцией решения [5]. 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 рисунке представлено численное решение задачи распространения сейсмических волн в слоистой среде, вызванных импульсным источником. Схематическое представление области изображено на рисунке (слева). Верхний слой среды – почва. Второй слой – пористый, с низкой скоростью распространения волн. Третий слой – твердая порода.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-31-00100) и Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта: «Анализ волновых сейсмических полей, генерируемых электромагнитным импульсным источником «Енисей» в неоднородных грунтовых массивах при проведении геологоразведочных работ в условиях северных районов Восточной Сибири».



Численное решение задачи распространения сейсмических волн, вызванных импульсным источником «Енисей»: схема области (слева) и линии уровня нормального напряжения (справа)

В центре верхней границы действует импульс от электромагнитного источника. Нижняя граница закреплена. Правая и левая граница – не отражающие. На рисунке (справа) показаны линии уровня нормального напряжения. Волна проходит через пористый слой и отражается. Варьируя толщину прослойки и измеряя скорости распространения отраженных волн, можно анализировать параметры импульсного источника, в частности, частоту колебаний, на которой возможна регистрация прослойки, насыщенной углеводородами.

Численные расчеты проводились на графической видеокарте NVIDIA Tesla C2050. Серия вычислительных экспериментов показала ускорение параллельного алгоритма до 40 раз.

#### Библиографические ссылки

1. Detkov V. A. Stimulation of Seismic Waves by Pulsed Nonexplosive Source. Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. № 2 (3). 2009. P. 298–304.
2. Favorskaya A. V. et al. Modelling the Wave Phenomena in Acoustic and Elastic Media With Sharp Variations of Physical Properties Using the Grid-Characteristic Method. Geophysical Prospecting. 2018. Doi: 10.1111/1365-2478.12639.
3. 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.

4. Марчук Г. И. Методы расщепления. М. : Наука, 1988.

5. Kulikovskii A. G., Pogorelov N. V., Yu A. Semenov. Mathematical Aspects of Numerical Solution of Hyperbolic Systems. Monographs and Surveys in Pure and Applied Mathematics, 118. 2001.

#### References

1. Detkov V. A. Stimulation of Seismic Waves by Pulsed Nonexplosive Source. Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics, 2(3) (2009), P. 298–304.
2. Favorskaya A. V. et al. Modelling the Wave Phenomena in Acoustic and Elastic Media With Sharp Variations of Physical Properties Using the Grid-Characteristic Method. Geophysical Prospecting. 2018. Doi: 10.1111/1365-2478.12639.
3. 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.
4. Marchuk G. I. Metody rasshchepleniya [Splitting Methods] Moscow, Nauka Publ., 1988.
5. Kulikovskii A. G., Pogorelov N. V., Yu A. Semenov. Mathematical Aspects of Numerical Solution of Hyperbolic Systems. Monographs and Surveys in Pure and Applied Mathematics, 118. 2001.

© Вarygina M. P., 2018

УДК 519.642.2

**ПОЛУЛАГРАНЖЕВ МЕТОД ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ НАВЬ–СТОКСА  
ДЛЯ ВЯЗКОГО ТЕПЛОПРОВОДНОГО ГАЗА\***

А. В. Вяткин, Е. В. Кучунова<sup>1</sup>

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
<sup>1</sup>E-mail: HKuchunova@sfu-kras.ru

*Представлен численный алгоритм решения уравнений Навье–Стокса, описывающий трехмерное течение вязкого теплопроводного газа. Дискретизация уравнений проводится комбинацией метода траекторий для субстанциональной производной и метода конечных элементов для остальных слагаемых.*

*Ключевые слова: уравнения Навье–Стокса, полулагранжевы методы, метод конечных элементов.*

**THE SEMI-LAGRANGIAN METHOD FOR THE NUMERICAL SOLUTION  
OF THE NAVIER–STOKES EQUATIONS OF VISCOUS HEAT-CONDUCTING GAS**

A. Vyatkin, E. Kuchunova<sup>1</sup>

Institute of Computational Modeling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
<sup>1</sup>E-mail: HKuchunova@sfu-kras.ru

*We present a numerical algorithm for solving the Navier-Stokes equations describing the three-dimensional flow of a viscous heat-conducting gas. The discretization of equations is carried out by a combination of the trajectory method for the substantial derivative and the finite element method for the remaining terms.*

*Keywords: Navier-Stokes equation, semi-Lagrangian method, the finite element method*

Одним из важнейших направлений вычислительной аэродинамики является расчет обтекания тел газом. Наиболее точная физико-математическая модель, описывающая движение газа, основана на системе уравнений Навье–Стокса, состоящей из уравнений количества движения, внутренней энергии и уравнения неразрывности.

Численное решение уравнений Навье–Стокса в настоящее время все еще представляет большие трудности, что обусловлено нелинейностью исходных уравнений, наличием областей больших градиентов и другими особенностями, возникающими при определенных параметрах и режимах газодинамических течений. Как следствие, возникает необходимость создания специальных численных методов решения этих уравнений. Несмотря на то, что уже разработано много численных алгоритмов и специальных комплексов программ, проблема создания и применения эффективных численных методов и алгоритмов остается актуальной.

Выпишем дифференциальные уравнения двумерного вязкого теплопроводного газа в виде безразмерных уравнений неразрывности, количества движения и внутренней энергии [1]

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + \rho \frac{\partial v}{\partial y} + \rho \frac{\partial w}{\partial z} &= 0, \\ \rho \frac{du}{dt} &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}, \\ \rho \frac{dv}{dt} &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}, \\ \rho \frac{dw}{dt} &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}, \\ \rho \frac{de}{dt} + P \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} + \Phi. \end{aligned}$$

Здесь  $d(\cdot)/dt$  – субстанциональная, или полная, производная, т. е.

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y},$$

где  $\rho$  – плотность;  $u, v, w$  – проекции вектора скорости на оси  $x, y$  и  $z$ ;  $P = (\gamma - 1)\rho e$  – давление;  $\mu = (\gamma(\gamma - 1)M^2 e)^\omega$  – динамический коэффициент вязкости;  $e$  – внутренняя энергия.

\* 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 № 18-41-243006.

Компоненты тензора напряжений, проекции теплового потока и диссипативная функция выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= \frac{2}{3\text{Re}}\mu\left(2\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial w}{\partial z}\right), \\ \tau_{yy} &= \frac{2}{3\text{Re}}\mu\left(2\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial z}\right), \\ \tau_{zz} &= \frac{2}{3\text{Re}}\mu\left(2\frac{\partial w}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right), \\ \tau_{xy} &= \tau_{yx} = \frac{\mu}{\text{Re}}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right), \\ \tau_{yz} &= \tau_{zy} = \frac{\mu}{\text{Re}}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right), \\ \tau_{zx} &= \tau_{xz} = \frac{\mu}{\text{Re}}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right), \\ q_x &= -\frac{\gamma}{\text{Pr Re}}\mu\frac{\partial e}{\partial x}, \quad q_y = -\frac{\gamma}{\text{Pr Re}}\mu\frac{\partial e}{\partial y}, \quad q_z = -\frac{\gamma}{\text{Pr Re}}\mu\frac{\partial e}{\partial z}, \\ \Phi &= \frac{\mu}{\text{Re}}(2(u'_x)^2 + 2(v'_y)^2 + 2(w'_z)^2 + (v'_x + u'_y)^2 + \\ &+ (w'_y + v'_z)^2 + (u'_z + w'_x)^2 - \frac{2}{3}(u'_x + v'_y + w'_z + u'_y)^2), \end{aligned}$$

где  $\text{Re}$  – число Рейнольдса,  $\text{Pr}$  – числа Прандтля,  $\gamma = 1, 4$ .

В работе для аппроксимации полной (субстанциональной или лагранжевой) производной по времени в каждом уравнении системы используется метод траекторий, который заключается в аппроксимации этой производной с помощью разностной производной назад по времени вдоль траектории движения частицы. Под названием метода характеристик, или полулагранжевого метода, он впервые был применен в [2] для уравнения переноса массы, а также в работах [3; 4].

Дискретизация по пространству остальных слабых уравнений Навье–Стокса на каждом временном слое проводится методом конечных элементов с кусочно-трилинейными базисными функциями и применением квадратурных формул [5]. Для решения систем алгебраических уравнений используется метод Якоби с улучшенным начальным приближением внутри внешних итераций по нелинейности. Как следует из тестовых расчетов [6], модификация уравнений Навье–Стокса обеспечивает повышение точности приближенного решения по сравнению с погрешностью для немодифицированных уравнений. Вместе с тем применение комбинации методов траекторий и конечных элементов позволяет построить алгоритм, довольно эффективный с вычислительной точки зрения.

#### Библиографические ссылки

1. Алоян А. Е. Динамика и кинетика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере : курс лекций. М. : ИВМ РАН, 2002. 201 с.

2. Pironneau O. On the Transport-Diffusion Algorithm and Its Applications to the Navier-Stokes Equations // *Numerische Mathematik*. 1982. Vol. 38. P. 309–332.

3. Douglas J., Russell T. Numerical methods for convection-dominated diffusion problems based on combining the method of characteristics with finite element or finite difference procedures // *SIAM J. Numer. Anal.* 1982. Vol. 19. P. 871–885.

4. Магомедов К. М. Метод характеристик для численного расчета пространственных течений газа // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 1966. Т. 6, № 2. С. 313–325

5. Шайдулов 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.

6. Шайдулов В. В., Щепановская Г. И., Якубович М. В. Применение метода траекторий и метода конечных элементов в моделировании движения вязкого теплопроводного газа // *Вычислительные методы и программирование*. 2011. Т. 12. С. 275–281.

7. Shaydurov V., Shchepanovskaya G., Yakubovich M. A mathematical model and a numerical algorithm for an asteroid-comet body in the earth's atmosphere // *Lecture notes in computer science*. 2017. Vol. 10187. P. 119–131. Doi: 10.1007/978-3-319-57099-0\_11.

#### References

1. Aloyan A. E. [Dynamics and kinetics of gas impurities and aerosols in the atmosphere: A course of lectures] M. : IVM RAN, 2002. 201 p.

2. Pironneau O. On the Transport-Diffusion Algorithm and Its Applications to the Navier-Stokes Equations // *Numerische Mathematik*. 1982. Vol. 38. P. 309–332.

3. Douglas J., Russell T. Numerical methods for convection-dominated diffusion problems based on combining the method of characteristics with finite element or finite difference procedures // *SIAM J. Numer. Anal.* 1982. Vol. 19. P. 871–885.

4. Magomedov K. M. Metod karakteristik dlja chislennogo reshenija prostranstvennyh techenij gaza // *Zhurnal vychislitel'noj matematiki i matematicheskoy fiziki*. 1966 T. 6, № 2. P. 313–325.

5. 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.

6. Shaydurov V. V., Shchepanovskaya G. I., Yakubovich M. V. Primenenie metoda trektorij i metoda konechnykh ehlementov v modelirovanii dvizheniya vyazkogo teploprovodnogo gaza // *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye*. 2011. T. 12. P. 275–281.

7. Shaydurov V., Shchepanovskaya G., Yakubovich M. A mathematical model and a numerical algorithm for an asteroid-comet body in the earth's atmosphere // *Lecture notes in computer science*. 2017. Vol. 10187. P. 119–131. Doi: 10.1007/978-3-319-57099-0\_11.

**ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЭРМИТОВЫХ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ДЛЯ УРАВНЕНИЯ ДИФФУЗИИ С ПЕРЕМЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ**

Л. В. Гилева<sup>1</sup>, Е. Д. Карпова<sup>2</sup>, А. А. Пьяных

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
E-mail: <sup>1</sup>gileva@icm.krasn.ru; <sup>2</sup>e.d.karepova@icm.krasn.ru

*Для уравнения диффузии с переменным коэффициентом предложен численный метод, основанный на использовании специальных бикубических эрмитовых элементов в сочетании с методом коллокации. Результаты расчетов показали высокую эффективность метода.*

*Ключевые слова: уравнение диффузии, метод конечных элементов, эрмитовы конечные элементы, метод коллокации.*

**THE APPLICATION OF SPECIAL HERMITE FINITE ELEMENTS TO THE DIFFUSION  
EQUATION WITH A VARIABLE COEFFICIENT**

L. V. Gileva<sup>1</sup>, E. D. Karepova<sup>2</sup>, A. A. Pinykh

Institute of Computational Modeling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
E-mail: <sup>1</sup>gileva@icm.krasn.ru; <sup>2</sup>e.d.karepova@icm.krasn.ru

*For the diffusion equation with a variable coefficient, a numerical method based on the use of special bicubic Hermite elements coupled with collocation is proposed. As a result, the dimension of the system of equations is reduced in comparison with the standard finite element scheme with the order of convergence of an approximate solution remaining unchanged. In the two-dimensional case, a convergence estimate is proved and confirmed with numerical experiments. Besides, for the one-dimensional case, numerical experiments with the standard Lagrange and Hermite cubic elements as well as with the special Hermite cubic elements proposed by the authors are performed. Numerical results demonstrate high efficiency of the last ones.*

*Keywords: diffusion equation, finite element method, Hermite finite elements, collocation method.*

Численное решение краевых задач для уравнений математической физики методом конечных элементов сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений [1; 2]. При использовании эрмитовых элементов размерность такой системы значительно меньше, чем в случае лагранжевых элементов такой же степени, при одинаковом порядке сходимости приближенного решения [3]. Кроме того, для некоторых уравнений использование эрмитовых элементов позволяет применить метод коллокации, поскольку множество степеней свободы эрмитовых элементов содержит значения производных. В результате размерность системы уравнений становится еще меньше. В [4] предложены новые прямоугольные бикубические эрмитовы элементы и рассмотрен численный алгоритм для уравнения Пуассона, основанный на использовании этих элементов совместно с коллокацией. В [5] этот метод применяется для уравнения диффузии с постоянными коэффициентами и приводится теоретическая оценка сходимости приближенного решения.

В настоящей работе данный подход обобщается для уравнения диффузии с переменным коэффициентом. Кроме того, для одномерного случая выполнены расчеты, позволяющие сравнить эффективность пред-

ложенного метода со стандартной схемой метода конечных элементов с использованием известных лагранжева и эрмитова кубических элементов.

В прямоугольной области  $\Omega$  с границей  $\Gamma$  рассмотрим задачу Дирихле для уравнения диффузии следующего вида:

$$-u_{xx} - u_{yy} + k(x)u = f(x, y) \quad \text{в } \Omega, \quad (1)$$

$$u = 0 \quad \text{на } \Gamma, \quad (2)$$

где  $k(x) = c \geq 0$ .

В области  $\Omega$  построим равномерную прямоугольную сетку с узлами  $(x_i, y_j)$ ,  $i = 0, \dots, n, j = 0, \dots, m$ .

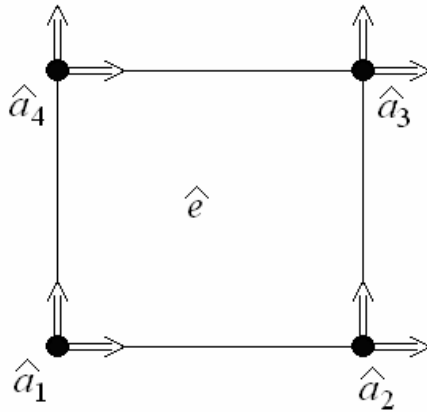
Для (1)–(2) рассмотрим стандартную схему метода конечных элементов с использованием бикубического эрмитова элемента, показанного на рисунке. Характерная черта этого элемента состоит в том, что множество его степеней свободы содержит значения вторых производных по каждой переменной в узлах элемента.

В результате мы получим систему уравнений, где неизвестными будут значения приближенного решения  $u^h(x_i, y_j)$  и приближенные значения вторых производных  $u_{xx}^h(x_i, y_j)$ ,  $u_{yy}^h(x_i, y_j)$ ,  $i = 1, \dots, n-1, j = 1, \dots, m-1$  во внутренних узлах сетки.

На основании (1) для приближенного решения мы можем записать соотношение

$$-u_{xx}^h(x_i, y_j) - u_{yy}^h(x_i, y_j) + k(x_i, y_j)u^h(x_i, y_j) \approx f(x_i, y_j).$$

Оно позволяет исключить неизвестные  $u_{xx}^h(x_i, y_j)$  либо  $u_{yy}^h(x_i, y_j)$ . В результате вместо системы из  $3N_{int}$  уравнений мы получаем систему из  $2N_{int}$  уравнений, где  $N_{int}$  – число внутренних узлов сетки.



«Эталонный» эрмитов элемент. Двойные стрелки показывают степени свободы, являющиеся значениями вторых производных в узле по соответствующему направлению

Доказано, что приближенное решение имеет четвертый порядок сходимости в среднеквадратичной норме, характерный для бикубических конечных элементов, т. е. уменьшение размерности системы уравнений не нарушает порядок сходимости, что подтверждают результаты численных экспериментов.

Результаты расчетов для одномерного случая показывают, что из трех рассмотренных вариантов предложенный подход наиболее эффективен. Он обеспечивает наименьшую размерность системы уравнений без существенной потери в точности.

## References

1. Brenner S., Scott L. The Mathematical Theory of Finite Element Method. New York: Springer-Verlag, 1994. 420 p.
2. Ciarlet P. The Finite Element Method for Elliptic Problems. Amsterdam: North Holland, 1978. 320 p.
3. Some properties of Hermite finite elements on rectangles / V. Shaidurov, S. Shut, L. Gileva // *AIP Conference Proceedings*, 2014. Vol. 1629. P. 32–43.
4. New Hermite finite elements on rectangles / L. Gileva, E. Karepova, V. Shaidurov // *AIP Conference Proceedings*, 2016. Vol. 1773. P. 100005. Doi: 10.1063/1.4964999
5. The application of a special Hermite finite element coupled with collocation to the diffusion equation / L. Gileva, E. Karepova, and V. Shaydurov // *Lecture Notes in Computer Science*, 2018. (submitted).

© Гилева Л. В., Карепова Е. Д., Пьяных А. А., 2018

## АНАЛИЗ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФФУЗИИ ТРОЙНЫХ СМЕСЕЙ В РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ ОТСЧЕТА\*

С. Козлова<sup>1,а</sup>, А. Мялдун<sup>2</sup>, И. Рыжков<sup>1</sup>, В. Шевцова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50/44

<sup>2</sup>Центр исследований в условиях микрогравитации, Свободный университет Брюсселя  
Бельгия, В-1050, г. Брюссель, ав. Ф. Д. Рузвельта, 50, СР-165/162

<sup>а</sup>E-mail: onique@icm.krasn.ru

*Представлен теоретический анализ зависимости коэффициентов диффузии от системы отсчета для тройных смесей, исследованных в ходе экспериментальной кампании DCMIX на Международной космической станции.*

*Ключевые слова: коэффициенты диффузии, тройная смесь, система отсчета, закон Фика, космический эксперимент.*

## THE ANALYSIS OF DIFFUSION COEFFICIENTS OF TERNARY MIXTURES IN DIFFERENT REFERENCE FRAMES

S. Kozlova<sup>1,а</sup>, A. Mialdun<sup>2</sup>, I. Ryzhkov<sup>1</sup>, V. Shevtsova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of computational modelling SB RAS, FRC KSC SB RAS  
50/44, Akademgorodok Str., Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>2</sup>Microgravity Research Center, Free University of Brussels  
50, F. D. Roosevelt Av., CP-165/62, Bruxelles, B-1050, Belgium

<sup>а</sup>E-mail: sonique@icm.krasn.ru

*In this work we theoretically analyze the dependence of diffusion coefficients on the reference frame for ternary mixtures from the experimental campaign DCMIX on the International Space Station.*

*Keywords: diffusion coefficients, ternary mixture, reference frame, Fick's law, space experiment.*

Описание и предсказание диффузионных процессов в смесях является важной составляющей для химических технологий, микрофлюидики, наук о разделении, биологических систем и пр. Экспериментальных данных для бинарных смесей в настоящее время достаточно много. Объем данных для тройных смесей по сей день остается ограниченным, поскольку для таких смесей должно быть измерено четыре коэффициента диффузии с помощью сигналов от двух лазерных лучей. В общем случае число коэффициентов  $(n-1)^2$  для смеси из  $n$  компонентов. Измерение коэффициентов диффузии и термодиффузии для некоторых тройных смесей проводятся с 2011 года в рамках экспериментальной кампании DCMIX на Международной космической станции.

Согласно закону Фика [1], диффузионный поток компонентов смеси пропорционален градиенту их концентрации, где коэффициент диффузии (матрица коэффициентов диффузии для смеси из  $n$  компонентов) служит коэффициентом пропорциональности. Диффузионный поток может быть представлен в трех системах отсчета, связанных с массовой, молярной и объемной скоростями компонентов смеси. В свою

очередь, коэффициенты диффузии многокомпонентных смесей также зависят от системы отсчета.

В данной работе выполнен анализ зависимости коэффициентов диффузии от системы отсчета для данных, измеренных в ходе кампаний DCMIX1 и DCMIX3 [2; 3]. В проекте DCMIX1 [1] были проведены измерения для 20 составов смеси тетрагидронафталин-изобутилбензол-додекан (с помощью дисперсии Тейлора [4; 5]), в проекте DCMIX3 [3] – для 21 состава смесь вода-этанол-триэтиленгликоль. Экспериментальные данные соответствуют системе отсчета, связанной со среднеобъемной скоростью компонентов. Преобразование матриц коэффициентов диффузии основано на связи между молярным и массовым диффузионными потоками, массовой и молярной долями, а также молярной концентрацией. Для данных DCMIX1 преобразование было выполнено в предположении, что смесь является идеальной. Для идеальной смеси ее плотность и молярный объем линейно зависят от концентраций компонентов. В таком случае парциальные молярные объемы компонентов, участвующие в преобразовании, равны молярным объемам компонентов смеси.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки (проект № 18-41-243005).

Для неидеальной смеси, как в проекте DCMIX3, парциальные молярные объемы были определены из нелинейной зависимости молярного объема смеси от молярных долей компонентов. Данная зависимость была построена с помощью полинома на основе экспериментальных данных для плотности.

Установлено, что коэффициенты диффузии имеют небольшую зависимость от системы отсчета в случае смеси тетрагидронафталин–изобутилбензол–додекан (проект DCMIX1) и весьма значительную зависимость для смеси вода–этанол–триэтиленгликоль (проект DCMIX3). Кроме того, для данных проекта DCMIX3 были получены отрицательные главные коэффициенты диффузии для некоторых составов смеси при переходе в другие системы отсчета. Известно, что отрицательные главные коэффициенты невозможно измерить экспериментально. Анализ коэффициентов перекрестной диффузии показал, что большая ошибка их измерений, вызванная технической сложностью эксперимента [6], может привести к неточным результатам. Вариация коэффициентов перекрестной диффузии в пределах диапазона ошибки позволяет скорректировать значения главных коэффициентов диффузии во всех системах отсчета.

#### References

1. Taylor, R., and Krishna, R., Multicomponent mass transfer, Wiley Series in Chemical Engineering, 2<sup>nd</sup> edition, 1993. 579 p.
2. Bou–Ali M. M., Ahadi A., Alonso de Mezquia D. et al. Benchmark values for the Soret, thermodiffusion and molecular diffusion coefficients of the ternary

mixture tetralin+isobutylbenzene+n-dodecane with 0.8-0.1-0.1 mass fraction. *European Physical Journal E*, 2015, Vol. 38, No. 30. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1140/epje/i2015-15030-7> (accessed: 10.06.2018).

3. Legros J. C., Gaponenko Y., Mialdun A. et al. Investigation of Fickian diffusion in the ternary mixtures of water–ethanol–triethylene glycol and its binary pairs. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2015, Vol. 17, P. 27713. Available at: <http://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2015/cp/c5cp04745e/unauth#!divAbstract> (accessed: 10.06.2018).

4. Mialdun A., Sechenyh V., Legros, J. C. Ortiz de Zarate J. M., Shevtsova V. Investigation of Fickian diffusion in the ternary mixture of 1,2,3,4 – tetrahydronaphthalene, isobutylbenzene, and dodecane. *Journal of Chemical Physics*, 2013. Vol. 139. P. 104903.

5. Sechenyh V., Legros J. C., Mialdun A. et al. Fickian Diffusion in Ternary Mixtures Composed by 1,2,3,4-Tetrahydronaphthalene, Isobutylbenzene, and n-Dodecane. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2016. Vol. 120. P. 535–54. Available at: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.jpcc.5b11143> (accessed: 10.06.2018)

6. Lapeira E., Bou-Ali M. M., Madariaga J. A., Santamaria C. Thermodiffusion Coefficients of Water/ Ethanol Mixtures for Low Water Mass Fractions, *Microgravity Science and Technology*, 2016. Vol. 28. P. 553–557. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12217-016-9508-7> (accessed: 10.06.2018).

© Козлова С., Мялду́н А., Ры́жков И.,  
Шевцова В., 2018



УДК 539.3

## МЕТОД МНОГОСЕТОЧНЫХ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В РАСЧЕТАХ КОМПОЗИТНЫХ БАЛОК СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

А. Д. Матвеев

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
E-mail: mtv241@mail.ru

*Для анализа трехмерного напряженного состояния упругих композитных (однородных) балок сложной формы с различными коэффициентами заполнения при статическом нагружении предложен метод многосеточных конечных элементов. Такие балки широко применяются в ракетно-космической технике. Предлагаемый метод базируется на алгоритмах метода конечных элементов с применением однородных и композитных многосеточных конечных элементов.*

*Ключевые слова: упругость, композитные балки, многосеточные конечные элементы.*

## MULTIGRID FINITE ELEMENT METHOD IN THE CALCULATIONS OF COMPOSITE BEAMS OF IRREGULAR SHAPE

A. D. Matveev

Institute of Computational Modeling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
E-mail: mtv241@mail.ru

*To calculate the stress and strain state of three-dimensional elastic composite beams of heterogeneous structure, irregular shape and static loading, a method of multigrid finite elements is provided, when implemented on the basis of algorithms of finite element method, using three-dimensional homogeneous and composite multigrid finite elements. Composites beams of irregular shape are widely used in space-rocket technology.*

*Keywords: elasticity, composites beams, multigrid finite elements.*

При анализе напряженного состояния трехмерных композитных балок сложной формы широко используют микро- и макроподходы [1]. Реализация макроподхода для композитных балок регулярной структуры сводится к проблеме нахождения эффективных модулей упругости, которая особенно трудно решаемая для композитов нерегулярной структуры. Расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) композитных балок сложной формы по методу конечных элементов (МКЭ) [2] с применением уравнений трехмерной задачи теории упругости приводит к построению базовых дискретных моделей высокой размерности, порядка  $10^8 \dots 10^{10}$ . Ширина ленты системы уравнений МКЭ для таких базовых моделей равна  $10^5 \dots 10^6$ . Применение в этом случае программ расчета ANSYS и др. затруднительно. В основе построения приближенных (технических) теорий деформирования упругих композитных балок лежат гипотезы, которые порождают решения с неустранимой погрешностью.

В данной работе для анализа трехмерного НДС упругих композитных балок сложной формы с различными коэффициентами заполнения при статическом нагружении предложен метод многосеточных конечных элементов (ММКЭ) [3–5]. Предлагаемый метод реализуется на основе алгоритмов МКЭ (в форме метода Ритца) с применением трехмерных

однородных и композитных многосеточных конечных элементов (МнКЭ) [3–7]. При построении МнКЭ используем функции перемещений в виде степенных и лагранжевых полиномов различных порядков и уравнения трехмерной задачи теории упругости, которые записаны в локальных декартовых системах координат. Полиномы Лагранжа эффективно применяются при построении МнКЭ балочного типа. Суть МнКЭ заключается в следующем. При проектировании  $n$ -сеточного КЭ используются  $n$  вложенных сеток. Мелкая сетка порождена базовым разбиением, которое учитывает (в рамках микроподхода) неоднородную структуру МнКЭ. Остальные  $n-1$  сетки применяем для понижения размерности МнКЭ (причем, с увеличением  $n$  размерность МнКЭ уменьшается). На базовом разбиении  $n$  – сеточного КЭ,  $n \geq 2$ , определяем функционал краевой задачи как функцию  $F$  многих переменных, которыми являются значения искомой функции в узлах мелкой сетки. На остальных  $n-1$  сетках строим аппроксимирующие функции, которые используем для понижения размерности функции  $F$ , что позволяет проектировать МнКЭ малой размерности. Показаны процедуры построения МнКЭ сложной формы балочного типа.

Основные отличия ММКЭ от МКЭ состоят в следующем. Во-первых, в ММКЭ можно применять сколь угодно мелкие базовые разбиения тел, что по-

зволяет сколь угодно точно учитывать их сложную форму, неоднородную и микронеоднородную структуру (без увеличения размерностей многосеточных дискретных моделей). В МКЭ невозможно использовать сколь угодно мелкие разбиения тел, так как ресурсы ЭВМ ограничены, т. е. ММКЭ более эффективный метод, чем МКЭ. Во-вторых, реализация ММКЭ требует (в  $10^3 \dots 10^6$  раз) меньше памяти ЭВМ и временных затрат, чем реализация МКЭ для базовых моделей, т. е. ММКЭ более экономичный, чем МКЭ. В-третьих, в ММКЭ применяем однородные и неоднородные МнКЭ, при построении которых используем систему вложенных сеток, что расширяет область применения ММКЭ. В МКЭ применяют однородные односеточные КЭ. Отметим, что всегда при решении задач упругости вместо МКЭ можно применить ММКЭ, поскольку вместо односеточных КЭ всегда можно использовать МнКЭ. Поэтому ММКЭ есть обобщение МКЭ, так как при построении МнКЭ используется не одна, а система вложенных сеток, т. е. МКЭ – частный случай ММКЭ.

Приведенный пример расчета трехмерного НДС балки волокнистой структуры и сложной формы показывает высокую эффективность применения ММКЭ, в котором используются предлагаемые композитные МнКЭ балочного типа.

#### Библиографические ссылки

1. Фудзии Т., Дзакко М. Механика разрушений композиционных материалов. М. : Мир, 1982. 232 с.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М. : Мир, 1975. 542 с.
3. Матвеев А. Д. Метод многосеточных конечных элементов в расчетах трехмерных однородных и композитных тел. // Учен. зап. Казан. ун-та. Серия: Физ.-мат. науки. 2016. Т. 158, кн. 4. С. 530–543.
4. Matveev A. D. Multigrid finite element method in stress of three-dimensional elastic bodies of heterogene-

ous structure // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2016. Vol. 158, № 1. Art. 012067, P. 1–9.

5. Матвеев А. Д. Метод многосеточных конечных элементов // Вестник КрасГАУ. 2018. № 2. С. 90–103.

6. Матвеев А. Д. Многосеточное моделирование композитов нерегулярной структуры с малым коэффициентом заполнения. // Прикладная механика и техническая физика. 2004. № 3. С. 161–171.

7. Матвеев А. Д. Построение сложных многосеточных конечных элементов с неоднородной и микронеоднородной структурой // Известия Алтайск. гос. ун-та. 2014. № 1/1. С. 80–83.

#### References

1. Fudzii T. and Dzako M. Fracture mechanics of composite materials. Moscow : Mir, 1982.
2. Zenkevich O. Finite element method in engineering. Moscow : Mir, 1975.
3. Matveev A. D. Multigrid finite element method in calculations of 3D homogeneous and composite bodies. // Uchenye Zapiski Kazanskogo niversiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki. 2016. 158 (4). P. 530–543.
4. Matveev A. D. Multigrid finite element method in stress of three dimensional elastic bodies of heterogeneous structure. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2016. 158 (1) 012067. P. 1–9.
5. Matveev A. D. Multigrid finite element Method. // The Bulletin of KrasGAU. 2018. No. 2. P. 90–103.
6. Matveev A. D. 2004. Multigrid Models of Composite Materials of Irregular Structure with a Small Filling Ratio. // J. Appl. Mech. Tech. Phys. P. 161–171.
7. Matveev A. D. 2014. Construction of complex multigrid finite elements of inhomogeneous and microinhomogeneous structure. // News of Altai State University. 1/1. P. 80–83.

© Матвеев А. Д., 2018

## К АНАЛИЗУ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТОНКОЙ ТРУБКИ

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

*Рассматривается модель тонкой трубки как модель мягкой тонкой оболочки, изгибная жесткость которой весьма мала. Уравнения равновесия составлены по деформированному состоянию; учитывается растяжимость трубки и изменение внутреннего давления. Расширения и напряжения в рассмотренной трубке существенно отличаются от расширений, полученных с помощью классического уравнения Лапласа – чем выше давление, различия существенней. Внутреннее давление имеет предельное значение, причем в определенном диапазоне одному и тому же давлению соответствуют два деформированных состояния.*

*Ключевые слова:* сосуды давления, напряжения, деформации.

## THE ANALYSIS OF THE STRAIN STATE OF A THIN TUBE

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 paper considers a model of a thin tube as a model of a soft thin shell, the bending stiffness of which is very small. The equation of equilibrium is composed by deformed state; takes into account the elongation of the tube and the change in internal pressure. The extensions and stresses in the considered tube differ significantly from those obtained by the classical Laplace equation – the higher the pressure, the differences are more significant. The internal pressure has a limit value, and in a certain range of the same pressure correspond to two deformed state.*

*Keywords:* pressure vessels, stresses, deformations.

Напряжения в тонких трубках традиционно вычисляют с помощью уравнения [1–3]

$$\sigma_L = q_0 R_0 / t_0, \quad (1)$$

а деформацию, с параметром  $w_L$ , (назовем  $w_L$  «расширением») по формуле

$$w_L = q_0 R_0^2 / Et_0. \quad (2)$$

Здесь  $\sigma_L$  – напряжение,  $q_0$  – давление,  $R_0$  – радиус,  $t_0$  – толщина,  $E$  – модуль Юнга.

Уравнения (1) и (2) не отражают изменения внутреннего давления и уменьшение толщины стенки трубки, как сосуда высокого давления при его расширении  $w$ .

В настоящей работе рассматривается модель деформирования трубки, для которой уравнения равновесия составляются по деформированному состоянию. Неизвестными величинами оказываются не только внутренние силы, но и геометрия деформированной трубки (оболочки) [4].

**Постановка задачи.** Обозначим радиус базисного слоя трубки символом  $R_0$ . Внутренний радиус равен  $R_0 - t_0 / 2$ , а внешний радиус  $R_0 + t_0 / 2$ . Тогда объем трубки единичной длины равен  $V_0 = 2\pi R_0 t_0$ .

При приложении нагрузки  $q = q_0 = \text{const}$ , произошло расширение  $w$ . Теперь толщина изменится и

станет равной  $t$ ; внутренний радиус будет  $R_0 + w - t / 2$ , внешний радиус равен  $R_0 + w + t_0 / 2$ . В этом случае объем материала единичной длины равен  $V = 2\pi(R_0 + w)t$ . Приравняв  $V = V_0$  вычислим толщину

$$t = R_0 t_0 / (R_0 + w). \quad (3)$$

Учитывая расширение  $w$ , составим уравнения равновесия:

$$N_\varphi = q_0 (R_0 + w). \quad (4)$$

Отсюда следует окружное напряжение

$$\sigma_\varphi = q_0 (R_0 + w) / t. \quad (5)$$

Положим упругое деформирование материала в рамках закона Гука:

$$\varepsilon_z = (\sigma_z - \mu\sigma_\varphi) / E, \quad \varepsilon_\varphi = (\sigma_\varphi - \mu\sigma_z) / E. \quad (6)$$

Здесь  $\varepsilon_z$ ,  $\sigma_z$  – относительная меридиональная деформация и меридиональное напряжение;  $\varepsilon_\varphi$  – относительная окружная деформация;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Пусть напряжение  $\sigma_z = 0$ , тогда второе уравнения в (6) приобретает вид

$$\sigma_\varphi = E\varepsilon_\varphi. \quad (7)$$

Составим геометрическое уравнение. Длина окружности недеформированного состояния равна

$l_0 = 2\pi R_0$ , а длина окружности деформированного:  $l_1 = 2\pi(R_0 + w)$ . Отсюда следует относительная деформация

$$\varepsilon_\varphi = (l_1 - l_0) / l_0 = w / R_0. \quad (8)$$

Подстановка (7) в (5), совместно с уравнением (8) даёт

$$\frac{w}{R_0 + w} = \frac{q_0 R_0}{Et}, \quad (9)$$

а подстановка (3) в (9) даёт разрешающее нелинейное уравнение

$$\frac{w}{(R_0 + w)^2} = \frac{q_0}{Et_0}. \quad (10)$$

Из (10) можно выразить  $q = q(w)$ :

$$q = Et_0 \frac{w}{(R_0 + w)^2}. \quad (11)$$

Приравняв производную функции (11)

$$\frac{dq}{dw} = Et_0 \left[ \frac{1}{(R_0 + w)^2} - \frac{2w}{(R_0 + w)^3} \right]$$

к нулю, получим

$$w = R_0. \quad (12)$$

Это есть точка, в которой

$$q = q_{\max} = Et_0 / (4R_0). \quad (13)$$

Выше этого значения давление подняться не может.

Наконец, подставив (3) в (5), получим формулу вычисления окружного напряжения

$$\sigma_\phi = q_0 (R_0 + w)^2 / (R_0 t_0), \quad (14)$$

учитывающую неизменность объема материала трубки.

**Расчет, заключение и выводы.** Трубка радиусом  $R_0 = 3$  мм и начальной толщины  $t_0 = 1$  мм, давление ( $E = 5 \cdot 10^4$  Па; предел прочности 1 МПа [1]).

1. Для этой трубки внутреннее давление имеет предельное значение  $q_{\max} = 4166,66$  Па.

2. Разность расширений существенна. Так при нагрузке  $q_0 = 1333,33$  Па расширение  $w^{(1)}$  отличается от расширения  $w^L$  на 25%. При нагрузке  $q_0 = 2666,66$  Па расширение  $w^{(1)}$  отличается от расширения  $w^L$  на 56%. При нагрузке  $q_0 = q_{\max}$ , расширение  $w^{(1)}$  отличается от расширения  $w^L$  на 400%. На такие же величины отличаются и напряжения. Максимальные напряжения при всех нагрузках не превышали предела прочности материала, равного 1 МПа.

3. Согласно формуле (11), при переходе через точку  $w = R_0$  давление начинает снижаться при увеличении расширения.

Данную формулировку задачи можно применять при исследованиях деформирования кровеносных сосудов [5] и, возможно, в космической медицине [6].

#### Библиографические ссылки

1. Биргер И. А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов. М.: Наука. 1986. 560 с.
2. Ван Цзи-де. Прикладная теория упругости. М.: Гос. изд-во физико-технической литературы, 1959. 400 с.
3. Шалашилин В. И., Горшков А. Г., Трошин В. Н. Сопротивление материалов: учеб. пособие. М.: МАИ, 2000. 616 с.
4. Балабух Л. И., Алфутов Н. А., Усюкин В. И. Строительная механика ракет. М.: Высш. шк., 1984. 391 с.
5. Медицинская физика: учебник / авт.-сост. В. А. Федоров, А. В. Яковлев, С. В. Васильева; Министерство образования и науки РФ, ФГБОУ ВПО. 2012. 122 п.
6. Фомина Г. А. Изменения сердечно-сосудистой системы человека в невесомости [Электронный ресурс] // XVI Конференция по космической биологии и медицине с междунар.участием (5–8 декабря 2016). С. 245–247. URL: spacemedicine-2016.com (дата обращения: 18.03.2018).

#### References

1. Birger I. A., Mavljutov R. R. *Soprotivlenie materialov* (Resistance of materials). Moscow, Nauka, 1986. 560 p.
2. Van Czi-de. *Prikladnaja teorija uprugosti* [Applied theory of elasticity]. Moscow: Fizmatgiz, 1959, 400 p.
3. Shalashilin V. I., Gorshkov A. G., Troshin V. N. *Soprotivlenie materialov* [Mechanics of materials]: Ucheb. posobie. Moscow: MAI, 2000. 616 p.
4. Balabukh L. I., Alfutov N. A., Usyukin V. I. *Stroitel'naya mekhanika raket* [structural mechanics of rockets]. M.: Vyssh. shk., 1984. 391 p.
5. *Medicinskaja fizika* [Medical physics]: uchebnik / avt.-sost. V. A. Fedorov, A. V. Jakovlev, S. V. Vasil'eva; Ministerstvo obr. i nauki RF, FGBOU VPO, 2012. 122 p.
6. G. A. *Izmenenija serdechno-sosudistoj sistemy cheloveka v nevesomosti* [Changes of cardiovascular system in weightlessness]. Konferencija po kosmicheskoj biologii i medicine s mezhdunarodnym uchastiem. Moscow, 5–8 dekabrja 2016 goda. P. 245–247 [Jelektronnyj resurs]. URL: spacemedicine-2016.com. Fomina (date of visit: 18.03.2018).

## ВАРИАЦИОННО-РАЗНОСТНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПЛАСТИНЫ В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ФУНКЦИЯХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НАГРУЗКИ

Р. А. Сабиров<sup>1</sup>, И. Я. Петухова<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: rashidsab@mail.ru

*Разработан вариационно-разностный метод расчета напряженного состояния пластинок в условиях плоской задачи теории упругости в функциях напряжений. Для решения температурной задачи применяется метод устранения деформаций С. Тимошенко. Получен функционал в функциях напряжений. Для формирования коэффициентов системы разрешающих уравнений и правой части применяются первая и вторая вариации функционала. Дискретизация континуальной задачи – конечно-разностная. Уравнения неразрывности обеспечиваются при достаточно редких конечно-разностных сетках, экономится время счета и ресурсы оперативной памяти. Составлена программа расчета на основе пакета Maple; приведен пример расчета свободной пластинки при неравномерном нагреве.*

*Ключевые слова: плоская задача теории упругости, функционал Кастилиано, вариационно-разностный метод, функция напряжений.*

## VARIATIONAL-DIFFERENCE METHOD OF CALCULATION OF A PLATE UNDER CONDITIONS OF PLANE STRESS STATE IN THE FUNCTION OF STRESSES FOR TEMPERATURE LOADS

R. A. Sabirov<sup>1</sup>, I. Ya. Petukhova<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: rashidsab@mail.ru

*A variational-difference method for calculating the stress state of plates under the conditions of the plane problem of elasticity theory in stress functions is developed. For the solution of a temperature problem the method of elimination of S. Timoshenko's deformations is applied. The functional in the stress functions is obtained. The first and second variations of the functional are used to form the coefficients of the system of resolving equations and its right-hand side. The discretization of the continuum problem is finite – difference. The equations of continuity are provided at a sufficiently rare finite-difference grids, time saving accounts and non-memory resources. The program of calculation on the basis of the Maple package is made; the example of calculation of a free plate at uneven heating is given.*

*Keywords: flat task of the theory of elasticity, Kastiliano's functionality, variation and differential method, function of tension.*

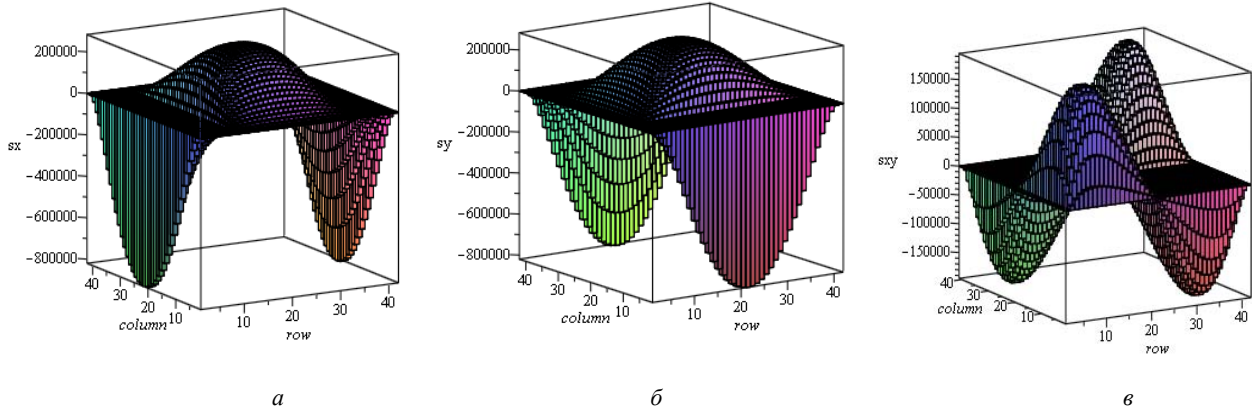
**Введение.** Одной из причин появления напряжений в теле является неравномерное его нагревание. Температура, как в земных условиях, так и в космическом пространстве изменяется каждую секунду.

Для решения задачи воспользуемся «методом устранения деформаций» [1; 2]. В этом методе для изотермического нагружения объемные и поверхностные силы определяются через температурное поле  $T(x, y, z)$  исходной температурной задачи. Известно, что модуль упругости стали при нагревании уменьшается [2], а модули упругости сплавов при нагревании как уменьшаются, так и увеличиваются [3].

**Постановка задачи.** Рассмотрена вариационная формулировка задачи [4–5]; получен функционал Кастилиано с учетом изменения температуры:

$$\mathfrak{E}_K(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = \iint_S \frac{1}{2E} \left[ \sigma_x^2 - 2\mu \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 2(1+\mu) \tau_{xy}^2 + \right] dx dy \quad (1)$$

Здесь:  $E = E(x, y)$  – модуль упругости;  $\mu = \mu(x, y)$  – коэффициент Пуассона;  $\alpha = \alpha(x, y)$  – коэффициент линейного температурного расширения материала;  $T = T(x, y)$  – температурное поле.



Эпюры нормальных и касательных напряжений в пластинке:

$a - \sigma_x$ ;  $b - \sigma_y$ ;  $v - \tau_{xy}$

Краевая задача формулируется так: из всех возможных напряженных состояний действительное напряженное состояние сообщает функционалу (1) максимальное значение [5].

Введем в функционал (1) функцию напряжений  $\varphi(x, y)$  [2], что дает

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_k(\varphi) = \\ = \iint_S \frac{1}{2E} \left[ \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \right)^2 - 2\mu \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \right)^2 + \right. \\ \left. + 2(1+\mu) \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} \right)^2 + 2E\alpha T \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \right) \right] dx dy. \quad (2) \end{aligned}$$

Для формирования разрешающей системы уравнений и ее правой части предлагается прием использования первой и второй вариаций функционала (2).

**Вариационно-разностная формулировка.** Континуальную область в (2) заменим дискретной. Выберем на области пластинки прямоугольную равномерную сетку  $\omega_{ij} = \{x_i = i\lambda_x, y_j = j\lambda_y\}$ ,  $i = 0, 1, \dots, m$ ,  $j = 0, 1, \dots, n\}$  на отрезках  $[0, l_x]$  и  $[0, l_y]$ . Здесь  $x = x_i$  и  $y = y_j$  – узлы сетки;  $\lambda_x = l_x / m$  и  $\lambda_y = l_y / n$  – шаг сетки, а  $l_x$  и  $l_y$  – размеры пластинки по направлениям осей координат  $x$  и  $y$ . Введем сетку с узлами  $\xi, \eta$ :

$$\begin{aligned} \omega_{\xi\eta} = \{x_\xi = \lambda_x / 2 + i\lambda_x, y_\eta = \lambda_y / 2 + j\lambda_y\}, \\ i = 0, 1, \dots, m-1, j = 0, 1, \dots, n-1\}. \end{aligned}$$

Для задания функции  $\varphi$  на контуре пластинки, используем «рамную аналогию» [5; 6].

**Расчет.** Для расчета пластинки на температурные нагрузки составлена программа расчета на основе пакета *Maple*. Приведем пример тестового расчета пластинки на изменение температуры по закону  $T(x, y) = T(2y / l_y)^2$  – такое распределение температуры рассматривается для балок в [1; 2; 7]. Пластинка квадратная в плане размерами  $l_x = 0,2$  м и  $l_y = 0,2$  м. Конечно-разностную сетку примем с шагом  $40 \times 40$ .

Модуль Юнга  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па; коэффициент Пуассона 0,5. Эпюры нормальных и касательных напряжений покажем на рисунке. Характер распределения напряжений  $\sigma_x$  согласуется с характером распределения аналогичного напряжения в стержне, температурной задачи рассмотренной в [7].

**Выводы:**

- 1) применение подхода к решению краевой задачи с использованием первой и второй вариаций функционала Кастилиано с конечно-разностной аппроксимацией позволили создать универсальный алгоритм расчета напряженного состояния пластинок на температурные воздействия;
- 2) расчеты напряженного состояния пластинки были выполнены на различных сетках; исследования сходимости показали достаточно хорошую сходимость решений, обеспечивающих неразрывность деформаций.

**Библиографические ссылки**

1. Тимошенко С. П. Теория упругости. Л. ; М. : ОНТИ. 1937. 451 с.
2. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. М. : Наука, 1975. 576 с.
3. Механические свойства материалов с эффектом памяти при сложном температурно-силовом воздействии и ортогональном нагружении : монография / под ред. И. Н. Андронов. Ухта : УГТУ, 2010. 191 с.
4. Ланцош К. Вариационные принципы механики : пер. с англ. М. : Мир, 1965. 408 с.
5. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности : пер. с англ. М. : Мир, 1987. 542 с.
6. Новацкий В. Теория упругости. М. : Мир. 1975. 872 с.
7. Биргер И. А., Мавлютов Р. Р. Сопrotивление материалов. М. : Наука, 1986. 560 с.

**References**

1. Timoshenko S. P. *Teorija uprugosti* (Theory of elasticity). Leningrad–Moscow, ONTI, 1937. 451 p.

2. Timoshenko S. P., Gud'er Dzh. *Teorija uprugosti* (Theory of elasticity). Moscow, Nauka, 1975. 576 p.

3. *Mehanicheskie svojstva materialov s jeffektom pamjati pri slozhnom temperaturno-silovom vozdejstvii i ortogonal'nom nagruzhении* (Mechanical properties of materials with effect of memory at difficult temperature and power influence and orthogonal loading). Monograph, ed. IN Andronov. Uhta, UGTU, 2010. 191 p.

4. Lancosh K. *Variacionnye principy mehaniki* (Variation principles of mechanics). Moscow, Mir, 1965. 408 p.

5. Vasidzu K. *Variacionnye metody v teorii uprugosti i plastichnosti* (Variational methods in elasticity and plasticity). Moscow, Mir, 1987. 542 p.

6. Novackij V. *Teorija uprugosti* (Elasticity theory). Moscow, Mir. 1975. 872 p.

7. Birger I. A., Mavljutov R. R. *Soprotivlenie materialov* (Resistance of materials). Moscow, Nauka, 1986. 560 p.

© Сабиров Р. А., Петухова И. Я., 2018

УДК 539.37

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ СЕЙСМОИСТОЧНИКОМ «ЕНИСЕЙ», В БЛОЧНО-СЛОИСТЫХ СРЕДАХ\*

О. В. Садовская, В. М. Садовский

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
E-mail: o\_sadov@icm.krasn.ru

*Разработана вычислительная технология для многопроцессорных систем кластерной архитектуры, позволяющая с высокой степенью детализации моделировать систему волн вблизи области возбуждения сейсмических колебаний импульсным источником «Енисей».*

*Ключевые слова: блочно-слоистая среда, электромагнитный источник сейсмических колебаний, упругие волны, параллельный алгоритм, суперкомпьютерное моделирование.*

## NUMERICAL STUDY OF WAVE FIELDS, GENERATED BY SEISMIC SOURCE “YENISEI”, IN BLOCKY-LAYERED MEDIA

O. V. Sadovskaya, V. M. Sadovskii

Institute of Computational Modeling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
E-mail: o\_sadov@icm.krasn.ru

*We developed computational technology for multiprocessor computing systems of cluster architecture, which allows modeling a system of waves near the region of excitation of seismic oscillations by a pulse source “Yenisei” with a high degree of details.*

*Keywords: blocky-layered medium, electromagnetic source of seismic oscillations, elastic waves, parallel algorithm, supercomputing simulation.*

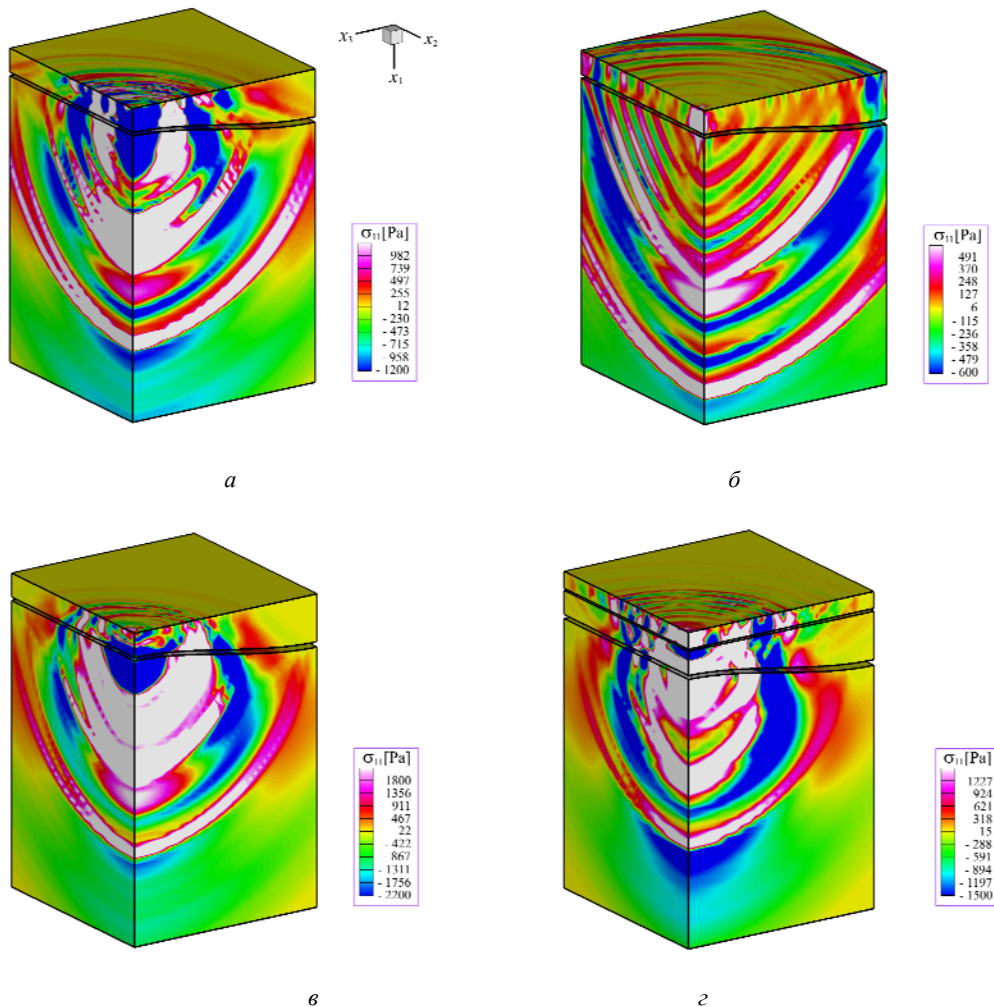
Создана вычислительная технология, конечной целью которой является детальное математическое моделирование волновых полей, возбуждаемых сейсмоисточником «Енисей» в блочно-слоистых геосредах с различными механическими характеристиками блоков (в глинистых и мерзлых грунтах, сыпучих, пористых и флюидонасыщенных средах). Электромагнитный источник сейсмических колебаний «Енисей» представляет собой невзрывной поверхностный импульсный сейсмический источник с силовым электромагнитным приводом [1]. Это оригинальная разработка ПАО «ГЕОТЕК сейсморазведка» (<http://gseis.ru/our-business/field-seismic-works/impulsetechnique/>). Источник существует в колесном, санном, мобильном и водном вариантах. Он вполне конкурентоспособен в сравнении с источниками взрывного и вибрационного типов по эффективности и качеству производства разведочных работ, и имеет неоспори-

мые преимущества в экономическом и экологическом аспектах.

Для численного моделирования процессов распространения волн напряжений и деформаций в реологически сложных средах нами разработаны вычислительные алгоритмы и программные комплексы на языке Fortran с использованием библиотеки MPI (Message Passing Interface), ориентированные на многопроцессорные вычислительные системы кластерной архитектуры. Применяются математические модели упругопластических, сыпучих и пористых сред с учетом разного сопротивления материалов растяжению и сжатию [2–4]. Используются также уравнения динамики моментного континуума Коссера, описывающие волновые движения структурно-неоднородных сред, в которых наряду с поступательными степенями свободы учитываются независимые вращения материальных частиц [5].

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта: «Анализ волновых сейсмических полей, генерируемых электромагнитным импульсным источником «Енисей» в неоднородных грунтовых массивах при проведении геологоразведочных работ в условиях северных районов Восточной Сибири».





Поверхности уровня нормального напряжения в вертикальном направлении: нижний слой – грунт; верхний слой – глина (а), твердый грунт (б), вода (в), верхний слой – лед, средний слой – вода (г)

При численной реализации моделей применяется метод расщепления по физическим процессам и по пространственным переменным на структурированной криволинейной сетке в сочетании с конечно-объемной ENO (Essentially Non Oscillatory) – схемой для решения одномерных гиперболических систем. Расчеты трехмерных задач для блочно-слоистых сред под воздействием источника сейсмических колебаний «Енисей» проводились с помощью комплекса параллельных программ *3Dyn\_Granular* [6], зарегистрированного в Роспатенте. На рисунке представлены результаты расчетов для двухслойного и трехслойного массивов упругой среды (в один из моментов времени), выполненные на 96 процессорах кластера ИВМ СО РАН.

На рисунке, а изображены характерные поверхности уровня нормального напряжения в случае податливого верхнего слоя (глина), на рисунке, б – в случае жесткого верхнего слоя (твердый грунт). Верхний слой – вода на рисунке, в. Верхний слой – лед, средний слой – вода на рисунке, г. В качестве нижнего слоя всюду в расчетах взяты параметры мягкого грунта.

Результаты моделирования с применением высокопроизводительных вычислений будут использоваться для оптимизации режимов функционирования источника при проведении сейсмических исследований.

#### Библиографические ссылки

1. Детков В. А., Щадин П. Ю., Ивашин В. В. Импульсные электромагнитные сейсмоисточники «Енисей»: особенности технического решения и применения // Приборы и системы разведочной геофизики. 2007. Т. 22, № 4. С. 30–33.
2. Садовская О. В., Садовский В. М. Параллельная реализация алгоритма для расчета упругопластических волн в сыпучей среде // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2005. Т. 6, № 2. С. 86–93.
3. Sadovskaya O., Sadovskii V. *Mathematical Modeling in Mechanics of Granular Materials*. Vol. 21 of *Advanced Structured Materials*. Heidelberg – New York – Dordrecht – London: Springer, 2012. 390 p.
4. Садовский В. М., Садовская О. В. Анализ деформации пористой среды с учетом схлопывания пор

// Прикладная механика и техническая физика. 2016. Т. 57, № 5. С. 53–65.

5. Sadovskii V. M., Sadovskaya O. V. Modeling of elastic waves in a blocky medium based on equations of the Cosserat continuum // *Wave Motion*. 2015. Vol. 52. P. 138–150.

6. Садовский В. М., Садовская О. В. Программный комплекс для решения трехмерных упругопластических задач динамики сыпучих сред (3Dyn\_Granular). Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012613990 от 28.04.2012 // Программы, зарегистрированные в реестре программ для ЭВМ Российской Федерации. RU ОБПБТ № 3 (80). М. : ФИПС, 2012. С. 209.

### References

1. Detkov V. A., Schadin P. Yu., Ivashin V. V. [Pulsed electromagnetic seismic sources “Yenisei”: Features of technical solutions and applications]. *J. Devices Systems Explor. Geophys.* 2007. Vol. 22, No. 4. P. 30–33. (In Russ.)

2. Sadovskaya O. V., Sadovskii V. M. [Parallel implementation of an algorithm for the computation of elasto-plastic waves in a granular medium]. *Numer.*

*Methods Program.* 2005. Vol. 6, No. 2. P. 86–93. (In Russ.)

3. Sadovskaya O., Sadovskii V. *Mathematical Modeling in Mechanics of Granular Materials*. Vol. 21 of *Advanced Structured Materials*. Heidelberg – New York – Dordrecht – London, Springer, 2012. 390 p.

4. Sadovskii V. M., Sadovskaya O. V. Analyzing the deformation of a porous medium with account for the collapse of pores. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2016. Vol. 57, No. 5. P. 808–818.

5. Sadovskii V. M., Sadovskaya O. V. Modeling of elastic waves in a blocky medium based on equations of the Cosserat continuum. *Wave Motion*. 2015. Vol. 52. P. 138–150.

6. Sadovskii V. M., Sadovskaya O. V. Parallel program system for the solution of three-dimensional elastic-plastic problems of the dynamics of granular media (3Dyn\_Granular). Certificate of state registration of the computer program no. 2012613990 from 28.04.2012. Programs registered in the registry of computer programs of the Russian Federation. RU ОБПБТ No. 3 (80), Moscow, FIPS, 2012. P. 209. (In Russ.)

© Садовская О. В., Садовский В. М., 2018

## ОБ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ УРАВНЕНИЯХ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ, ПО-РАЗНОМУ СОПРОТИВЛЯЮЩИХСЯ РАСТЯЖЕНИЮ И СЖАТИЮ

В. М. Садовский, О. В. Садовская, И. Е. Петраков

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
E-mail: sadov@icm.krasn.ru

*Предложен метод построения определяющих соотношений общего вида, учитывающих упругие, пластические и вязкие свойства волокнистых композитных материалов, по-разному сопротивляющихся растяжению и сжатию.*

*Ключевые слова: волокнистый композит, упругость, пластичность, вязкость, реологическая схема, вариационное неравенство.*

## ON CONSTITUTIVE EQUATIONS OF FIBROUS COMPOSITES, DIFFERENTLY RESISTANT TO TENSION AND COMPRESSION

V. M. Sadovskii, O. V. Sadovskaya, I. E. Petrakov

Institute of Computational Modeling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
E-mail: sadov@icm.krasn.ru

*We developed the method of constructing constitutive equations of a general form, taking into account elastic, plastic and viscous properties of fibrous composite materials, which differ in their resistance to tension and compression.*

*Keywords: fibrous composite, elasticity, plasticity, viscosity, rheological scheme, variational inequality.*

Ранее авторами был развит оригинальный подход к построению феноменологических определяющих соотношений деформируемых сред с помощью обобщенного реологического метода. В этом методе сложные деформационные свойства структурно неоднородного материала имитируются реологической схемой, включающей в себя базовые элементы для описания упругости, пластичности и вязкости, а также новый элемент, используемый для моделирования различного сопротивления растяжению и сжатию. На основе этого подхода были построены математические модели разномодульных, разнопрочных и сыпучих сред разного уровня сложности [1–3].

В настоящей работе обобщенный реологический метод применяется к описанию однонаправленных композитных материалов, в которых волокна имеют относительно высокую жесткость при растяжении и низкую – при сжатии. К такого рода композитам относится, например, лед, армированный геосинтетическими нитями [4], органопластики с арамидными волокнами, предел прочности которых при сжатии в 5–10 раз ниже, чем при растяжении (<http://polycomposite.ru/composite/organoplastik.php>).

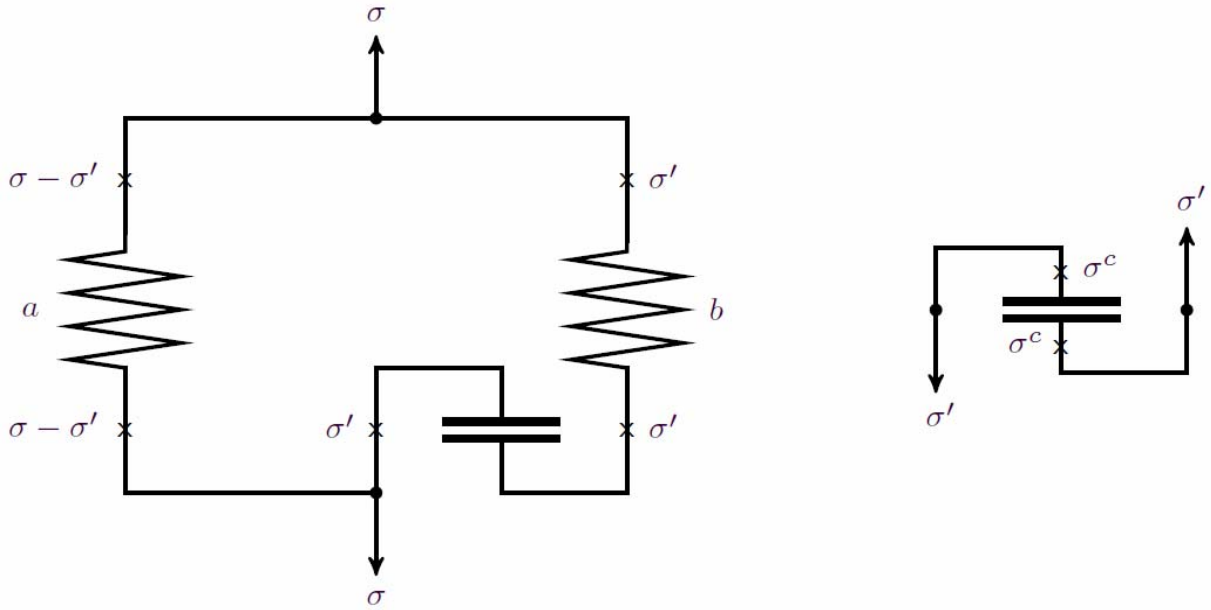
Простейший пример напряженно-деформированного состояния, в котором проявляется разное сопротивление волокнистого композита растяжению и сжатию – это состояние чистого изгиба. При изгибе пластины или балки верхние волокна по направлению прогиба растягиваются, а нижние сжимаются. Жесткость волокон на растяжение значительно больше

жесткости матрицы, а при сжатии волокна слабо влияют на жесткость композита в целом. Их вклад практически равен нулю для гибких нитей, используемых для армирования льда. В случае высокопрочных углепластиков с увеличением прогиба (с увеличением кривизны) происходит потеря устойчивости и последующее отслоение волокон от матрицы в зоне сжатия, что приводит к дальнейшему снижению сопротивления материала в этой зоне.

Положение нейтральной линии при чистом изгибе пластины из материала, по-разному сопротивляющегося растяжению и сжатию, не совпадает со средней линией, как в классической задаче изгиба с симметричной диаграммой одноосного растяжения–сжатия. Кроме того, положение нейтральной линии меняется по мере разрушения и отслоения волокон.

Анализ точного решения задачи изгиба показывает, что ошибка в определении прогиба композитной пластины может достигать 90 %, если при расчете изгибной жесткости не учитывать изменение модуля упругости при смене знака деформации.

На рисунке представлена простейшая реологическая схема разномодульного упругого материала. При учете вязких и пластических свойств в соответствии с реологическим методом в нее необходимо встроить вязкие и пластические элементы. Левая пружина в схеме характеризует жесткость материала при сжатии, правая пружина – приращение жесткости при растяжении.



Реологическая схема упругого композитного материала

Жесткий контакт учитывает переход от состояния сжатия к растяжению, и наоборот. По закону Гука

$$\sigma - \sigma' = a : \varepsilon, \quad \sigma' = b : (\varepsilon - \varepsilon'), \quad (1)$$

где  $\sigma$  и  $\varepsilon$  – тензоры действительных напряжений и деформаций;  $\sigma'$  – тензор напряжений, соответствующий правой пружине;  $\varepsilon'$  – разность между тензорами деформаций, соответствующими левой и правой пружинам;  $a$  и  $b$  – тензоры модулей упругости, двоеточие означает двойную свертку. Определяющие соотношения жесткого контакта формулируются в виде вариационного неравенства:

$$\sigma' : \delta \varepsilon' \geq 0, \quad \varepsilon', \varepsilon' + \delta \varepsilon' \in C. \quad (2)$$

Здесь  $\delta \varepsilon'$  – вариация тензора  $\varepsilon'$ ;  $C$  – конус допустимых деформаций. Для однонаправленного волокнистого композита  $C = \{\varepsilon \mid \varepsilon_{11} \leq 0\}$ , где  $\varepsilon_{11}$  – деформация в направлении волокна. В случае перекрестного армирования конус  $C$  имеет более сложный вид.

С помощью математического аппарата выпуклого анализа доказывается, что соотношения (1)–(2) приводят к определяющему уравнению

$$\sigma = (a + b) : \varepsilon - b : \Pi(\varepsilon), \quad (3)$$

в котором  $\Pi(\varepsilon)$  обозначает проекцию тензора  $\varepsilon$  на конус  $C$  по евклидовой норме  $|\varepsilon|^2 = \varepsilon : b : \varepsilon$ .

Если  $\varepsilon \in C$ , то  $\Pi(\varepsilon) = \varepsilon$ . В этом случае уравнение (3) приводится к виду:  $\sigma = a : \varepsilon$ , и описывает состояние сжатия композита. Если  $\Pi(\varepsilon) = 0$ , то из (3) вытекает уравнение  $\sigma = (a + b) : \varepsilon$  для растяжения (с большей жесткостью). Случай, когда проекция принадлежит конической поверхности  $C$ , соответствует переходному состоянию, в котором сопротивление волокон растягивающей деформации нарастает по мере перемещения проекции к вершине конуса.

Определяющее уравнение (3) позволяет строить устойчивые вычислительные процедуры при решении краевых задач статического состояния и динамиче-

ского деформирования волокнистых композитов. Более общие уравнения, учитывающие разное сопротивление растяжению и сжатию армирующих волокон и матрицы композита, были представлены в [6].

#### Библиографические ссылки

1. Sadovskaya O., Sadovskii V. *Mathematical Modeling in Mechanics of Granular Materials*. Vol. 21 of *Advanced Structured Materials*. Heidelberg – New York – Dordrecht – London: Springer, 2012. 390 p.
2. Садовский В. М., Садовская О. В. Анализ деформации пористой среды с учетом схлопывания пор // *Прикладная механика и техническая физика*. 2016. Т. 57, № 5. С. 53–65.
3. Мясников В. П., Садовский В. М. Вариационные принципы теории предельного равновесия разнородных сред // *Прикладная математика и механика*. 2004. Т. 68, вып. 3. С. 487–498.
4. Матвеев С. А., Немировский Ю. В. *Армированные дорожные конструкции: моделирование и расчет*. Новосибирск: Наука, 2006. 348 с.
5. Бузник В. М., Каблов Е. Н. *Отечественное арктическое материаловедение: состояние и перспективы развития* [Электронный ресурс]. URL: [https://www.sbras.ru/files/news/docs/buznik\\_kablov\\_09\\_03\\_2017.pdf](https://www.sbras.ru/files/news/docs/buznik_kablov_09_03_2017.pdf) (дата обращения: 10.06.2018).
6. Sadovskii V. M., Sadovskaya O. V. Constitutive relationships of fiber-reinforced composites having different resistance to tension and compression [Электронный ресурс]. URL: <http://www.memocsevents.eu/wordpress/euromech579/wp-content/uploads/2017/02/Sadovskii.pdf> (дата обращения: 10.06.2018).

#### References

1. Sadovskaya O., Sadovskii V. *Mathematical Modeling in Mechanics of Granular Materials*. Vol. 21 of *Ad-*

*vanced Structured Materials*. Heidelberg – New York – Dordrecht – London, Springer, 2012. 390 p.

2. Sadovskii V. M., Sadovskaya O. V. Analyzing the deformation of a porous medium with account for the collapse of pores. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2016, Vol. 57, No. 5. P. 808–818.

3. Myasnikov V. P., Sadovskii V. M. Variational principles of the theory of the limiting equilibrium of media with different strengths. *J. Appl. Math. Mech.* 2004. Vol. 68, Iss. 3. P. 437–446.

4. Matveev S. A., Nemirovskii Yu. V. *Armirovannyye dorozhnye konstruktsii: modelirovanie i raschet* [Reinforced Road Structures: Modeling and Calculation]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2006. 348 p. (In Russ.)

5. Buznik V. M., Kablov E. N. *Otechestvennoe arkticheskoe materialovedenie: sostoyanie i perspektivy razvitiya* [Domestic Arctic Materials Science: State and Prospects of Development]. Available at: [https://www.sbras.ru/files/news/docs/buznik\\_kablov\\_09\\_03\\_2017.pdf](https://www.sbras.ru/files/news/docs/buznik_kablov_09_03_2017.pdf) (accessed: 10.06.2018). (In Russ.)

6. Sadovskii V. M., Sadovskaya O. V. Constitutive relationships of fiber-reinforced composites having different resistance to tension and compression. Available at: <http://www.memocsevents.eu/wp-content/uploads/2017/02/Sadovskii.pdf> (accessed: 10.06.2018).

© Садовский В. М., Садовская О. В.,  
Петраков И. Е., 2018

УДК 539.374

**ТРЕХМЕРНЫЕ ПЛАСТИЧЕСКИЕ ТЕЧЕНИЯ, СООТВЕТСТВУЮЩИЕ ОДНОРОДНОМУ НАПРЯЖЕННОМУ СОСТОЯНИЮ**

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

*Построены новые пространственные решения, которые соответствуют однородному напряженному состоянию. Тем самым показано, что в известной статье В. Прагера 1956 г., найдены не все возможные решения, соответствующие этому состоянию.*

*Ключевые слова: однородное напряженное состояние, трехмерные пластические течения.*

**THREE-DIMENSIONAL PLASTIC FLOW CORRESPONDING TO A HOMOGENEOUS STRESS STATE**

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

*We have constructed new spatial solutions that correspond to a uniform stress state. This showed that in the well-known article of V. Prager in 1956, not all possible solutions corresponding to this state were found.*

*Keywords: uniform stress state, three-dimensional plastic flows.*

Работы, в которых рассматриваются трехмерные пластические течения, весьма немногочисленны. Это работы Р. Хилла [1], Д. Д. Ивлева [2], М. А. Задояна [3] и одного из авторов данной статьи [2; 4–6]. Особняком на этом фоне выглядит работа В. Прагера [7]. В ней подробно рассмотрено однородное пластическое состояние и построены поля скоростей ему соответствующие. Им в, частности показано, что такому состоянию могут соответствовать только поля скоростей в виде полиномов второй степени. Фундаментальность исследования и авторитет автора, казалось, гарантирует, что ошибок в работе нет. Тем не менее, в исследование вкралась неточность и, оказалось, что существуют решения, соответствующие однородному напряженному состоянию, отличные от решений, указанных В. Прагером. Такие решения построены в данной работе.

1. Состояние трехмерного пластического течения может быть описано с помощью следующей системы уравнений

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0, \quad S_{ij} = \lambda e_{ij}, \quad S_{ij} S_{ij} = 2k_s^2, \quad (1)$$

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - p, \quad 3p = \sigma_{ii},$$

где  $\sigma_{ij}$ ,  $S_{ij}$  – компоненты тензора и девиатора тензора напряжений;  $\lambda$  – неотрицательная функция;  $k_s^2$  – предел текучести при чистом сдвиге;  $2e_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$  – компоненты тензора скоростей деформации;  $u_i$  – компоненты вектора скорости. По повторяющимся индексам предполагается суммирование. Система урав-

нений (1) – это система из 10 уравнений на 6 компонент тензора напряжений  $\sigma_{ij}$ , три компоненты вектора скорости  $u_i$  и коэффициент  $\lambda$ .

Рассмотрим такое поле скоростей

$$\begin{aligned} u_1 &= a \exp(\alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma x_3), \\ u_2 &= b \exp(\alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma x_3), \\ u_3 &= c \exp(\alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma x_3). \end{aligned} \quad (2)$$

Предположим, что  $p$  – постоянно. Вычислим для этого поля компоненты девиатора тензора напряжений. Получаем

$$\begin{aligned} S_{11} &= \alpha a \mu, \quad S_{22} = \beta b \mu, \\ S_{33} &= \gamma c \mu, \quad S_{12} = (\alpha b + \beta a) \mu, \\ S_{13} &= (\alpha c + \gamma a) \mu, \quad S_{23} = (\beta c + \gamma b) \mu, \\ \mu^{-2} &= 2k_s^2 ((\alpha a)^2 + (\beta b)^2 + (\gamma c)^2 + \\ &+ (\alpha b + \beta a)^2 + (\alpha c + \gamma a)^2 + (\beta c + \gamma b)^2)^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Из (3) следует, что все компоненты тензора напряжений постоянны, поле скоростей (2) не совпадает с полем скоростей построенным В. Прагером. Поэтому необходимо более тщательно исследовать поля скоростей, которые соответствуют однородному напряженному состоянию.

2. Пусть все  $\sigma_{ij}$  и соответствующие им компоненты девиатора тензора напряжений  $S_{ij}$  – постоянны. Тогда, для определения компонент тензора скоростей деформации, кроме уравнений

$$S_{ij} = \lambda e_{ij}, \quad (4)$$

мы должны рассмотреть систему из шести уравнений совместности деформации.

$$\frac{\partial^2 e_{11}}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 e_{22}}{\partial x_1^2} = 2 \frac{\partial^2 e_{12}}{\partial x_1 \partial x_2}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 e_{11}}{\partial x_2 \partial x_3} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left( -\frac{\partial e_{23}}{\partial x_1} + \frac{\partial e_{12}}{\partial x_3} + \frac{\partial e_{13}}{\partial x_2} \right).$$

Остальные 4 уравнения получаются из (5) круговой перестановкой индексов. Из (4) имеем

$$e_{ij} = S_{ij} / S_{11} e_{11}. \quad (6)$$

Подставляем (6) в (5) и, учитывая, что  $S_{ij}$  – постоянны, получаем

$$S_{11} \frac{\partial^2 e_{11}}{\partial x_2^2} + S_{22} \frac{\partial^2 e_{11}}{\partial x_1^2} = 2S_{12} \frac{\partial^2 e_{11}}{\partial x_1 \partial x_2}, \quad (7)$$

$$S_{11} \frac{\partial^2 e_{11}}{\partial x_2 \partial x_3} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left( -S_{23} \frac{\partial e_{11}}{\partial x_1} + S_{12} \frac{\partial e_{11}}{\partial x_3} + S_{13} \frac{\partial e_{11}}{\partial x_2} \right).$$

Остальные 4 уравнения получаем из (7) круговой перестановкой индексов.

Система уравнений (7) есть система шести однородных уравнений относительно шести неизвестных  $\frac{\partial^2 e_{11}}{\partial x_i \partial x_j}$ , эта система имеет постоянные коэффициенты.

Система (7) имеет определитель равный нулю, поскольку она имеет нетривиальное решение, соответствующее полю скоростей (2). Будем считать переменную  $\frac{\partial^2 e_{11}}{\partial x_1 \partial x_2}$  известной и решим систему из 5 уравнений с пятью неизвестными методом Крамера.

В результате получим

$$\frac{\partial^2 e_{11}}{\partial x_i \partial x_j} = c_{ij} \frac{\partial^2 e_{11}}{\partial x_1 \partial x_2}, \quad (8)$$

где  $c_{ij}$  – постоянные, которые являются отношением соответствующих определителей системы (7).

Решая последовательно уравнения (8), после несложных вычислений получаем

$$e_{11} = f(\alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma x_3)$$

где  $\alpha, \beta, \gamma$  – произвольные постоянные;  $f$  – произвольная гладкая функция. Остальные компоненты тензора скоростей деформации без труда определяют из уравнений (6).

Окончательно поле скоростей для однородного напряженного состояния принимает вид

$$u_1 = Af(\alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma x_3 + \delta),$$

$$u_2 = Bf(\alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma x_3 + \delta),$$

$$u_3 = Cf(\alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma x_3 + \delta),$$

Здесь постоянные  $A, B, C, \alpha, \beta, \gamma, \delta$  без труда определяются через  $S_{ij}$ .

Замечание. Случай рассмотренный В. Прагером соответствует тривиальному решению системы (7).

Это означает, что  $\frac{\partial^2 e_{11}}{\partial x_i \partial x_j} = 0$ .

Тогда  $e_{11} = \alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma x_3 + \delta$ . В результате поле скоростей имеет квадратичный вид, что и было исследовано В. Прагером.

Заключение. В результате проведенного исследования показано, что однородному напряженному состоянию соответствует бесконечное количество полей скоростей, а не одно поле как это было приведено в работе [7].

#### Библиографические ссылки

1. Хилл Р. Математическая теория пластичности. М.: ГИТЛ, 1956. 408 с.
2. Предельное состояние деформированных тел и горных пород / Д. Д. Ивлев [и др.] М.: Физматлит, 2008.
3. Задоян М. А. Пространственные задачи теории пластичности. М.: Наука, 1992. 382 с.
4. Сенашов С. И., Гомонова О. В., Яхно А. Н. Математические вопросы двумерных уравнений идеальной пластичности / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2012. 137 с.
5. Групповые свойства уравнений упругости и пластичности / Б. Д. Аннин, В. О. Бытев, С. И. Сенашов. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние. 1985.
6. Киряков П. П., Сенашов С. И., Яхно А. Н. Приложение симметрий и законов сохранения к решению дифференциальных уравнений. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 190 с.
7. Прагер В. Трехмерное пластическое течение при однородном напряженном состоянии // Механика, сб. переводов и обзоров иностранной литературы. 1958. № 3. С. 23–27.

#### References

1. Hill R. *Matematicheskaya teoriya plastichnosti*. [Mathematical theory of plasticity]. Moscow: GITL, 1956. 408 p.
2. *Predel'noye sostoyaniye deformirovannykh tel i gornykh porod* [Limit state of deformed bodies and rocks] / D. D. Ivlev [et al.]. Moscow: Fizmatlit, 2008.
3. Zadoyan M. A. *Prostranstvennyye zadachi teorii plastichnosti*. [Spatial problems of plasticity theory] Moscow: Nauka, 1992. 382 p.
4. Senashov S. I., Gomonova O. V., Yakhno A. N. *Matematicheskiye voprosy dvumernykh uravneniy ideal'noy plastichnosti*. [Mathematical problems of two-dimensional equations of ideal plasticity]. Krasnoyarsk. SibGAU, 2012. 137 p.
5. *Grupповые свойства уравнений упругости и пластичности* [Group properties of elasticity and plasticity equations] / B. D. Annin, V. O. Bytev, S. I. Senashov. Novosibirsk: Nauka, Sib. otdeleniye. 1985.
6. Kiryakov P. P., Senashov S. I., Yakhno A. N. *Prilozheniye simmetriy i zakonov sokhraneniya k resheniyu differentsial'nykh uravneniy*. [Application of symmetries and conservation laws to the solution of differential equations] Novosibirsk, Izd. SO RAN, 2001. 190 p.
7. Prager V. *Trekhmernoye plasticheskoye techeniye pri odnorodnom napryazhenom sostoyanii*. [Three-dimensional plastic flow at uniform stress state]. // *Mekhanika, sb. perevodov i obzorov inostrannoy literatury*. 1958, № 3. P. 23–27.

УДК 519.688

## ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА, УЧИТЫВАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ\*

И. В. Смолехо

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
E-mail: ismol@icm.krasn.ru

*Разработанный ранее вычислительный алгоритм, позволяющий учитывать влияние электрического поля на поведение жидких кристаллов, реализован в виде параллельной программы с применением технологии CUDA. Проведены тестовые расчеты.*

*Ключевые слова: жидкий кристалл, динамика, электрическое поле, уравнение Лапласа, метод прямых, преобразование Фурье, технология CUDA.*

## PARALLEL IMPLEMENTATION OF THE ALGORITHM CONSIDERING THE INFLUENCE OF ELECTRIC FIELD ON LIQUID CRYSTALS

I. V. Smolekho

Institute of Computational Modeling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
E-mail: ismol@icm.krasn.ru

*The previously developed numerical algorithm, allowing to take into account the influence of electric field on the behavior of liquid crystals, is implemented as a parallel program using the CUDA technology. The test computations were performed.*

*Keywords: liquid crystal, dynamics, electric field, Laplace equation, method of straight lines, Fourier transform, CUDA technology.*

Жидкий кристалл – это фазовое состояние вещества между твердым кристаллом и изотропной жидкостью, в котором при определенном диапазоне температур проявляются одновременно свойства упругости и текучести. Благодаря зависимости от внешних воздействий различной физической природы (механических, тепловых, электрических, магнитных, оптических) жидкие кристаллы нашли широкую область применения. В аэрокосмической технике они используются в дисплеях приборов в качестве средства отображения информации.

Разработана математическая модель нематического жидкого кристалла как акустической микронеоднородной среды с вращающимися частицами [1–4]. В модели учитываются термомеханические и электрические свойства кристаллов. В данной работе представлена численная реализация алгоритма, описывающего поведение жидкого кристалла под действием электрического поля.

Рассматривается слой жидкого кристалла под действием электрического поля, создаваемого зарядами на пластинах-обкладках конденсатора. Во внешней части слоя потенциал  $\varphi$  электрического поля  $E = -\nabla\varphi$  удовлетворяет уравнению Лапласа  $\Delta\varphi = 0$ . Внутри слоя выполняется уравнение, учитывающее анизотро-

пию среды:  $\nabla \cdot (\varepsilon \cdot \nabla\varphi) = 0$ , где  $\varepsilon$  – тензор диэлектрической проницаемости жидкого кристалла, зависящий от ориентации молекул. Решение уравнения Лапласа строится по методу прямых, а решение анизотропного уравнения – с применением итерационного метода.

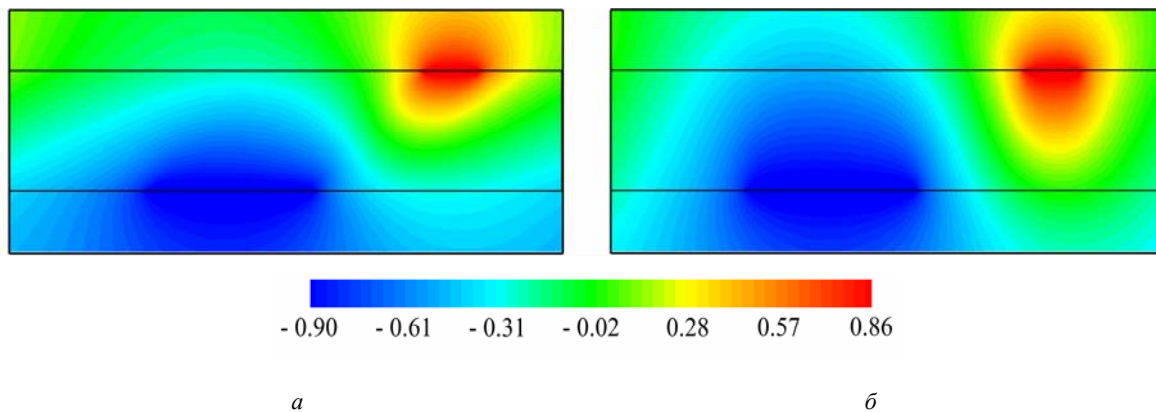
Алгоритм реализован в виде параллельной программы, написанной на языке Си с применением технологии CUDA (см., например, [5]) для вычислительных систем с графическими ускорителями, ориентированных на выполнение программ с большим количеством вычислений благодаря параллельно работающим ядрам.

Расчетная область разбивается на квадратные блоки, содержащие одинаковое число нитей. Команды *dim3 blocks*( $n_1/bs, n_2/bs, 1$ ) и *dim3 threads*( $bs, bs, 1$ ) определяют количество блоков и нитей ( $n_1$  и  $n_2$  – размерности конечно-разностной сетки,  $bs$  – размер блока). Благодаря идентификаторам, имеющимся в CUDA, каждой ячейке сетки ставится в соответствие нить графического устройства. На каждом шаге по времени в параллельном режиме нити выполняют однотипные операции по расчету решения.

Этапы алгоритма выполняются последовательно, распараллеливание вычислений производится внутри каждого из этапов.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-31-00100.





Линии уровня потенциала электрического поля при разных углах поворота молекул жидкого кристалла: (а)  $\theta = \pi/4$ , (б)  $\theta = \pi/2$

В программе содержится 10 ядер, реализующих метод прямых с применением трехточечной прогонки, прямое и обратное преобразование Фурье, метод решения СЛАУ с помощью LU-разложения, а также итерационный метод решения уравнения для потенциала с помощью рекуррентного соотношения. Программа содержит процедуры, которые вызывают ядра в нужной последовательности. В начале работы программы подключаются все необходимые библиотеки и задаются константы, такие как размерность сетки, координаты концов верхней и нижней пластин конденсатора, угол поворота молекул жидкого кристалла и диэлектрические проницаемости. Все эти действия выполняются на CPU. Далее описываются одномерные массивы для искомым и вспомогательных величин (6 на CPU и 25 на GPU), выделяется под них память с помощью функций *malloc* (для CPU) и *cudaMalloc* (для GPU). Затем задаются начальные данные в узлах разностной сетки для неизвестных величин. Необходимые данные и константы копируются в память графического устройства с помощью функций *cudaMemcpy* (для массивов) и *cudaMemcpyToSymbol* (для констант). На графическом устройстве производятся все вычисления, затем результаты копируются обратно на CPU, где формируются файлы с данными. Полученные файлы могут быть представлены графически с помощью программ персонального компьютера. В завершении работы программы память массивов освобождается с использованием функций *free* (для CPU) и *cudaFree* (для GPU).

Для параллельной реализации прямого и обратного преобразований Фурье применяется библиотека *cuFFT* (*Cuda Fast Fourier Transform*). С помощью функций библиотеки *cuSolver* осуществляется метод LU-разложения для решения СЛАУ. Метод прогонки реализуется следующим образом: расчетная область в направлении  $x_1$  разбивается между нитями графического устройства, в параллельном режиме каждая нить выполняет последовательную трехточечную прогонку в направлении  $x_2$ .

На рисунке приведены результаты расчетов, выполненных для жидкого кристалла 5ЦБ размером

200 мкм  $\times$  40 мкм при разных углах поворота молекул. Пластины конденсатора расположены несимметрично. Длина верхней пластины 20 мкм, координата ее левого конца 150 мкм, длина нижней пластины 60 мкм, координата ее левого конца 50 мкм.

Диэлектрические проницаемости в направлении ориентации молекул и в поперечном направлении отличаются в 5 раз:  $\epsilon^\perp = \epsilon^\parallel / 5$ . Горизонтальными линиями показаны границы жидкокристаллического слоя. Размер конечно-разностной сетки внутри слоя 2048 $\times$ 1024 ячеек, вне слоя – по 2048 $\times$ 512 ячеек сверху и снизу.

#### Библиографические ссылки

1. Sadovskaya O. V. Numerical simulation of the dynamics of a liquid crystal in the case of plane strain using GPUs // AIP Conf. Proc. 2014. Vol. 1629. P. 303–310.
2. Смолехо И. В., Садовская О. В. Применение технологии CUDA при численном моделировании поведения жидких кристаллов // Девятая Сибирская конф. по параллельным и высокопроизводительным вычислениям : сб. ст. / под ред. А. В. Старченко. Томск : Изд. дом Томск. гос. ун-та, 2017. С. 13–20.
3. Smolekho I., Sadovskaya O., Sadovskii V. Numerical analysis of acoustic waves in a liquid crystal taking into account couple-stress interaction // CEUR Workshop Proc.: Mathematical and Information Technologies (MIT–2016). 2017. Vol. 1839. P. 473–486.
4. 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 / Ed. by F. dell'Isola, V. A. Eremeyev, A. Porubov. Vol. 87 of Advanced Structured Materials. Cham: Springer, 2018. P. 297–341.
5. Farber R. CUDA Application Design and Development. Amsterdam – Boston – Heidelberg – London – New York – Oxford – Paris – San Diego – San Francisco – Singapore – Sydney – Tokyo: Morgan Kaufmann / Elsevier, 2011. 315 p.

### References

1. Sadovskaya O. V. Numerical simulation of the dynamics of a liquid crystal in the case of plane strain using GPUs. *AIP Conf. Proc.* 2014. Vol. 1629. P. 303–310.
2. Smolekho I. V., Sadovskaya O. V. [Application of CUDA technology for numerical modeling of the behavior of liquid crystals]. *Sbornik statej Devjatoj Sibirskoj konf. po parallel. i vysokoproizv. vychisl.* / Ed. by A. V. Starchenko. Tomsk, TSU Publ., 2017. P. 13–20. (In Russ.)
3. Smolekho I., Sadovskaya O., Sadovskii V. Numerical analysis of acoustic waves in a liquid crystal taking into account couple-stress interaction. *CEUR Workshop Proc.: Mathematical and Information Technologies (MIT–2016)*. 2017. Vol. 1839. P. 473–486.
4. 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* / Ed. by F. dell’Isola, V. A. Eremeyev, A. Porubov. Vol. 87 of *Advanced Structured Materials*. Cham, Springer, 2018. P. 297–341.
5. Farber R. *CUDA Application Design and Development*. Amsterdam – Boston – Heidelberg – London – New York – Oxford – Paris – San Diego – San Francisco – Singapore – Sydney – Tokyo, Morgan Kaufmann / Elsevier, 2011. 315 p.

© Смолехо И. В., 2018

УДК 621.38

## ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРАРАЗМЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВОДОВ, РАБОТАЮЩИХ В КВЧ-ДИАПАЗОНЕ

В. И. Трифанов, О. А. Суханова, Л. И. Оборина, 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 метод и результаты оценки температуразмерных параметров волноводов малого сечения при дилатометрических исследованиях.*

*Ключевые слова: волновод, температуразмерные параметры, КВЧ-диапазон, дилатометр.*

## ESTIMATE THE TEMPERATURE OF THE DIMENSIONAL PARAMETERS OF THE WAVEGUIDES OPERATING IN THE UHF RANGE

V. I. Trifanov, O. A. Sukhanova, L. I. Oborina, 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 method and results of estimating the temperature of small-section waveguide size parameters in dilatometric studies are presented.*

*Keywords: waveguide, the temperature of the dimensional parameters of EHF-range, the dilatometer.*

К волноводам мм-диапазона волн антенно-фидерных устройств (АФУ) предъявляются требования к стабильности температуразмерных параметров [1].

После изготовления волновода сечением  $2,4 \times 1,2$  мм из сплава 32НҚД методом многостороннего деформирования исследовали его температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР). Для этого использовали индуктивный дилатометр DIL-402С фирмы «Netzsch» с программным обеспечением *Windows<sup>TM</sup>*, включающий все необходимое для выполнения измерений и расчета экспериментальных данных.

Калибровка дилатометра осуществлялась корундовым стандартом фирмы «Netzsch» [2]. Измеряемые образцы волновода имели размер  $(25 \pm 0,05)$  мм, толщина стенки 0,8 мм. Измерение температурного коэффициента линейного расширения проводили со скоростью 5 °К/мин в интервале температур 30–160 °С в атмосфере инертного газа для исключения окисления образцов при нагревании.

Образец находится в гомогенной области температурного поля печи. Печь нагревалась и охлаждалась по заданной программе.

Управление температурой печи осуществлялась при помощи термопары. Через толкатель изменение длины образца при нагревании передавалось механически на индуктивный датчик смещения длины и цифровой аналоговый преобразователь.

С цифрового аналогового преобразователя подавался сигнал на компьютер, на котором производилась обработка информации и построение графиков  $\alpha = f(T)$ , где  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения, температура нагревания исследуемого образца, а также графиков относительного линейного удлинения  $dL / L_0 = f(T)$ , где  $L_0$  – начальная длина исследуемого образца,  $dL$  – линейная удлинения.

Было установлено изменение  $\alpha$  в сторону положительных значения, вероятно, связанных с пластической деформацией и релаксацией дефектов кристаллической решетки. В диапазоне 100–140 °С  $\alpha$  изменялся более быстро и достигал значения более  $1,7 \cdot 10^{-6}$  °С. Известно, что ТКЛР сплава 32НҚД в исходном состоянии составляет  $(1 \dots 2) \cdot 10^{-6}$  1/°С в диапазоне от 60 до 100 °С. Изменение  $dL / L_0$  было в пределах  $0,25 \cdot 10^{-3}$ .

На основании приведенных исследований рекомендовано ограничить степень деформации трубы волновода при их изготовлении методом многостороннего деформирования в наиболее рациональных пределах, обеспечивающих требуемый ТКЛР труб волноводов сечением  $2,4 \times 1,2$  мм. Выполненные исследования позволят повысить качество изготовления линий передачи энергии АФУ, работающих в диапазоне 75...110 ГГц.

### Библиографические ссылки

1. Вишнеvский В. В., Фролов С. В., Шахнович И. И. Миллиметровый диапазон как промышленная реальность // Электроника: наука, технология, бизнес. 2010. № 3. С. 70–76.
2. Технологическое обеспечение качества при изготовлении линий передачи энергии антенно-фидерных устройств : монография / И. В. Трифанов, В. И. Трифанов, В. В. Евтушенко / М-во сельск. хоз-ва Рос. Федерации, Краснояр. гос. аграр. ун-т. Красноярск, 2010.
3. О влиянии структурного состояния сплава 32НКД на температурный коэффициент линейного расширения труб волноводов / Л. И. Оборина, В. С. Биронт, И. В. Блохин и др. // Вестник СибГАУ. 2010. № 4. С. 138–141.

### References

1. Vishnevskiy V. V., Frolov S. V., Shakhnovich I. I. [Millimeter range as industrial reality] Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, biznes. 2010. No 3. P. 70–76.
2. Trifanov I. V., Trifanov V. I., Evtushenko V. V. [Technological quality in the production line of energy transfer of antenna-feeder devices] Gos. Agrar. Un-t., 2006.
3. Oborina L. I., Biront V. S., Blokhin I. V. et al. [About the influence of structural state of alloy 32NKD on the temperature coefficient of linear expansion of the pipe waveguides]. Vestnik SibGAU, 2010. No. 4. P. 138–141.

© Трифанов В. И., Суханова О. А.,  
Оборина Л. И., Трифанов И. В., 2018

УДК 621.38

## МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ УСАДКИ ПРИ ОБРАБОТКЕ КАНАЛОВ ВОЛНОВОДОВ ДОРНОВАНИЕМ

В. И. Трифанов, О. А. Суханова, Л. И. Оборина, 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

*Представлена приближенная модель для расчета величины усадки труб круглого сечения при изготовлении волноводов из сплава 32НКД дорнованием.*

*Ключевые слова: канал волновода, обжатие, дорнование, усадка канала.*

## MODEL TO CALCULATE THE MAGNITUDE OF THE SHRINKAGE DURING THE PROCESSING OF CHANNEL WAVEGUIDES BURNISHING

V. I. Trifanov, O. A. Sukhanova, L. I. Oborina, 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

*Presents an approximate model to calculate the magnitude of the shrinkage of tubes in the manufacture of waveguides alloy 32NKD burnishing.*

*Keywords: channel waveguide, compression, burnishing, shrinkage of the channel.*

Изготовление труб волноводов КВЧ-диапазона требует разработки методов расчета технологических параметров с учетом обеспечения требуемого качества [1].

Для изготовления канала малого сечения с точностью  $\pm 0,01$  мм и шероховатостью поверхности Ra 0,2–0,16 мкм может применяться дорнование специальными дорнами.

Величина усадки отверстия после дорнования зависит от величины обжатия стенки и диаметра заготовки, а также от отношения  $\sigma_m / E$ . Установлено, чем больше  $\sigma_m / E$ , тем выше усадка, что подтверждается полученными экспериментальными зависимостями. Величина усадки:

$$H = f(a, \sigma_m / E, d), \quad (1)$$

где  $H$  – величина усадки канала,  $a$  – величина обжатия стенки канала трубчатой заготовки,  $\sigma_m / E$  – отношение предела текучести материала к модулю упругости материала трубчатой заготовки.

Для расчета величины усадки при проведении экспериментов и изучении процесса дорнования труб волноводов из сплава 32НКД в качестве регрессионной модели было получено соотношение [2]:

$$H = b_0 + b_1 d + b_2 (\sigma_m / E) + b_3 a + b_4 d^2 + b_5 d (\sigma_m / E) + b_6 d a + b_7 (\sigma_m / E)^2 + b_8 (\sigma_m / E) + b_9 a^2. \quad (2)$$

После применения пакета статистического анализа были определены значимые члены выражения (2)

$$H = b_4 d^2 + b_7 (\sigma_m / E)^2 + b_9 a^2. \quad (3)$$

С учетом полученных величин соответствующих коэффициентов выражение (3) может быть представлено в виде зависимости:

$$H = 0,012d^2 + 4,1(\sigma_m / E)^2 - 0,089a^2. \quad (4)$$

Выражение (4) позволяет оценить величину возможной усадки при изготовлении тонкостенных труб волноводов КВЧ-диапазона круглого сечения.

### Библиографические ссылки

1. Мальцев П. Н., Шахнович И. В. СВЧ-технология – основа электроники будущего/ Электроника: Наука, технология, бизнес. 2015. № 8. С. 72–82.
2. Трифанов И. В., Стерехов И. В. Исследования технологических параметров при изготовлении труб волноводов малого диаметра // Вестник СибГАУ. 2008. Вып. 2 (19). С. 160–163.

### References

1. Mal'tsev P. N., Shakhnovich I. V. [Microwave technology – the basis of electronics of the future] (In Russ.) *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, biznes*, 2015 No 8. P. 72–82.
2. Trifanov I. V., Sterekhov I. V. [Research of technological parameters in the manufacture of pipes of small diameter waveguide] *Vestnik SibGAU*, 2008. Vol. 2 (19). P. 160–163.

© Трифанов В. И., Суханова О. А.,  
Оборина Л. И., Трифанов И. В., 2018

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРЕЩИНОВАТЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ СО СЛОИСТОЙ И БЛОЧНОЙ СТРУКТУРОЙ\***

Е. П. Ченцов

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
E-mail: chencov.evg@gmail.com

*Исследуется процесс распространения трещин в материале, состоящем из упругих блоков, разделенных трещиноватыми прослойками. Разработанная модель позволяет описывать процессы деформации в композитных материалах с учетом структурных повреждений.*

*Ключевые слова: композитный материал, блочная среда, образование трещин, распространение волн.*

**MODELLING OF WAVES PROPAGATION PROCESS IN FRACTURED COMPOSITE MATERIALS WITH LAYERED AND BLOCKY STRUCTURE**

E. P. Chentsov

Institute of Computational Modeling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
E-mail: chencov.evg@gmail.com

*A process of cracks propagation in material consisting of elastic blocks, divided by fractured elastic interlayers, is under investigation. Developed model can be applied to describe strain processes in composite materials taking into account structural defects.*

*Keywords: composite material, blocky medium, cracks formation, waves propagation.*

Анализ процесса распространения трещин в многофазных материалах при динамических нагрузках представляет большой практический интерес в аэрокосмической отрасли. Прочностные характеристики композитов, широко используемых при производстве летательных аппаратов, могут значительно изменяться при появлении трещин между слоями или блоками материала [1]. Данная работа посвящена моделированию волновых процессов и распространения трещин в подобных средах.

Рассмотрим деформирование матричного композита, состоящего из прямоугольных упругих блоков размером  $h_1$  и  $h_2$  и упругих прослоек с толщиной  $\delta_1$  и  $\delta_2$ . Стороны блоков параллельны осям  $x_1$  и  $x_2$ . Движение каждого блока в такой среде описывается системой уравнений однородной изотропной упругой среды:

$$\begin{aligned} \rho \dot{v}_1 &= \sigma_{11,1} + \sigma_{12,2}, & \dot{\sigma}_{11} &= \rho c_1^2 (v_{1,1} + v_{2,2}) - 2\rho c_2^2 v_{2,2}, \\ \rho \dot{v}_2 &= \sigma_{12,1} + \sigma_{22,2}, & \dot{\sigma}_{22} &= \rho c_1^2 (v_{1,1} + v_{2,2}) - 2\rho c_2^2 v_{1,1}, \\ \dot{\sigma}_{12} &= \rho c_2^2 (v_{2,1} + v_{1,2}). \end{aligned}$$

Здесь  $\rho$  – плотность материала блоков,  $c_1$  и  $c_2$  – скорости продольных и поперечных упругих волн. Система записана относительно компонент тензора напряжений  $\sigma_{jk}$  и проекций вектора скорости  $v_k$ . Точка

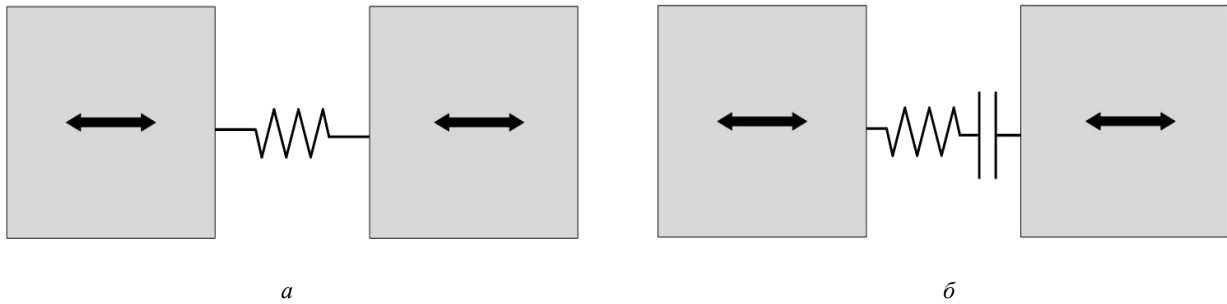
над символом означает дифференцирование по времени.

Как правило, материал прослоек является более податливым, чем материал блока. В связи с этим предложен подход, в котором появление трещин отрыва и их рост моделируется не в блоках, а в межблочном пространстве. Рассмотрим деформирование такой системы в направлении  $x_1$ . Если текущее значение деформации ниже некоторого критического значения  $\varepsilon_c$ , то прослойка считается упругой и описывается с помощью системы обыкновенных дифференциальных уравнений [2]:

$$\begin{aligned} \rho' \frac{\dot{v}_1^+ + \dot{v}_1^-}{2} &= \frac{\sigma_{11}^+ - \sigma_{11}^-}{\delta_1}, & \frac{\dot{\sigma}_{11}^+ + \dot{\sigma}_{11}^-}{2} &= \rho' c_1'^2 \frac{v_1^+ - v_1^-}{\delta_1}, \\ \rho' \frac{\dot{v}_2^+ + \dot{v}_2^-}{2} &= \frac{\sigma_{12}^+ - \sigma_{12}^-}{\delta_1}, & \frac{\dot{\sigma}_{12}^+ + \dot{\sigma}_{12}^-}{2} &= \rho' c_2'^2 \frac{v_2^+ - v_2^-}{\delta_1}. \end{aligned}$$

Здесь знаки “+” и “-” относятся к границам соседних блоков;  $\rho'$ ,  $c_1'$ ,  $c_2'$  – плотность материала прослойки и скорости распространения продольных и поперечных волн, соответственно. Взаимодействие блоков также может быть представлено с помощью реологической модели (см. рисунок, а).

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (номер проекта 18-31-00100).



Реологические схемы взаимодействия блоков:

$a - \varepsilon_1 < \varepsilon_c$ ;  $b - \varepsilon_1 \geq \varepsilon_c$

Если деформация достигает критического уровня деформации  $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_c$ , возникает трещина, а взаимодействие блоков описывается с помощью реологической схемы с упругой пружиной и жестким контактом (см. рисунок, б). Жесткий контакт является неклассическим реологическим элементом и используется для описания сред, по-разному сопротивляющихся растяжению и сжатию [3]. При растяжении деформация системы растет без роста напряжения. При сжатии контакты замыкаются, и поведение прослойки снова становится упругим. Определяющие уравнения для прослойки указывают на нелинейную природу взаимодействия блоков и записывается в виде

$$\rho' \frac{\dot{v}_1^+ + \dot{v}_1^-}{2} = \frac{\sigma_{11}^+ - \sigma_{11}^-}{\delta},$$

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{v_1^+ - v_1^-}{\delta}, \quad \frac{\sigma_{11}^+ + \sigma_{11}^-}{2} = \rho' c_1'^2 \pi(\varepsilon_1),$$

где  $\pi(\varepsilon_1)$  – проектор на неположительную полуось.

Для численного решения поставленной задачи с заданными начальными данными и граничными условиями разработаны вычислительные алгоритмы, основанные на двуциклическом расщеплении по пространственным элементам. Двуциклическое расщепление подразумевает четыре последовательно выполняемых этапа, на каждом из которых происходит решение одномерных систем. Для уравнений в блоках применяется схема распада разрыва С. К. Годунова с равномерной сеткой и максимально возможным шагом по времени, определяемым критерием Куранта–Фридрихса–Леви. При численной реализации уравнений прослойка предложен вычислительный алгоритм, основанный на подходе Г. В. Иванова [4]. Главной особенностью схемы является возможность предварительного задания искусственной диссипации энергии. Схема для упругих прослоек представлена в [1]; в случае наличия трещины к аппроксимации определяющих уравнений добавляются соотношения на характеристиках системы и замыкающее уравнение на скорости:

$$z_1 v_1^+ + \sigma_{11}^+ = R^+,$$

$$z_1 v_1^- - \sigma_{11}^- = S^-,$$

$$\hat{v}_1 + v_1 = v_1^+ + v_1^-.$$

Здесь  $z_1 = \rho c_1$  – акустический импеданс среды, а инварианты Римана  $R^+$  и  $S^-$  берутся из приграничных ячеек взаимодействующих блоков на предыду-

щем временном слое. Показано, что для предложенной численной схемы выполняется закон сохранения энергии в дискретном виде.

В целях программной реализации предложенных алгоритмов разработан программный комплекс, позволяющий моделировать волновые процессы в двумерной блочной среде из упругих блоков и трещиноватых упругих прослоек [5]. Программное обеспечение написано на языке Fortran-90 с использованием библиотеки MPI. Параллельная организация расчетов основана на принципе декомпозиции области, где каждый процесс осуществляет вычисления в горизонтальном слое. Полученные результаты указывают на значимое влияние трещин на поведение среды при динамических воздействиях.

#### Библиографические ссылки

1. Damage in composite laminates: Effects of transverse cracks / С. Т. Herakovich, J. Aboudi, S. W. Lee и др. // *Mechanics of materials*. 1988. Vol. 7 (2). P. 91–107.
2. Sadovskii V. M., Sadovskaya O. V. Modeling of elastic waves in a blocky medium based on equations of the Cosserat continuum // *Wave motion*. 2015. Vol. 52. P. 138–150.
3. Sadovskaya O., Sadovskii V. *Mathematical Modeling in Mechanics of Granular Materials*. Advanced Structured Materials, Vol. 21. Heidelberg-New York-Dordrecht-London: Springer, 2012. 392 p.
4. Численное решение динамических задач упругопластического деформирования твердых тел / Г. В. Иванов, Ю. М. Волчков, И. О. Богульский и др. Новосибирск : Сиб. универс. изд-во, 2002. 352 с.
5. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2016615178. Программный комплекс для численного моделирования динамических процессов в многоблочных средах на кластерных системах (2Dyn\_Blocks\_MPI) / Садовский В. М., Садовская О. В., Ченцов Е. П. Заявка №2016612621. Дата поступления 24 марта 2016. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 17 мая 2016.

#### References

1. Herakovich C. T., Aboudi J., Lee S. W., Strauss E. A. *Damage in composite laminates: Effects of transverse cracks*. *Mechanics of materials*. 1988. Vol. 7 (2). P. 91–107.

2. Sadovskii V. M., Sadovskaya O. V. Modeling of elastic waves in a blocky medium based on equations of the Cosserat continuum. *Wave motion*. 2015. Vol. 52. P. 138–150.

3. Sadovskaya O., Sadovskii V. Mathematical Modeling in Mechanics of Granular Materials. *Advanced Structured Materials*, Vol. 21. Heidelberg–New York–Dordrecht–London, Springer, 2012. 392 p.

4. Ivanov G. V., Volchkov Yu. M., Bogul'skiy I. O. et al. *Chislennoe reshenie dinamicheskikh zadach uprugoplasticheskogo deformirovaniya tverdykh tel* [Numerical Solution of Dynamical Problems of Viscoelastic

Deformation of Solids]. Novosibirsk, Sib. Univ. Izdat., 2002. 352 p. (In Russ.)

5. Sadovskii V. M., Sadovskaya O. V., Chentsov E. P. Certificate of state registration of the computer program no. 2016615178. *Programmnyy kompleks dlya chislennogo modelirovaniya dinamicheskikh protsessov v mnogoblochnykh sredakh na klasternykh sistemakh* [Parallel software for the numerical modelling of dynamic processes in blocky media designed for supercomputers (2Dyn\_Blocks\_MPI)]. Request no. 201661262. Receipt date 24.03.2016. Registered 17.05.2016. (In Russ.)

© Ченцов Е. П., 2018



## О ВЫСШИХ СИММЕТРИЯХ УРАВНЕНИЯ МУТАРА

Ю. В. Шанько

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
 Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
 E-mail: shy70@mail.ru

*Рассматриваются линейные высшие симметрии для уравнения Мутара.*

*Ключевые слова: уравнение Мутара, высшие симметрии.*

## ON HIGHER SYMMETRIES OF MOUTARD EQUATION

Yu. V. Shan'ko

Institute of Computational Modeling SB RAS  
 50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
 E-mail: shy70@mail.ru

*Linear higher symmetries for Moutard equation are studied in this paper.*

*Keywords: Moutard equation, higher symmetries.*

В работе исследуются высшие симметрии (также известные как обобщенные симметрии или симметрии Ли–Беклунда) [1] уравнения Мутара

$$v_{xy} = u(x, y)v. \quad (1)$$

Нелинейное вида уравнение

$$w_{tt} = (f(w)w_x)_x, \quad (2)$$

где  $f$  – заданная гладкая функция, возникает в ряде задач механики сплошной среды (см. [2] и цитированную там литературу). С помощью преобразования годографа уравнение (2) может быть сведено к уравнению вида (1):

$$v_{xy} = u(x - y)v. \quad (3)$$

В работе [3] изучаются так называемые почти коммутирующие дифференциальные операторы. Такие операторы связаны с интегрируемыми уравнениями математической физики.

Оказывается, что условие почти коммутирования линейного дифференциального оператора  $L$  с оператором Мутара

$$-\partial_x \partial_y + u(x, y)$$

эквивалентно тому, что уравнение (1) обладает симметрией вида

$$L(v)\partial_v. \quad (4)$$

В дальнейшем будем рассматривать только линейные симметрии вида (4) для уравнения (3).

Уравнение (3) для любой функции  $u$  допускает симметрию второго порядка

$$X_0 = (v_{xx} + v_{yy} + 2uv)\partial_v.$$

Доказано, что (3) обладает другими симметриями второго порядка только в том случае, когда  $u$  удовлетворяет уравнению

$$6u^2 u_x U_{xx}^2 + 30u^4 U U_x U_{xx} + 3uu_x^2 U_x U_{xx} - 50u^4 U_x^3 + 45u^3 u_x U U_x^2 - 9u_x^3 U_x^2 = 0, \quad (5)$$

где

$$U = (uu_{xx} - u_x^2) / u^3.$$

В качестве примера рассмотрим функцию  $u(x-y)$ , которая удовлетворяет уравнению (5):

$$u(x-y) = \frac{c_1 \exp(2x-2y) + c_2 (\exp(3x-3y) - \exp(x-y))}{(\exp(2x-2y) + 1)^2},$$

здесь  $c_1$  и  $c_2$  – некоторые константы. В этом случае уравнение (3) допускает еще два оператора второго порядка:

$$\begin{aligned} X_1 &= (\exp(2x)(v_{xx} + v_x) - \exp(2y)(v_{yy} - v_y) + \\ &\quad + \exp(2x+2y)g(x, y)v)\partial_v, \\ X_2 &= (\exp(-2x)(v_{xx} - v_x) - \\ &\quad - \exp(-2y)(v_{yy} - v_y) - g(x, y)v)\partial_v, \end{aligned}$$

где

$$g(x, y) = \frac{c_1(\exp(2x) - \exp(2y)) - 4c_2 \exp(2x+2y)}{(\exp(2x) + \exp(2y))^2}.$$

## Библиографические ссылки

1. Олвер П. Приложения групп Ли к дифференциальным уравнениям. М.: Мир, 1989.
2. Ames W. F., Lohner R. J., Adams E. Group properties of  $u_{tt} = [f(u)u_x]_x$  // International Journal of Non-Linear Mechanics. 1981. Vol. 16, No. 5–6. P. 439–447.

3. Царев С. П., Степаненко В. А. О тройках почти коммутирующих дифференциальных операторов в частных производных // Сибирские электронные математические известия. 2017. Т. 14. С. 1050–1063.

#### References

1. Olver P. J. Applications of Lie groups to differential equations. Springer Science & Business Media, 2000.

2. Ames W. F., Lohner R. J., Adams E. Group properties of  $u_{tt} = [f(u)u_x]_x$ . *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 1981, Vol. 16, No 5–6. P. 439–447.

3. Tsarev S. P., Stepanenko V. A. [On weakly commutative triples of partial differential operators]. *Siberian Electronic Mathematical Reports*. 2017. Vol. 14. P. 1050–1063 (Russian, English abstract).

© Шанько Ю. В., 2018

УДК 533.2

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ С ПОМОЩЬЮ КОМБИНАЦИИ ПОЛУЛАГРАНЖЕВОГО МЕТОДА И МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

М. В. Якубович

Институт вычислительного моделирования СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44  
E-mail: yakubovich@icm.krasn.ru

*Рассмотрена модель течения многокомпонентной газовой смеси, основанная на системе уравнений Навье–Стокса. Численное моделирование обтекания летательного аппарата газом является важным этапом при проектировании формы аппарата.*

*Ключевые слова: многокомпонентная газовая смесь, уравнения Навье–Стокса, полулагранжевый метод, метод конечных элементов.*

## MODELLING OF MOTION OF MULTICOMPONENT GAS MIXTURE BY THE COMBINATION OF SEMI-LAGRANGIAN ALGORITHM AND FINITE ELEMENT METHOD

M. V. Yakubovich

Institute of Computational Modeling SB RAS  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
E-mail: yakubovich@icm.krasn.ru

*We consider the model of motion of multicomponent gas mixture. To find numerical solution of Navier–Stokes equations, we use the combination of semi-Lagrangian algorithm and finite element method. Modelling of gas motion around aircraft is important part of aircraft shape development.*

*Keywords: multicomponent gas mixture, Navier–Stokes equations, semi-Lagrangian method, finite element method.*

При моделировании течений газовых смесей необходимо учитывать процессы переноса, связанные с диффузией компонент смеси. Различие в диффузионных характеристиках отдельных компонент может привести к разнообразным эффектам. Учет многокомпонентности газовой смеси является одним из важных вопросов в задачах сверхзвукового обтекания тел. Диффузионные процессы могут приводить к дополнительному переносу тепла к поверхности обтекаемого тела, поэтому корректное представление параметров диффузии имеет большое значение. Адекватное и детальное описание процессов, возникающих при движении газовых сред, необходимо и для широкого класса внутренних задач.

В настоящей работе рассматривается модель течения многокомпонентной газовой смеси. Модель построена на основе полных уравнений Навье–Стокса для смеси не реагирующих газов в диффузионном приближении при отсутствии массовых сил

$$\frac{d\rho_i}{dt} + \rho_i \nabla \mathbf{v} = -\nabla \mathbf{J}_i, \quad (1)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \nabla \Pi_{ij}, \quad (2)$$

$$\rho \frac{de}{dt} = -P \nabla \mathbf{v} - \nabla \mathbf{q} + \Phi, \quad (3)$$

$$P = \rho RT \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{m_i}, \quad \mathbf{J}_i = \rho c_i \mathbf{w}_i, \quad c_i = \frac{\rho_i}{\rho}, \quad \rho = \sum_{i=1}^N \rho_i. \quad (4)$$

Здесь  $\rho$  – плотность смеси;  $\rho_i$  – приведенная плотность  $i$ -й компоненты;  $\mathbf{v}$  – скорость центра масс смеси;  $c_i$  – массовая концентрация  $i$ -й компоненты;  $\mathbf{w}_i$  – скорость диффузии  $i$ -й компоненты;  $\mathbf{J}_i$  – диффузионный поток  $i$ -й компоненты;  $P$  – давление;  $\Pi_{ij}$  – тензор напряжений;  $e$  – внутренняя энергия;  $\mathbf{q}$  – тепловой поток;  $\Phi$  – диссипативная функция;  $T$  – температура;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $m_i$  – молярная масса  $i$ -й компоненты. Диффузионные потоки компонент газа и коэффициенты переноса (вязкости, теплопроводности, диффузии) вычисляются на основе методов кинетической теории газов [1–3].

Для решения системы уравнений (1)–(4) разработан численный алгоритм, основанный на комбинации полу-Лагранжевого метода и метода конечных элементов. В уравнении (3) производится замена искомой функций, которая переводит закон сохранения полной энергии из терминов пространства  $L_1$  в термины гильбертова пространство  $L_2$ . Для аппроксимации производных по времени в уравнениях (1)–(3) используется полу-Лагранжевый метод.

Дискретизация по пространству остальных слагаемых уравнений Навье–Стокса на каждом временном слое осуществляется методом конечных элементов с кусочно-билинейными базисными функциями и применением простых квадратурных формул. Для решения полученных систем алгебраических уравнений используется блочный метод Якоби с улуч-

шенным начальным приближением внутри внешних итераций по нелинейности [4; 5].

В заключение отметим, что предложенная система уравнений, моделирующая течение многокомпонентной газовой смеси, а также комбинация полу-Лагранжевой аппроксимации и метода конечных элементов позволяют правильно учесть связи между диффузионными потоками и определить распределение концентраций компонент смеси. Полученная разностная схема имеет первый порядок точности по времени и пространству и является довольно эффективной с вычислительной точки зрения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта: «Численное моделирование формирования квазиустойчивых фигур, образованных многокомпонентной газовой смесью, вытекающей из промышленной дымовой трубы».

#### Библиографические ссылки

1. Лапин Ю. В., Стрелец М. Х. Внутренние течения газовых смесей. М. : Наука, 1989. 368 с.
2. Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М. : Иностран. лит., 1961. 928 с.
3. Ферцигер Дж., Капер Г. Математическая теория процессов переноса в газах. М. : Мир, 1976. 555 с.

4. A semi-Lagrangian approximation in the Navier-Stokes equations for the gas flow around a wedge/ Shaydurov V., Liu T., Shchepanovskaya G., Yakubovich M. // *AIP Conference Proceedings*. 2015. Vol. 1684. P. 090011-1–090011-11.

5. Shaydurov V., Vyatkin A., Kuchunova E., Semi-Lagrangian difference approximations with different stability requirements // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Model.* 2018. Vol. 33 (2). P. 123–135.

#### References

1. Lapin Yu. V., Strelets M. Kh. *Vnutrennie techeniya gazovykh smesey* [Internal flows of gas mixtures]. M.: Nauka, 1989. 368 p.

2. Girshfel'der Dzh., Kertiss Ch., Berd R. *Molekulyarnaya teoriya gazov i zhidkostey* [Molecular theory of gases and liquids]. M.: IL, 1961. 928 p.

3. Fertsiger Dzh., Kaper G. *Matematicheskaya teoriya protsessov perenosa v gazakh* [Mathematical theory of transport processes in gases]. M.: Mir, 1976. 555 p.

4. A semi-Lagrangian approximation in the Navier-Stokes equations for the gas flow around a wedge / Shaydurov V., Liu T., Shchepanovskaya G., Yakubovich M. // *AIP Conference Proceedings*. 2015. Vol. 1684. P. 090011-1–090011-11.

5. Shaydurov V., Vyatkin A., Kuchunova E. Semi-Lagrangian difference approximations with different stability requirements // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Model.* 2018. Vol. 33 (2). P. 123–135.



**Секция**  
**«ХИМИЯ**  
**И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ»**

## О СТРОЕНИИ ПРОДУКТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ 3-(ГИДРОКСИМИНО)ПЕНТАН-2,4-ДИОНА И 1-НАФТИЛАМИНА

А. С. Ашихин, Е. С. Семиченко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: imidazol5@yandex.ru

*Методом ЯМР  $^1\text{H}$  спектроскопии установлено строение нового основания Шиффа из 3-(гидрокси-мино)пентан-2,4-диона и 1-нафтиламина.*

*Ключевые слова: 3-(гидроксимино)пентан-2,4-дион, ЯМР  $^1\text{H}$  спектроскопия.*

## ON THE STRUCTURE OF THE REACTION PRODUCT OF 3-(HYDROXIMINO)PENTANE-2,4-DIONE AND 1-NAPHTHYLAMINE

A. S. Ashikhin, E. S. Semichenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: imidazol5@yandex.ru

*In this paper we present data on the synthesis of new Schiff bases are presented. Structure determination of product from the reaction of 3-(hydroxyimino)pentane-2,4-dione with 1-naphthylamine is based on NMR  $^1\text{H}$  spectroscopy.*

*Keywords: 3-(hydroxyimino)pentane-2,4-dione, NMR  $^1\text{H}$  spectroscopy.*

Известно, что 3-гидроксимино-1,2-дикетоны и 2-гидроксимино-3-оксобутаналь образуют основания Шиффа с анилинами, алифатическими и гетероциклическими аминами [1].

Основания Шиффа, полученные из 1,3-дикарбонильных соединений применялись в циклизациях, приводящих к бензохинолинам [2]. Для синтеза замещенных имидазолов использовали основания Шиффа, синтезированные из 2-гидроксимино-3-оксобутанала [3].

Однако в настоящее время отсутствуют литературные данные об основаниях Шиффа из аминов нафталинового ряда и 3-(гидроксимино)пентан-2,4-диона. Цель настоящей работы – установление строения нового основания Шиффа (1), полученного из 1-нафтиламина и 2-гидроксимино-3-оксобутанала методом ЯМР  $^1\text{H}$  спектроскопии.

Синтез основания Шиффа (1) осуществили, прикапывая к водному раствору 3-(гидроксимино)пентан-2,4-диона эквимолярное количество спиртового раствора 1-нафтиламина (рис. 1).

Для основания Шиффа (1) можно предположить наличие в растворе как нескольких гидроксиминно-енаминных форм, так и нескольких нитрозо-иминной форм, а также енольной формы (рис. 2,  $\text{R}^1 = \text{Me}$ ,  $\text{R} = 1\text{-нафтил}$ ). Ранее было показано, что основания Шиффа, полученные из 2-гидроксимино-3-оксобутанала (рис. 2,  $\text{R}^1 = \text{H}$ ) и алифатических аминов находятся в  $\text{CDCl}_3$  в нитрозо-енаминной форме, тогда как замена алкильного заместителя на арильный у атома азота приводит к преобладанию гидроксиминно-иминной формы [4].

В ряду оснований Шиффа, полученных из 3-(гидроксимино)пентан-2,4-диона было показано [5], что в  $\text{CDCl}_3$  основание Шиффа с изопропильным заместителем находится преимущественно в гидроксиминно-иминной форме, тогда как при наличии циклогексильного заместителя осуществляется равновесие между нитрозо-енаминной формы и гидроксиминно-иминными формами, обмен между которыми очень быстрый в шкале времени ЯМР.

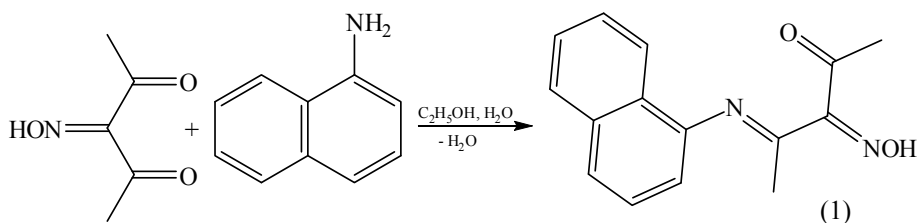


Рис. 1. Получение основания Шиффа (1)

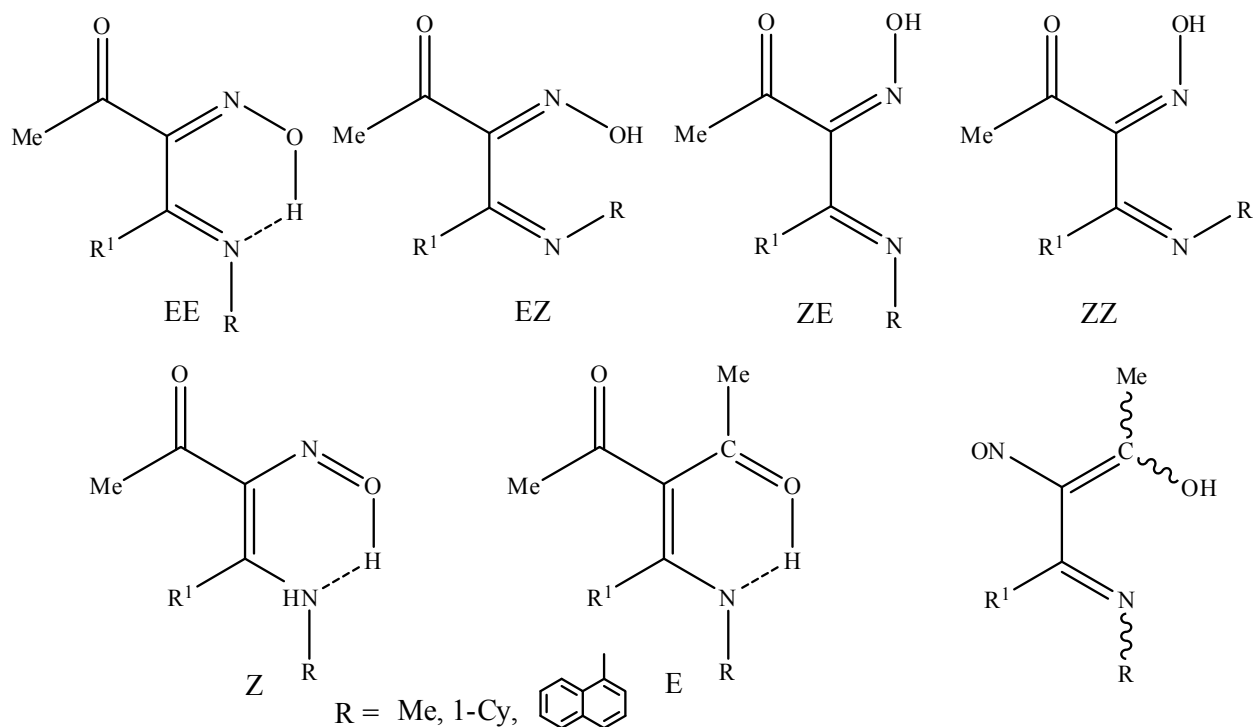


Рис. 2. Возможные изомеры и таутомеры оснований Шиффа

Строение 3-(гидроксимино)-4-(нафталин-1-имино)пентан-2-она (1) подтверждено данными ЯМР  $^1\text{H}$  и электронной спектроскопии.

В ЯМР  $^1\text{H}$  спектре ( $\text{CDCl}_3$ ) соединения (1) уширенный синглет с химическим сдвигом 17,58 м. д., отнесен к сигналу протона гидроксиминной группы, который обменивает своё химическое окружение и связан водородными связями, что согласуется с данными для оснований Шиффа, полученных из 2-гидроксимино-2,4-пентандиона и изопропиламина, или циклогексиламина [6]. Расщепление сигнала протона на 17,58 м. д., которое могло бы быть при наличии нитрозо-енаминных форм, отсутствует. Поскольку это расщепление могло быть замаскировано обменом протона, дополнительная информация получена из электронного спектра соединения (1). Отсутствие в электронном спектре соединения (1) в хлороформе пика поглощения  $n, \pi^*$  перехода в области 500–650 нм, характерного для нитрозогруппы [7], свидетельствует об отсутствии таутомерных форм, содержащих нитрозогруппу.

Отнесение сигналов протонов нафтильного заместителя и метильных групп сделано на основании расщепления и химического сдвига – 7,93 м. д. (д,  $\text{H}^8$ ); 7,79 м. д. (д,  $\text{H}^5$ ); 7,74 м. д. (д,  $\text{H}^4$ ); 7,58–7,55 м. д. (м,  $\text{H}^7, \text{H}^6$ ); 6,99 м. д. (д,  $\text{H}^2$ ). Протоны метильного заместителя у карбонильной группы соединения (1) дают сигнал в виде синглета с химическим сдвигом 2,62 м. д., тогда как протоны метила у иминной группы – синглет на 2,25 м. д.

3-(Гидроксимино)-4-(нафталин-1-имино)пентан-2-он. К раствору 1 г (7,8 ммоль) 3-(гидроксимино)пентан-2,4-диона в 5 мл воды прибавляли по каплям 1,11 г

(7,8 ммоль) 1-нафтиламина в 4 мл метанола. Смесь перемешивали 124 ч. Отфильтровали осадок, промыли 2,5 мл этанола. Выход 1,6 г (81 %), белый порошок,  $T_{\text{пл}}$  204–205 °С. Электронный спектр ( $\text{CHCl}_3$ ,  $\lambda$  макс. нм ( $\epsilon$ )): в области 500–700 нм – отсутствует пик поглощения. Спектр ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $\text{CDCl}_3$ ,  $\delta$ , м. д.: 2,25 с (3H,  $\text{CH}_3$ ); 2,62 с (3H,  $\text{CH}_3$ ); 6,99–7,93 м ( $\text{H}$ ,  $\text{H}_{\text{ар}}$ ); 17,58 с (1H,  $\text{NOH}$ ).

Спектры ЯМР  $^1\text{H}$  регистрировали на приборе Bruker Avance III 600 Красноярского регионального центра коллективного пользования СО РАН.

#### Библиографические ссылки

1. Семиченко Е. С., Субоч Г. А., Товбис М. С. Нитрозопроизводные азотсодержащих гетероциклических соединений : монография / Сиб. гос. технологич. ун-т. Красноярск, 2014. 168 с.
2. Johnson W. S., Woroch E., Mathews F. J. // J. Am. Chem. Soc. 1947. Vol. 69, № 3. P. 566–571.
3. Veronese A. C., Cavicchioni G., Servadio G., Vecchiati G. // J. Heterocycl. Chem. Vol. 17, № 8. P. 1723–1725.
4. Ярофеева А. А. [и др.] // ЖОрХ. 2017. Т. 53, № 1. С. 9–13.
5. Косицына А. С. [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. 2011. Т. 4, № 3. С. 307–315.
6. Косицына А. С. [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. 2011. Т. 4, № 3. С. 307–315.
7. Veronese A. C., Scrimin P., Bergamini P., Gambaro A. // J. Chem. Soc. Perkin Trans I. 1982, No. 4. P. 1013–1018.

**References**

1. Semichenko E. S., Suboch G. A., Tovbis M. S. Nitrozoproizvodnyye azotsoderzhashchikh geterotsiklicheskih soyedineniy : monografiya / SibGTU. Krasnoyarsk, 2014. 168 p.
2. Johnson W. S., Woroch E., Mathews F. J. // J. Am. Chem. Soc. 1947. Vol. 69, No. 3. P. 566–571.
3. Veronese A. C., Cavicchioni G., Servadio G., Vecchiati G. // J. Heterocycl. Chem. Vol. 17, No. 8. P. 1723–1725.
4. Yarofeyeva A. A. [et al.] // ZHOrKH. 2017. T. 53, No. 1. P. 9–13.
5. Kositsyna A. S. [et al.] // ZHurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. KHimiya. 2011. T. 4, No. 3. P. 307–315.
6. Kositsyna A. S. [et al.] // ZHurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. KHimiya. 2011. T. 4, № 3. P. 307–315.
7. Veronese A. C., Scrimin P., Bergamini P., Gambaro A. // J. Chem. Soc. Perkin Trans I. 1982, No. 4. P. 1013–1018.

© Ашихин А. С., Семиченко Е. С., 2018



УДК 547.551.54+665.7.038.3

**ИЗУЧЕНИЕ НОВОЙ АНТИДЕТОНАЦИОННОЙ ПРИСАДКИ**

Д. О. Вигуль, А. С. Косицына, Г. А. Субоч, 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: beknman@gmail.com

*Рассмотрено влияние новой антидетонационной присадки для автомобильного бензина. Установлено, что 2,6-диметил-N,N-диэтил-4-нитрозоанилин незначительно повышает октановое число бензина.*

*Ключевые слова: бензин, октановое число, присадки, 2,6-диметил-N,N-диэтил-4-нитрозоанилин.*

**STUDY OF A NEW ANTIDETONATION ADDITIVE**

D. O. Vigul, A. S. Kositsyna, G. A. Suboch, M. S. Tovbis

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

*The work considers the influence of new anti-knock additive for gasoline. A slight increase in the octane number of gasoline by 2,6-dimethyl-N,N-diethyl-4-nitrosoaniline addition was observed.*

*Keywords: gasoline, octane number, additives, 2,6-dimethyl-N,N-diethyl-4-nitrosoaniline.*

Важнейшим, экономически выгодным способом улучшения эксплуатационных свойств автобензина является применение присадок. Для предотвращения взрывного разложения продуктов предпламенного окисления топлив, происходящего до начала нормального горения топливной смеси, применяют октаноповышающие добавки [1]. При сравнении компонентного состава выпускаемых российских бензинов (табл. 1) и антидетонационных свойств основных компонентов, отмечается необходимость повышения октанового числа (ОЧ) товарных бензинов для достижения ими европейского уровня качества [2].

Показатели эффективности антидетонаторов – прирост октановых чисел при введении их в бензины, определяемый моторным или исследовательским методами на специальных установках путём сравнения

характеристик горения испытуемого топлива и эталонных смесей изооктана с н-гептаном.

Ассортимент антидетонаторов состоит из различных органических и металлорганических соединений. Среди них, отдельной группой выделяют присадки на базе ароматических аминов. Достоинством аминов является то, что они хорошо совмещаются с антидетонаторами других типов, а также с оксигенатами; при этом нередко наблюдается синергизм.

В качестве октаноповышающего компонента, для изучения был выбран 2,6-диметил-N,N-диэтил-4-нитрозоанилин – ярко-зеленое кристаллическое вещество, которое прежде не испытывалось как антидетонационная присадка для АБ. В качестве испытуемого топлива был взят самый популярный на сегодняшний день в России автомобильный бензин марки АИ-92 (сеть АЗС «25 часов»).

Таблица 1

**Таблица антидетонационных свойств важнейших компонентов автобензина**

Компонент	ОЧ моторный метод	ОЧ исследовательский метод
Прямогонный бензин	42–72	47–75
Бензин каталитического риформинга:		
а) мягкого режима	а) 70–79	а) 74–87
б) жесткого режима	б) 81–85	б) 90–10
Бензин каталитического крекинга	72–80	84–92
Бензин гидрокрекинга	71	75
Высшие арены	100	–
Бензол	100–108	108–113
Толуол	100–104	105–109
Алкилат	90–92	–
Изопентан	86–90	–
Изогексаны	70	–
н-Пентан	61	–
Ксилолы	98–100	100–105

Значения октанового числа для бензинов без присадок и с новой присадкой

	Бензин	Значение ОЧ
1	АИ-92	91,7
	АИ-92 + Присадка (50 мг)	92
2	АИ-92	91,5
	АИ-92 + Присадка (150 мг)	91,7
3	АИ-92	91,5
	АИ-92 + Присадка (300 мг)	91,7

2,6-Диметил-N,N-диэтил-4-нитрозоанилин синтезировали по известной методике: на первой стадии получали изонитрозоацетилацетон из концентрированной соляной кислоты, ацетилацетона и нитрита натрия [3]. Далее полученное количество ИНАА полностью растворяли в ацетоне, затем добавляли диэтиламин. Жидкость становилась темной, выпавший зеленый осадок – 2,6-диметил-N,N-диэтил-4-нитрозоанилин, отфильтровывали его [4].

Полученное вещество измельчали и вводили в образцы топлива в количествах 50 мг/л, 150 мг/л, 300 мг/л. Отмечалось полное растворение 2,6-диметил-N,N-диэтил-4-нитрозоанилина в бензине и небольшое окрашивание топлива в светло-зеленый оттенок.

Испытания проводились на базе лаборатории АО «Красноярскнефтепродукт», на специальной установке для определения октанового числа моторного топлива. Сравнивались образцы АБ марки АИ-92 без присадок с образцами с добавками полученного 2,6-диметил-N,N-диэтил-4-нитрозоанилина.

Результаты испытаний приведены в табл. 2:

Из данных, приведенных в табл. 2 видно, что при введении присадки наблюдается некоторое увеличение октанового числа (на 0,2–0,3 ед.). Такое небольшое рост нельзя назвать эффективным, поэтому исследование решено продолжить с использованием других нитрозосоединений.

#### Библиографические ссылки

1. Данилов А. М. Применение присадок в топливах : справ. 3-е изд., доп. СПб. : Химиздат, 2010. С. 22.
2. Капустин В. М. Нефтяные и альтернативные топлива с присадками и добавками. М. : Колос, 2008. С. 83.
3. Вейганд К. Методы эксперимента в органической химии. Т. 2. М. : Иностранная литература, 1952. С. 293.
4. Товбис М. С., Субоч Г. А. Нитрозофенолы и нитрозоанилины синтез, свойства. Красноярск, 2013. С. 108.

#### References

1. Danilov A. M. Use of additives in fuels: Directory. 3-d edition. S. Petersburg : Himisdat, 2010. P. 22.
2. Kapustin V. M. Oil and alternative fuels with additives. Moscow : Kolos, 2008. P. 83.
3. Weigand K. Methods of experiment in organic chemistry. T. 2. M. : Foreign Literature, 1952. P. 293.
4. Tovbis M. S., Suboch G. A. Nitrosophenols and nitrosoanilines synthesis, properties. Krasnoyarsk, 2013. P. 108.

© Вигуль Д. О., Косицына А. С., Субоч Г. А., Товбис М. С., 2018

УДК 678.43

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТРУКТУРИРОВАНИЯ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ В ПРИСУТСТВИИ ЗАМЕЩЕННЫХ ПИРАЗОЛОВ

В. Д. Ворончихин\*, П. Е. Селютина, П. С. Мельникова, Д. И. Персидская, А. В. Любашкин

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

\*E-mail: vvd-77@mail.ru

*Представлены результаты изучения процесса структурирования эластомерных композиций на основе натурального каучука в присутствии замещенных нитрозопиразолов.*

*Ключевые слова: эластомерная композиция, структурирование, замещенные нитрозопиразолы.*

## THE STUDY OF THE PROCESS OF STRUCTURING THE ELASTOMER COMPOSITIONS IN THE PRESENCE OF SUBSTITUTED PYRAZOLES

V. D. Voronchikhin\*, P. E. Selyutina, P. S. Melnikova, D. I. Persidskaya, A. V. Lyubyashkin

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

\*E-mail: vvd-77@mail.ru

*The paper presents the results of studying the process of structuring elastomeric compositions based on natural rubber in the presence of substituted nitrozoypyrazoles.*

*Keywords: elastomeric composition, structuring, substituted nitrozoypyrazoles.*

Одним из распространенных способов соединения деталей при конструкционной сборке является их склеивание. Представленный на рынке ассортимент клеев достаточно разнообразен [1] и выбор типа клея определяется сферой применения изделий, в которых он предполагается к использованию.

Значительными преимуществами клеевых композиций на основе натурального каучука является их универсальность, т. е. возможность использования для соединения деталей и полуфабрикатов бытового (в том числе, пищевого) и промышленного назначения. Однако, его существенным недостатком является легкость деструкции при повышенной температуре и под действием кислорода воздуха [2]. В связи с этим, является актуальным поиск полифункциональных ингредиентов для композиций на основе натурального каучука, сочетающих антиокислительные, адгезивно-активные и иные свойства.

Ранее было установлено, что замещенные нитрозопиразолы обладают полифункциональными свойствами [3; 4]. В связи с этим представлял интерес исследование влияния замещенных нитрозопиразолов на процессы структурообразования в эластомерных композициях.

Исследования проводились в эластомерной композиции на основе натурального каучука, используемой для создания клея. В качестве структурирующих агентов в композиции использовалась комбинация дибензотиазолдисульфида (альтакс) и 2-меркаптобензотиазола (каптакс).

Объектами исследования являлись 3-(метоксиметил)-4-нитрозо-5-фенил-1Н-пиразол и 3-метоксиметил-4-нитрозо-5-(п-хлорфенил)-1Н-пиразол, синтезированные по методике [5]. Дозировка приме-

няемых модификаторов в составе композиций составляла 1,0 масс. ч. на 100 масс. ч. каучука.

Изготовление композиций осуществлялось на валковом смесителе с последующей вулканизацией на гидравлическом прессе при температуре 145 °С.

Изучение процесса структурирования опытных композиций осуществлялось методом оценки структурных параметров вулканизационной сетки по методике, изложенной в [6]. В качестве растворителей использовались толуол и м-ксилол, имеющих разное сродство к полимерной матрице. В качестве оценочных критериев использовались равновесная степень набухания  $Q_1$ , степень набухания геля фракции  $Q_2$ , содержание геля-фракции ( $\Gamma$ ) и золь-фракции ( $Z$ ).

Применение исследуемых замещенных нитрозопиразолов приводит к снижению скорости вулканизации. Это выражается в увеличении  $Q_1$  и  $Q_2$ , относительного контрольного образца (см. таблицу). При этом установлено, что 3-(метоксиметил)-4-нитрозо-5-фенил-1Н-пиразол, в сравнении с 3-метоксиметил-4-нитрозо-5-(п-хлорфенил)-1Н-пиразолом, более интенсивно снижает скорость процессов структурирования композиций.

Большее значение  $Q_2$  в композициях, содержащих 3-метоксиметил-4-нитрозо-5-(п-хлорфенил)-1Н-пиразол, относительно контрольной смеси (см. таблицу) характеризует наличие более редкой вулканизационной сетки. На это также указывает большее значение геля-фракции в модифицированной композиции.

Полученные результаты позволяют предположить возможность использования исследуемых замещенных нитрозопиразолов при изготовлении низкомолекулярных клеевых композиций.

## Структурные характеристики вулканизатов, содержащих замещенные нитропиразолы

Время вулканизации	Контрольная смесь			Тип модификатора					
				3-(метоксиметил)-4-нитрозо-5-фенил-1Н-пиразол			3-метоксиметил-4-нитрозо-5-(п-хлорфенил)-1Н-пиразол		
	$Q_1$	$Q_2$	3/Г	$Q_1$	$Q_2$	3/Г	$Q_1$	$Q_2$	3/Г
<i>Растворитель толуол</i>									
5 минут	–	–	100 / –	–	–	100 / –	–	–	100 / –
10 минут	1161	1443	18 / 82	–	–	100 / –	2122	3407	32 / 68
15 минут	976	1186	16 / 84	–	–	100 / –	1640	2041	19 / 81
20 минут	744	899	16 / 84	1601	2128	24 / 76	1263	1507	15 / 85
<i>Растворитель м-ксилол</i>									
5 минут	–	–	100 / –	–	–	100 / –	–	–	100 / –
10 минут	1120	1387	18 / 82	–	–	100 / –	2688	4416	37 / 63
15 минут	909	1121	17 / 83	–	–	100 / –	1655	2056	19 / 81
20 минут	721	879	16 / 84	1566	2085	24 / 76	1189	1435	16 / 84

## Библиографические ссылки

1. Петрова А. П. Клеящие материалы : справ. М. : Редакция журнала «Каучук и резина», 2002. 196 с.

2. Агаянц И. М. Натуральный каучук, в поисках рецепта. М. : [б. и.], 2010. 700 с.

3. Исследование влияния п-замещенных 3-метил-4-нитрозо-1Н-пиразолов и 4-нитрозоанилинов на реокинетику вулканизации ненаполненных эластомерных композиций / А. С. Косицына, Т. А. Фроленко, В. Д. Ворончихин и др. // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Химия. 2014. Т. 7, № 2. С. 185–191.

4. Гончаров Е. В. Нитрозогетероциклические соединения в качестве модификаторов эластомерных композиций : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2009. 16 с.

5. Синтез ранее неизвестного 1-(п-хлорфенил)-4-метокси-1,2,3-бутантриона-2-оксима и нитропиразола на его основе / Д. И. Персидская, В. В. Ефимов, А. В. Любяшкин и др. // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения : сб. материалов по итогам Всерос. науч.-практ. конф. (7 декабря 2017, г. Красноярск) ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2017. С. 467–469.

6. Шварц А. Г. Номограммы для определения густоты пространственной сетки вулканизатов // Каучук и резина. 1957. № 7. С. 31–34.

## References

1. Petrova A. P. Kleyashchie materialy. Spravochnik. [Adhesive materials. Handbook] M. : ZAO "Redakciya zhurnala "Kauchuk i rezina", 2002. 196 p.

2. Agayan I. M. Natural'nyj kauchuk, v poiskah recepta [Natural rubber, looking for a recipe]. M. : [b. i.], 2010. 700 p.

3. Issledovanie vliyaniya n-zameshchennyh 3-metil-4-nitrozo-1N-pirazolov i 4-nitrozoanilinov na reokinetiku vulkanizacii nenapolnennyh elastomernyh kompozicij [Study of the effect of n-substituted 3-methyl-4-nitroso-1H-pyrazoles and 4-nitrosoaniline to rheokinetic curing unfilled elastomeric compositions] / A. S. Kosicyna, T. A. Frolenko, V. D. Voronchihin et al. // Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Himiya. 2014. T. 7, № 2. P. 185–191.

4. Goncharov E. V. Nitrozogeterociklicheskie soedineniya v kachestve modifikatorov elastomernyh kompozicij : avtoreferat diss. ... kand. tekhn. nauk [Nitrosoheterocyclic compounds as modifiers of elastomeric compositions : diss. abstract ... candidate of technical sciences]. Krasnoyarsk, 2009. 16 p.

5. Sintez ranee neizvestnogo 1-(p-hlorfenil)-4-metoksi-1,2,3-butantriona-2-oksima i nitrozopirazola na ego osnove [The synthesis of the previously unknown 1-(p-chlorophenyl)-4-methoxy-1,2,3-butatriene-2-oxime and nitrosophenol based on it] / D. I. Persidskaya, V. V. Efimov, A. V. Lyubyashkin et al. // Lesnoj i himicheskij komplekсы – problemy i resheniya : sb. materialov po itogam Vseros. nauch.-prakt. konf. [Forest and chemical complexes-problems and solutions : collection of materials on the results of vsiros. scientific. prakt. conf.]. Krasnoyarsk, 2017. P. 467–469. (In Russ.)

6. Shvarc A. G. Nomogrammy dlya opredeleniya gustoty prostranstvennoj setki vulkanizatorov [Nomograms to determine the density of the spatial grid of vulcanizates] // Kauchuk i rezina. 1957. № 7. P. 31–34.

© Ворончихин В. Д., Селютина П. Е., Мельникова П. С., Персидская Д. И., Любяшкин А. В., 2018

УДК 547.5:542.921.6:541.127

## КИНЕТИКА И МЕХАНИЗМ ТЕРМОРАСПАДА 3,7-ДИНИТРОЗО-1,3,5,7-ТЕТРААЗАБИЦИКЛО[3.3.1]НОНАНА В НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Л. А. Круглякова\*, А. В. Сачивко, К. В. Пехотин, И. А. Мамаев

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

*Изучено термическое разложение 3,7-динитрозо-1,3,5,7-тетраазабицикло[3.3.1]нонана (DNPT), альтернативного компонента твердых ракетных топлив, при разных скоростях нагрева. Предложен механизм лимитирующей стадии разложения.*

*Ключевые слова: 3,7-динитрозо-1,3,5,7-тетраазабицикло[3.3.1]нонан, термическое разложение, неизотермические условия, активационные параметры.*

## THERMAL DECOMPOSITION KINETICS AND MECHANISM OF 3,7-DINITROZO-1,3,5,7-TETRAAZABICYCLO[3.3.1]NONANE UNDER NONISOTHERMAL CONDITIONS

L. A. Kruglyakova\*, A. V. Sachivko, K. V. Pekhotin, I. A. Mamaev

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

\*E-mail: lakruglyakova@sibsau.ru

*Thermal decomposition of 3,7-dinitrozo-1,3,5,7-tetraazabicyclo[3.3.1]nonane (DNPT), alternative component of solid propellants, is studied at different heating rates. The mechanism of decomposition limiting stage is established.*

*Keywords: 3,7-dinitrozo-1,3,5,7-tetraazabicyclo[3.3.1]nonane, thermal decomposition, nonisothermal conditions, activation parameters.*

**Введение.** N-Нитрозопроизводные циклических аминов, в частности, 3,7-динитрозо-1,3,5,7-тетраазабицикло[3.3.1]нонан (DNPT), 1,3,5-тринитрозо-1,3,5-триазабициклогексан и тетранитрозотетраазадекалин, рассматривались в качестве энергоемких материалов [1], а тетранитрозотетраазадекалин является компонентом и модификатором некоторых твердых ракетных топлив. Кроме этого DNPT, как и другие N-нитрозосоединения, представляет интерес в качестве порофора для вспенивания полимеров различного назначения [1; 2]. Для практического применения этих веществ необходимо всестороннее изучение их свойств, и в том числе, химической стойкости.

**Результаты и их обсуждение.** Термическое разложение 3,7-динитрозо-1,3,5,7-тетраазабицикло[3.3.1]нонана (DNPT) изучено в неизотермических условиях на дериватографе Q-1500D в интервале температур 20–500 °C при различных скоростях нагревания образца (1,25; 2,5; 5 и 10 град/мин). Масса вещества составляла 0,02 г. Типичная термограмма DNPT представлена на рис. 1, из которого видно, что разложение происходит в твердой фазе, о чем свидетельствует отсутствие эндотермического пика на кривой ДТА, соответствующего плавлению образца.

Термическое разложение DNPT начинается примерно при 150–162 °C, протекает в две различающиеся

скоростью убыли массы стадии, причем вторая сопровождается интенсивным тепловыделением. Температуры начала ( $T_b$ ) и интенсивного разложения ( $T_{max}$ ) представлены в табл. 1.

Дифференциальные кривые тепловыделения при различных скоростях нагрева изображены на рис. 2.

Для определения кинетических параметров термического разложения были использованы уравнения Киссинджера [3] и Озавы [4]:

$$\ln\left(\frac{n}{T_{max}^2}\right) = -\frac{E}{RT_{max}} + \ln\left(\frac{AR}{E}\right), \quad (1)$$

$$\ln n + \frac{0,4567E}{RT_{max}} = c, \quad (2)$$

где  $n$  – скорость нагрева образца;  $T_{max}$  – значения температур, при которых скорость тепловыделения имеет максимальное значение при данной скорости нагрева образца. Величины энергии активации и предэкспоненциального множителя уравнения Аррениуса, найденные из уравнений (1) и (2), также приведены в таблице. Видно, что полученные разными методами значения энергии активации хорошо согласуются между собой.

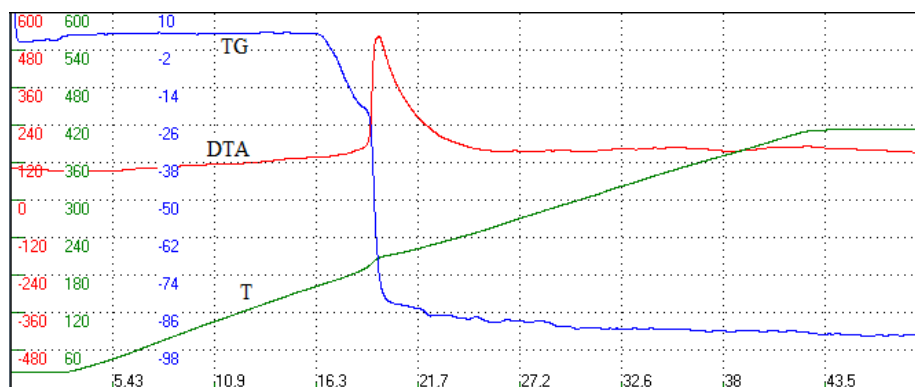


Рис. 1. Термограмма DNPT, скорость нагревания 5 град/мин

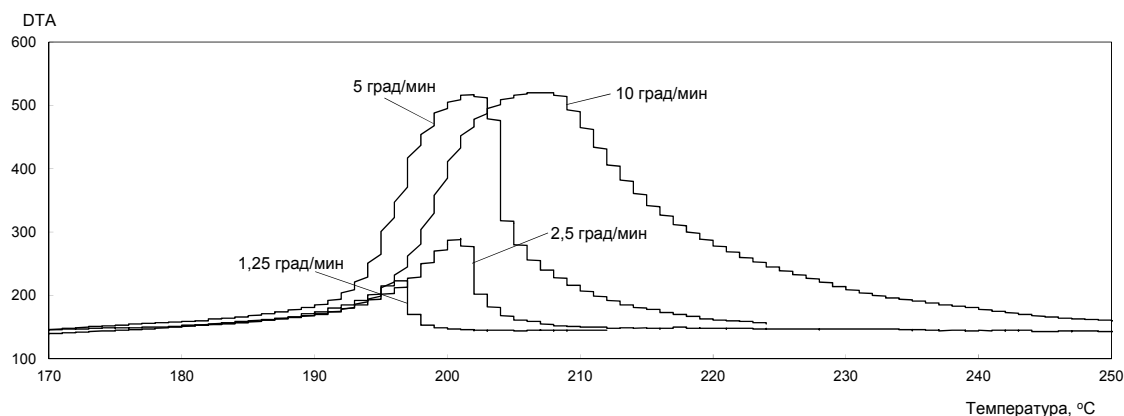


Рис. 2. Дифференциальные кривые тепловыделения при термораспаде DNPT

#### Характеристические температуры термораспада DNPT при разных скоростях нагрева

Скорость нагрева, град/мин	$T_b$ , °C	$T_{max}$ , °C	$E$ , кДж/моль		$lg A$ методом Киссинджера
			методом Киссинджера	методом Озавы	
1,25	150	195,8	165,8	169,2	11,88
2,5	152	200,5			
5,0	154	202			
10,0	162	206			

Хромато-масс-спектрометрический анализ на спектрометре Shimadzu LCMS-2020 (растворитель ацетонитрил, энергия ионизации 70 эВ) исходного DNPT и конденсированных продуктов термораспада при глубинах превращения 5 и 30 % показал, что в масс-спектре исходного DNPT пик молекулярного иона  $m/z$  186 невелик (2,21 %), основными являются фрагментные ионы с  $m/z$  128 (100 %,  $[M-N(NO)CH_2]^+$ ) и 142 (64,35%,  $[M-N(NO)]^+$ ). В конденсированных продуктах термораспада интенсивность этих пиков изменяется с увеличением глубины превращения и появляются новые пики фрагментных и перегруппировочных ионов с  $m/z$  156 (3,78 %,  $[M-NO]^+$ ), 114 (1,79 %,  $[M-CH_2N(NO)CH_2]^+$ ), 72 (1,31 %,  $[CH_2-N(NO)CH_2]^+$ ), 42(0,86 %  $[CH_2NCH_2]^+$ ), 30 (3,47 %,  $[NO]^+$ ), 28 (3,45 %,  $[NCH_2]^+$ ), свидетельствующие о деструкции цикла в ходе разложения. С учетом активационных параметров и состава про-

дуктов разложения можно предположить, что лимитирующей стадией распада DNPT является гомолитический разрыв связи N-NO в одном из циклов молекулы, аналогично тому, как это происходит в 3,7-динитро-1,3,5,7-тетраазабицикло[3.3.1]нонane (DPT) [5].

#### Библиографические ссылки

- Vagenknecht J., Zeman S. Some characteristics of 3,7-dinitro-, 3,7-dinitrozo- and dinitrate compounds derives from 1,3,5,7-tetraazabicyclo[3.3.1]nonane // Journal of Hazardous Materials. 2005. A119. P. 1–11.
- Берлин А. А., Шутов Ф. А. Химия и технология газонаполненных полимеров. М.: Наука, 1980. 504 с.
- Kissinger H. E. Reaction Kinetics in Differential Thermal Analysis // Analytical Chemistry. 1957. Vol. 29, № 11. P. 1702–1706.

4. Ozawa T. A. New Method of Analyzing Thermogravimetric Data // Bull. Chemical Society of Japan. 1965. P. 1881–1886.

5. Stepanov R. S., Kruglyakova L. A., Astachov A. M. Effect of the structure of cyclic N-nitramines on the rate and mechanism of their thermolysis // Russian Journal of General Chemistry. 2007. Vol. 77, № 7. P. 1293–1299.

#### References

1. Vagenknecht J., Zeman S. Some characteristics of 3,7-dinitro-, 3,7-dinitrozo- and dinitrate compounds derives from 1,3,5,7-tetraazabicyclo[3.3.1]nonane // Journal of Hazardous Materials. 2005. A119. P. 1–11.

2. Berlin A. A., Shutov F. A. Chemistry and Technology of Foamed Hight Polymers. Moscow, Nauka Publ., 1980. 504 p. (In Russ.)

3. Kissenger H. E. Reaction Kinetics in Differential Thermal Analysis // Analytical Chemistry. 1957. Vol. 29, No. 11. P. 1702–1706.

4. Ozawa T. A. New Method of Analyzing Thermogravimetric Data // Bull. Chemical Society of Japan. 1965. P. 1881–1886.

5. Stepanov R. S., Kruglyakova L. A., Astachov A. M. Effect of the structure of cyclic N-nitramines on the rate and mechanism of their thermolysis // Russian Journal of General Chemistry. 2007. Vol. 77, No. 7. P. 1293–1299.

© Круглякова Л. А., Сачивко А. В.,  
Пехотин К. В., Мамаев И. А., 2018

## РАЗМОЛ КАК МЕХАНОХИМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В. Р. Пен, С. И. Левченко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: 2507@inbox.ru

*Показано, что представление процесса размола как механохимического позволяет сформулировать математическую модель динамики на основе принципов формальной кинетики, что позволяет получить замкнутое математическое описание динамики размола волокнистых полуфабрикатов.*

*Ключевые слова:* размол, динамика размола, кинетика химическая.

## MATHEMATICAL MODELING OF GRIND AS MECHANOCHEMICAL PROCESS 2

V. R. Pen, S. I. Levchenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: 2507@inbox.ru

*The article describes how the presentation of the grind as the mechanochemical process allows to derive a mathematical model of the dynamics based on the principles of the formal kinetics. That, in turn, allows us to derive the self-contained mathematical description of the grind dynamics of the fibrous semi-finished products.*

*Keywords:* grind, grind dynamics, chemical kinetics.

**Введение.** Термин «механохимия» впервые введен Оствальдом в «Книге по общей химии». В последней он рассматривал различные методы инициирования химических процессов [1]. Этот термин относится к процессам, в том числе и химическим реакциям, инициированным любого типа механической обработкой. Сложилось направление, которое условно можно разбить на исследование влияния предварительной механической обработки на реакционную способность – механическую активацию, и изучение реакций, протекающих в условиях механической активации – механосинтез.

Размол – механический процесс, при котором волокна в водной среде испытывают расщепляющие и режущие воздействия. Цель размола – структурные изменения клеточной стенки волокна, посредством применения механической энергии и пластифицирующего воздействия водной среды. Один из главных эффектов процесса размола целлюлозы – «раскрытие» внутренней структуры волокон. Волокна целлюлозы сплющиваются и становятся более гибкими, что делает их более подходящими для построения межволоконных связей [2–7].

**Результаты и обсуждение.** Как показано в [8], математическая модель динамики размола, основанная на принципах формальной кинетики, имеет вид:

$$S^0 = \text{const}_0 + \text{const}_1 e^{-k_1 t} + \text{const}_2 e^{-k_2 t} + \text{const}_3 e^{-k_3 t} + \text{const}_4 e^{-k_4 t}. \quad (1)$$

Здесь  $S^0$  – градус помола,  $\text{const}_i$  есть комбинации из эффективных «констант» динамики размола  $ki$  для

каждой стадии процесса, начальных условий и постоянных системы.

Прямая аналогия с формальной кинетикой предполагает введение таких величин, как энергия активации  $E_i$  и предэкспонента  $K_{0i}$ . То есть представление константы  $ki$  в виде

$$ki = K_{0i} e^{\frac{E_i}{RT}}. \quad (2)$$

Естественным образом можно отождествить температуру  $T$  с числом оборотов мельницы. А предэкспоненту  $K_0$  с геометрическими параметрами размалывающей гарнитуры, энергию активации с свойствами волокна. Это фактически способность волокна быть подготовленным к размолу. Обозначая число оборотов  $N$ , переписываем уравнение (2):

$$ki = K_0 e^{\frac{E_i}{RN}}. \quad (3)$$

Здесь  $E_i$  энергия, переданная волокну с начала процесса размола до момента начала изменения градуса помола.

Естественным образом следует, что зависимость  $ki - 1/N$  линейна.

Таким образом, представление процесса размола как механохимический процесс позволяет использовать аппарат формальной химической кинетики для моделирования процесса размола целлюлозных волокон.

### Библиографические ссылки

1. Ostwald W. Lehrbuch der allgemeinen Chemie / W. Ostwald. Bd. 2 Stöchiometrie. Leipzig: Engelmann, 1981. 1163 p.



2. Иванов С. Н. Технология бумаги. 3-е изд. М., 2006. С. 23; 36–39; 42; 57; 59; 68–69; 382–384.
3. Paulapuro H., Lumiainen J. Papermaking science and technology, Book 8, Papermaking: part 1, stock preparation and wet end, chapter four, refining of chemical pulp // Otaniemi, 2000. P. 87–97; 105; 106; 115–117; 194–206.
4. Batchelor W. J. Kure K. A., Ouellet D. Refining and the development of fibre properties // Nordic pulp & paper research journal. 1999. Vol. 14, № 4. P. 285–286.
5. Технология целлюлозно-бумажного производства // Технология производства и обработки бумаги и картона / ВНИИБ. СПб. : Политехника, 2005. Т. 2, ч. 1. С. 36; 37.
6. Акулов Б. В., Ермаков С. Г. Производство бумаги и картона : учеб. пособие. Пермь : Изд-во Пермского государственного технического университета, 2010. С. 33; 35.
7. Легоцкий С. С., Гончаров В. Н. Размалывающее оборудование и подготовка бумажной массы. М. : Лесная промышленность, 1990. С. 6–7.
8. Пен В. Р., Левченко С. И. Размол как механохимический процесс. Математическое моделирование // Решетневские чтения : материалы XX Междунар. науч. конф. (09–12 ноября 2016, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 339–342.

## References

1. Ostwald W. Lehrbuch der allgemeinen Chemie / Bd. 2 Stöchiometrie. Leipzig: Engelmann, 1981. 1163 p.
2. Ivanov S. N. Paper technology, 3-d edition. "Paper School", Moscow, 2006. P. 23; 36–39; 42; 57; 59; 68–69; 382–384.
3. Paulapuro H., Lumiainen J. Papermaking science and technology, Book 8, Papermaking: part 1, stock preparation and wet end, chapter four, refining of chemical pulp. Otaniemi, 2000. P. 87–97; 105; 106; 115–117; 194–206.
4. Batchelor W. J., Kure K. A., Ouellet D. Refining and the development of fibre properties // Nordic pulp & paper research journal. 1999. Vol. 14, № 4. P. 285–286.
5. Technology of cellulose-paper production, volume 2, part 1, technology of paper production and processing, VNIIB, "Polytechnic" publishing house, Saint-Petersburg, 2005. P. 36–37.
6. Akulov B. V. et al., Production of paper and cardboard published in Perm's state technical university, Perm-city, 2010. P. 33–35
7. Legotsky S. S., Goncharov V. N. Grinding machinery and preparation of the paper mass. "Timber industry", Moscow, 1990. P. 6–7.
8. Pen V. R., Levchenko S. I. Mathematical modeling of grind as mechanochemical process // *Materialy XX Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XX Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2016. P. 339–342.

© Пен В. Р., Левченко С. И., 2018

### РАЗМОЛ КАК МЕХАНОХИМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В. Р. Пен, С. И. Левченко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: 2507@inbox.ru

*Показано, что представление процесса размола как механохимического позволяет сформулировать математическую модель динамики на основе принципов формальной и полихронной кинетики, что позволяет получить замкнутое математическое описание динамики размола волокнистых полуфабрикатов.*

*Ключевые слова: разمول, динамика размола, кинетика химическая.*

### MATHEMATICAL MODELING OF GRIND AS MECHANOCHEMICAL PROCESS 3

V. R. Pen, S. I. Levchenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: 2507@inbox.ru

*The article describes how the presentation of the grind as the mechanochemical process allows to derive a mathematical model of the dynamics based on the principles of the formal and polichronik kinetics. That, in turn, allows us to derive the self-contained mathematical description of the grind dynamics of the fibrous semi-finished products.*

*Keywords: grind, grind dynamics, chemical kinetics.*

**Введение.** Термин «механохимия» впервые введен Оствальдом в «Книге по общей химии». В последней он рассматривал различные методы иницирования химических процессов [1]. Этот термин относится к процессам, в том числе и химическим реакциям, инициированным любого типа механической обработкой. Сложилось направление, которые условно можно разбить на исследование влияния предварительной механической обработки на реакционную способность – механическую активацию, и изучение реакций, протекающих в условиях механической активации – механосинтез.

Размол – механический процесс, при котором волокна в водной среде испытывают расщепляющие и режущие воздействия. Цель размола – структурные изменения клеточной стенки волокна, посредством применения механической энергии и пластифицирующего воздействия водной среды. Один из главных эффектов процесса размола целлюлозы – «раскрытие» внутренней структуры волокон. Волокна целлюлозы сплющиваются и становятся более гибкими, что делает их более подходящими для построения межволоконных связей [2–7].

**Результаты и обсуждение.** Как показано в [8], математическая модель динамики размола, основанная на принципах формальной кинетики, имеет вид:

$$S^0 = \text{const}_0 + \text{const}_1 e^{-k_1 t} + \text{const}_2 e^{-k_2 t} + \text{const}_3 e^{-k_3 t} + \text{const}_4 e^{-k_4 t} \quad (1)$$

Здесь  $S^0$  – градус помола,  $\text{const}_i$  есть комбинации из эффективных «констант» динамики размола  $ki$  для

каждой стадии процесса, начальных условий и постоянных системы.

Так как целлюлоза по строению отдельных волокон оказывается существенно неоднородной, это обстоятельство необходимо учитывать при получении математической модели динамики. Естественным формализмом для этой цели представляется аппарат полихронной кинетики, предполагающий учет неоднородности вступающих в химическое взаимодействие молекул по константам скорости, приводящее в итоговому выражению:

$$C(t) = \int_{K_{\min}}^{K_{\max}} G(k, t) f(k) dk, \quad (2)$$

где  $G(k, t)$  – решение соответствующего кинетического уравнения;  $f(k)$  – некая функция распределения, учитывающая кинетическую неоднородность вступающего в реакцию вещества. В случае процесса размола (2) приобретает вид

$$C(t) = \int_{K_{\min}}^{K_{\max}} (\text{const}_0 + \text{const}_1 e^{-k_1 t} + \text{const}_2 e^{-k_2 t} + \text{const}_3 e^{-k_3 t} + \text{const}_4 e^{-k_4 t}) f(k) dk,$$

где  $f(k)$  – плотность распределения размалываемых волокон.

Решая полученное интегральное уравнение, например методом Тихонова, оказывается возможным найти распределение целлюлозных волокон по способности к размолу и, соответственно, определить, в конечном итоге, прочностные свойства бумаги.

Таким образом, представление процесса размола как механохимический процесс, позволяет использовать аппарат формальной и полихронной химической кинетики для моделирования процесса размола целлюлозных волокон и оценки его влияния на прочностные свойства бумаги, обусловленные неоднородностью межволоконных связей.

#### Библиографические ссылки

1. Ostwald W. Lehrbuch der allgemeinen Chemie / W. Ostwald. Bd. 2 Stöchiometrie. Leipzig: Engelmann, 1981. 1163 p.
2. Иванов С. Н. Технология бумаги. 3-е изд. М., 2006. С. 23; 36–39; 42; 57; 59; 68–69; 382–384.
3. Paulapuro H., Lumiainen J. Papermaking science and technology, Book 8, Papermaking: part 1, stock preparation and wet end, chapter four, refining of chemical pulp // Otaniemi, 2000. P. 87–97; 105; 106; 115–117; 194–206.
4. Batchelor W. J., Kure K. A., Ouellet D. Refining and the development of fibre properties // Nordic pulp & paper research journal. 1999. Vol. 14, № 4. P. 285–286.
5. Технология целлюлозно-бумажного производства // Технология производства и обработки бумаги и картона / ВНИИБ. СПб. : Политехника, 2005. Т. 2, ч. 1. С. 36; 37.
6. Акулов Б. В., Ермаков С. Г. Производство бумаги и картона : учеб. пособие. Пермь : Изд-во Пермского государственного технического университета, 2010. С. 33; 35.
7. Легоцкий С. С., Гончаров В. Н. Размалывающее оборудование и подготовка бумажной массы. М. : Лесная промышленность, 1990. С. 6–7.
8. Пен В. Р., Левченко С. И. Размол как механохимический процесс. Математическое моделирование // Решетневские чтения : материалы XX Междунар. науч. конф. (09–12 ноября 2016, г. Красноярск) : в 2 ч.

/ под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 339–342.

#### References

1. Ostwald W. Lehrbuch der allgemeinen Chemie / Bd. 2 Stöchiometrie. Leipzig: Engelmann, 1981. 1163 p.
2. Ivanov S. N. Paper technology, 3-d edition. "Paper School", Moscow, 2006. P. 23; 36–39; 42; 57; 59; 68–69; 382–384.
3. Paulapuro H., Lumiainen J. Papermaking science and technology, Book 8, Papermaking: part 1, stock preparation and wet end, chapter four, refining of chemical pulp. Otaniemi, 2000. P. 87–97; 105; 106; 115–117; 194–206.
4. Batchelor W. J., Kure K. A., Ouellet D. Refining and the development of fibre properties // Nordic pulp & paper research journal. 1999. Vol. 14, № 4. P. 285–286.
5. Technology of cellulose-paper production, volume 2, part 1, technology of paper production and processing, VNIIB, "Polytechnic" publishing house, Saint-Petersburg, 2005. P. 36–37.
6. Akulov B. V. et al., Production of paper and cardboard published in Perm's state technical university, Perm-city, 2010. P. 33–35
7. Legotsky S. S., Goncharov V. N. Grinding machinery and preparation of the paper mass. "Timber industry", Moscow, 1990. P. 6–7.
8. Pen V. R., Levchenko S. I. Mathematical modeling of grind as mechanochemical process // *Materialy XX Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XX Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2016. P. 339–342.

© Пен В. Р., Левченко С. И., 2018

УДК 547.773+ 543.544.5.068.7

## ИЗОТОПНЫЙ АНАЛИЗ И ФРАГМЕНТАЦИОННЫЙ РАСПАД 4-МЕТОКСИ-1-(4-ХЛОРФЕНИЛ)БУТАН-1,2,3-ТРИОН-2-ОКСИМА

Д. И. Персидская, В. В. Ефимов, А. А. Кукушкин, 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: efimov-viktor@mail.ru

*Проведен масс-спектрометрический анализ изонитрозодикетона с 4-хлорфенильным заместителем, предшественника для создания эффективных антиоксидантных присадок к ракетному топливу. Представлена схема распада молекулы на осколки с наибольшей интенсивностью.*

*Ключевые слова: ВЭЖХ, масс-спектрометрия, изонитрозодикетон, фрагментационный распад, изотопный анализ.*

## ISOTOPE ANALYSIS AND FRAGMENTATION DECAY OF 4-METHOXY-1-(4-CHLOROPHENYL)BUTANE-1,2,3-TRION-2-OXIME

D. I. Persidskaya, V. V. Efimov, A. A. Kukushkin, M. S. Tovbis

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

*A mass spectrometric analysis of isonitrosodiketone with a 4-chlorophenyl substituent, a precursor for the creation of effective antioxidant additives to rocket fuel, was carried out. A scheme of the decomposition of a molecule into fragments with the greatest intensity is presented.*

*Keywords: HPLC, mass spectrometry, isonitrosodiketone, fragmentation decay, isotopic analysis.*

Ранее на кафедре ОХТ нами был синтезирован изонитрозодикетон с *n*-хлорфенильным заместителем по схеме, представленной на рис. 1 [1].

Строение впервые полученного соединения было доказано с помощью ИК и ЯМР <sup>1</sup>H спектроскопии. Однако, для идентификации и качественного определения 4-метокси-1-(*p*-хлорфенил)-1,2,3-бутантрион-2-оксима не была использована масс-спектрометрия с применением высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ/МС) [2].

Поэтому целью данной работы стало подтверждение структурной формулы и прогнозирование фрагментационного распада соединений на осколочные ионы методом ВЭЖХ/МС с выявлением наиболее интенсивных сигналов.

Запись масс-спектров проводилась на приборе Shimadzu LC/MS-2020 с колонкой RAPTOR ARC-18 100 (диаметр 2,1 мм, зернистость 0,1 мм, длина 100 мм). Готовили образец концентрацией 0,01 мг/мл в ацетонитриле, проводили запись в изотоническом режиме, при *t* = 35 °С в термостатируемой колонке.

Для масс-спектрометрии использовали квадрупольный масс-спектрометр с электронапылителем источником ионов.

Масс-спектрометрический анализ образцов проводили в режиме электронапыления при прямом вводе образца и элюата, подаваемого хроматографом. Прямой ввод исследуемых образцов в масс-хроматограф

осуществляли с помощью автоплунжерного насоса со скоростью 10 мкл/мин.

Для получения интенсивного пика были подобраны следующие условия масс-детектирования: положительная и отрицательная поляризации, напряжение электроспрея 5500,0 В, потенциал декластеризации и потенциал ввода – соответственно 60В при давлении газа завесы 5,0 psi и газа распыления 15,0 psi, скорость 10 мкл/мин [3]. Диапазон сканирования составил 20–300 Да.

Анализ полученного масс-спектра показал молекулярный ион со значением 254 M/Z с высокой интенсивностью и наличие множества пиков, из которых 8 были наиболее интенсивными – 229,15 182,25 169,20 156,25 143,25 125,25 115,25 102,25 Да. Развал молекулы на осколки приведен на рис. 2.

Молекулярная масса соединения нечетная, это подтверждает наличие одного атома азота в структуре соединения. В масс-спектре присутствует ион [M+2], интенсивность которого составляет 35,2. Из этого делаем вывод о том, что в молекуле присутствует один атом хлора. Также присутствует ион [M+1], интенсивность которого составляет 12,81, который подтверждает наличие в молекуле одиннадцати атомов углерода. Учитывая наличие атома хлора в [M+2], а также атома углерода и азота в [M+1], делаем вывод о том, что в молекуле содержится четыре атома кислорода [4].

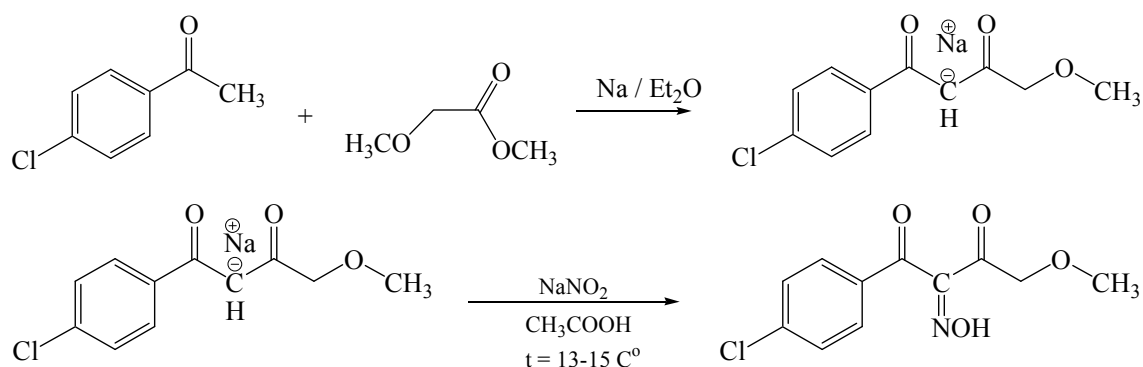
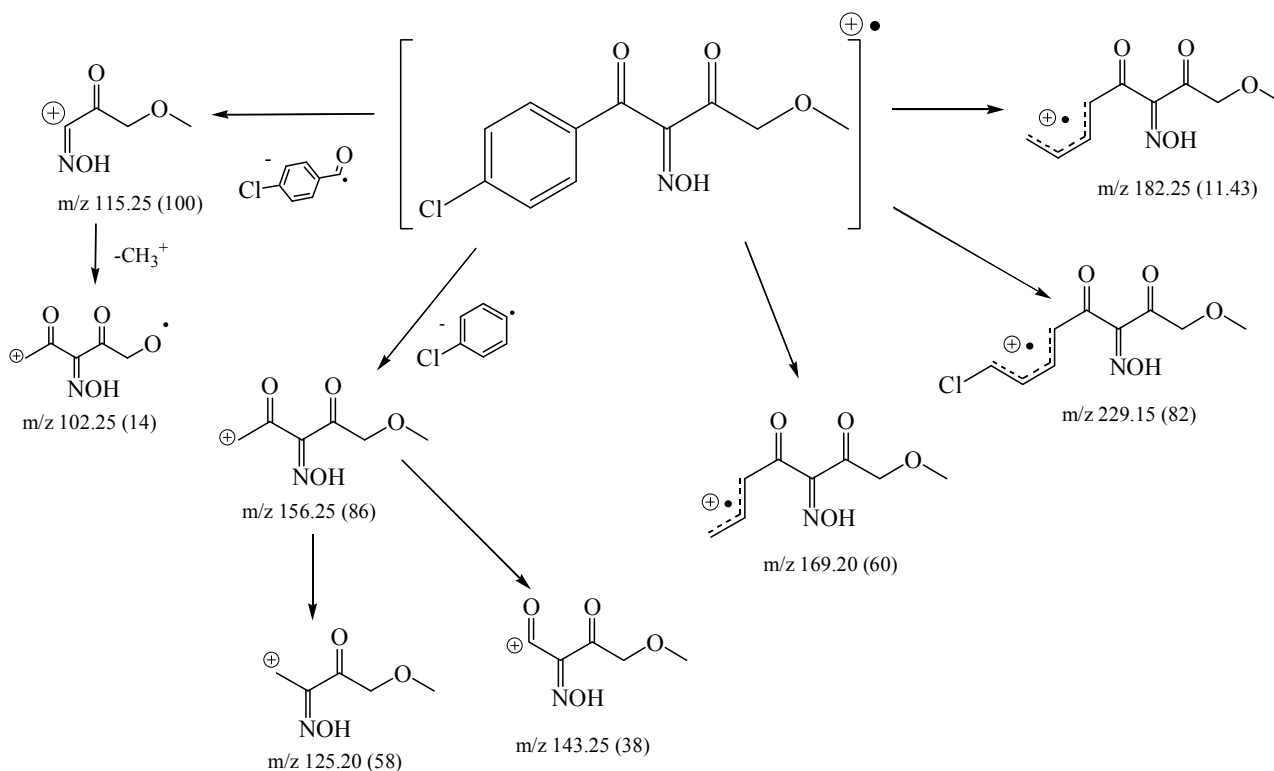
Рис. 1. Схема получения изонитрозодикетона с *p*-хлорфенильным заместителем

Рис. 2. Схема фрагментации 4-метокси-1-(4-хлорфенил)бутан-1,2,3-трион-2-оксима

Соответственно, получаем соединение с брутто-формулой  $C_{11}H_{10}NO_4Cl$ , что полностью соответствует изучаемому оксиму трикетона.

Таким образом, в ходе работы был выполнен изотопный анализ полученного изонитрозодикетона, подтверждена его брутто-формула и предложена схема его фрагментационного распада.

#### Библиографические ссылки

1. Синтез ранее неизвестного 1-(*p*-хлорфенил)-4-метокси-1,2,3-бутантриона-2-оксима и нитрозопиразола на его основе / В. В. Ефимов, Д. И. Персидская, А. В. Любяшкин, М. С. Товбис // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения : сб. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. 2017. Т. 1. С. 467–469.

2. Яшин Я., Яшин А. Основные тенденции развития хроматографии после 110-летия со дня ее открытия М. С. Цветом. М. : ООО «Интерлаб», 2014. 11 с.

3. Масс-спектры положительных и отрицательных ионов линейных метил фенилсилоксанов / В. Н. Бочкарев, А. Н. Поливанов, В. С. Фалько // Журн. общей химии. 1978. № 48. С. 858–861.

4. Тахистов В. В. Органическая масс-спектрометрия. Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1990. 222 с.

#### References

1. Sintez ranee neizvestnogo 1-*p*-Khlorfenil-4-metoksi-1,2,3-butantrion-2-oksima i nitrozopirazola na ego osnove [Synthesis of previous unknown 1-(*p*-chlorophenyl)-4-methoxy-1,2,3-butantrione-2-oxime and nitrosopyrazol on its basis] / V. V. Efimov, D. I. Persid-

skaya, A. V. Lyubyashkin, M. S. Tovbis // Sbornik statey po materialam vsrossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Lesnoy i khimicheskiy kompleksy problemy i resheniya" [Collection of articles on the materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Forest and Chemical Complexes – Problems and Solutions"]. 2017. Vol. 1. P. 467–469.

2. Yashin Ya., Yashin A. Osnovnye tendentsii razvitiya khromatografii posle 110 letiya so dnya eye otkrytiya M.S.Tsvetom [Main trends in the development of chromatography after the 110th anniversary of its discovery by M.S. Tsvet]. M. : Interlab LLC, 2014. 11 p.

3. Mass-spektry polozhitelnykh i otritsatelnykh ionov lineynykh metil fenilsiloksanov [Mass spectra of positive and negative ions of linear methyl phenylsiloxanes] / V. N. Bochkarev, A. N. Polivanov, V. S. Falko // Zhurn. general chemistry. 1978. 48. P. 858–861.

4. Takhistov V. V. Organicheskaya mass-spektrometriya [Organic mass spectrometry]. Leningrad: Science, 1990. 222 p.

© Персидская Д. И., Ефимов В. В.,  
Кукушкин А. А., Товбис М. С., 2018

УДК 547.368.2

## ПОЛУЧЕНИЕ НОВЫХ СУЛЬФАНИЛАМИДНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ АМИНОФЕНОЛОВ И УСТАНОВЛЕНИЕ ИХ СТРОЕНИЯ

И. Г. Поваров, Н. А. Шиленков, 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: povarov\_i@mail.ru

*Впервые получены 2,6-ди(этоксикарбонил)-3,5-диметил-N-(4-ацетамидобензолсульфонил)-4-аминофенол и 2,6-ди(метоксикарбонил)-3,5-диметил-N-(4-ацетамидобензолсульфонил)-4-аминофенол. Строение продуктов доказано с помощью ЯМР<sup>1</sup>H и ЯМР<sup>13</sup>C спектроскопии.*

*Ключевые слова: аминофенол сульфаниламид, сульфонилирование, ЯМР<sup>1</sup>H, ЯМР<sup>13</sup>C спектроскопия.*

## SYNTHESIS OF NEW SULPHANYLAMIDE DERIVATIVES OF AMINOPHENOLS AND THE VERIFICATION OF THEIR STRUCTURE

I. G. Povarov, N. A. Shilenkov, M. S. Tovbis

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

*2,6-di(ethoxycarbonyl)-3,5-dimethyl-N-(4-acetamidobenzenesulfonyl)-4-aminophenol and 2,6-di(methoxycarbonyl)-3,5-dimethyl-N-(4-acetamidobenzenesulfonyl)-4-aminophenol were synthesized for the first time. The structure of the products was proved by NMR<sup>1</sup>H and NMR<sup>13</sup>C spectroscopy.*

*Keywords: aminophenol, sulfanylamide, sulfonylation, NMR<sup>1</sup>H, NMR<sup>13</sup>C spectroscopy.*

Сульфаниламидные препараты являются группой синтетических antimicrobных препаратов широкого спектра действия в отношении как грамположительных, так и грамотрицательных микроорганизмов, введенных в медицинскую практику еще до открытия пенициллинов [1].

Сульфаниламиды имеют широкий спектр antimicrobной активности. В первую очередь, сульфаниламиды используются для лечения некоторых инфекций мочевого тракта, заболеваний, вызванных *Nocardia asteroides*, стрептококковых фарингитов, менингитов, менингококковых заболеваний, токсоплазмозов и др. [2]. Однако с годами сульфаниламидные препараты становятся все менее эффективными из-за высокой приспособляемости микроорганизмов. Поэтому получение новых сульфаниламидных препаратов становятся весьма актуальной задачей.

На кафедре органической химии и технологии органических веществ СибГУ непрерывно ведется синтез и изучение свойств ранее неизвестных соединений, обладающих полезными свойствами. Здесь был синтезирован ряд перзамещенных аминофенолов, содержащих сложноэфирные группы в 2,6 – положениях по отношению к гидроксилу [3].

Поэтому целью нашей работы стало получение новых сульфонилированных производных перзаме-

щенных аминофенолов, которые могут обладать биологической активностью. Для этого *n*-аминофенолы сульфонилировали *n*-ацетиламинобензол-сульфо-хлоридом по приведенной ниже схеме (рис. 1). В колбу, снабженную магнитной мешалкой, загружали 0,2 г замещенного аминофенола и 4 мл воды. Смесь размешивали и нагревали до 60 °С. В течение 1,5 часа попеременно небольшими порциями прибавляли по 0,2 г 4-ацетиламинобензолсульфохлаорида и по 0,059 г соды, следя за тем, чтобы реакция среды была слабощелочная. Затем смесь размешивали в течение еще 2-х часов, охлаждали до комнатной температуры. Для очистки от исходного аминофенола добавляли по каплям в реакционную массу концентрированную соляную кислоту до кислой реакции по Конго и смесь перемешивали ещё 30 минут при комнатной температуре.

Полученный осадок отфильтровывали и промывали водой от кислоты до нейтральной реакции, затем перекристаллизовывали из водного спирта, выпавший осадок отфильтровывали и сушили под вакуумом. Тонкослойная хроматограмма в элюенте толуол-этилацетат (1:1) показала индивидуальность продукта.

Выход 2,6-ди(этоксикарбонил)-3,5-диметил-N-(4-ацетамидобензолсульфонил)-4-аминофенола составил 80 %. Т<sub>пл.</sub> 150–152 °С.

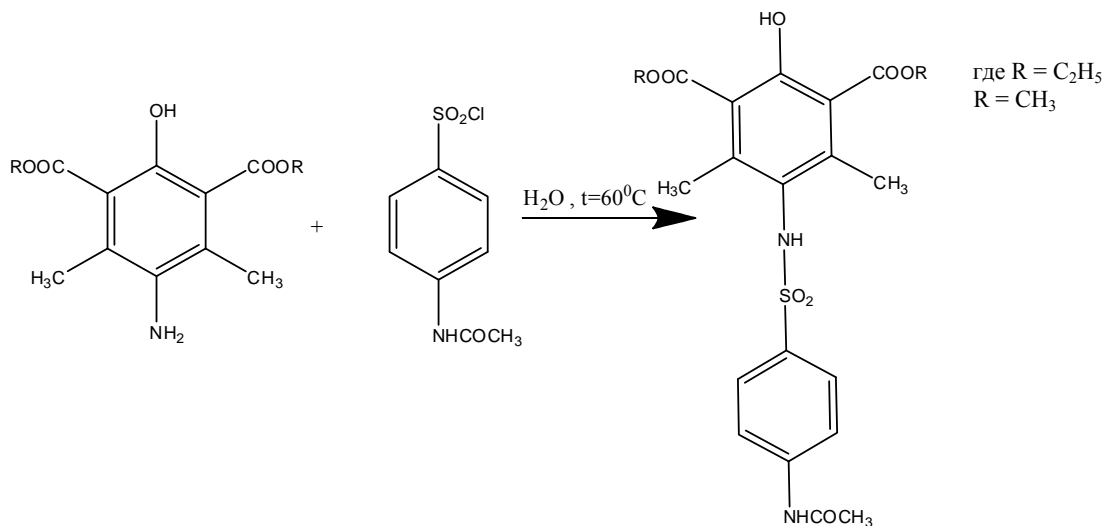
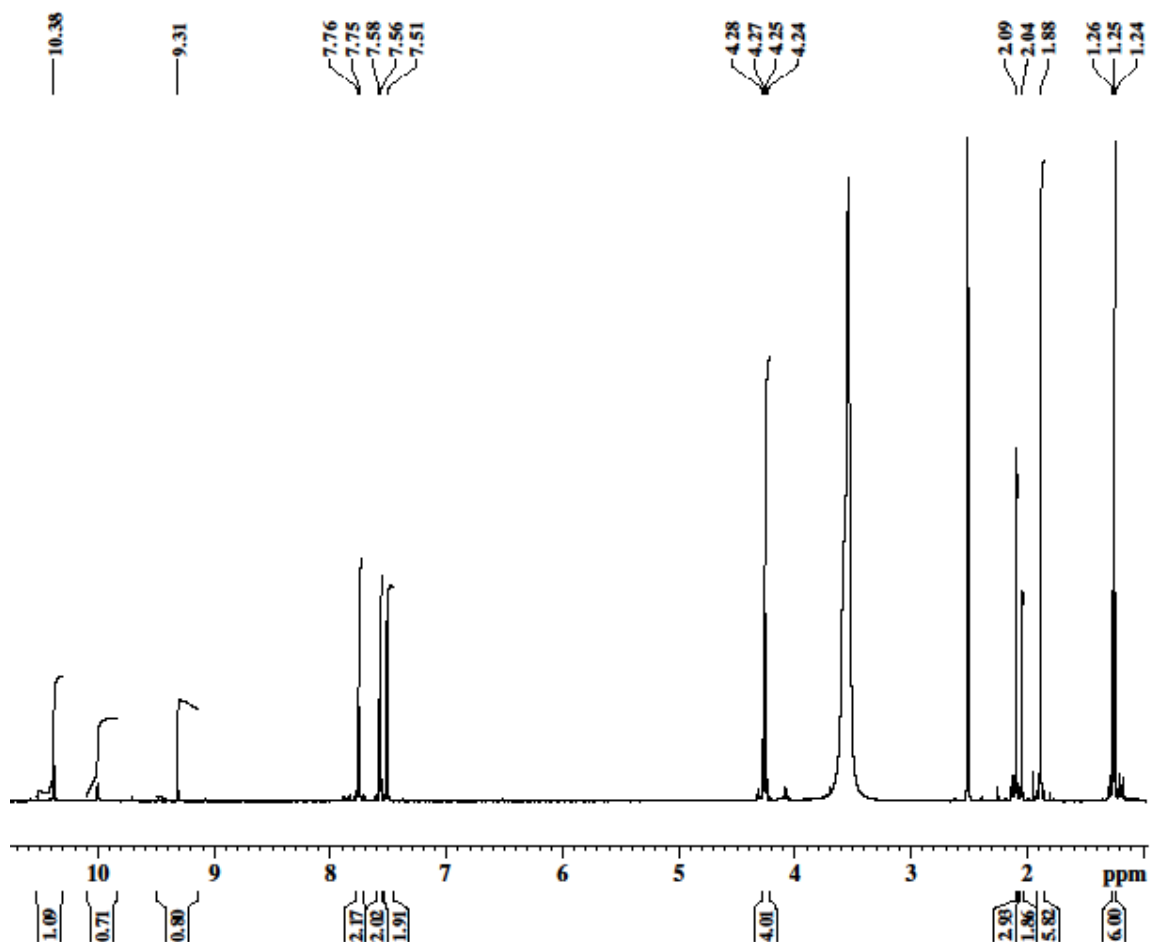


Рис. 1. Реакция сульфонирования аминофенолов с различными заместителями

Рис. 2. ЯМР-спектр 2,6-ди(этоксикарбонил)-3,5-диметил-сульфаниламида-4-аминофенол в ДМСО-d<sub>6</sub>

В ЯМР спектре в ДМСО-d<sub>6</sub> в слабом поле, присутствует сигнал протона ОН-группы в виде синглета с химсдвигом 9.93; синглет протона NH-группы с химсдвигом 10.38; синглет протона NH-группы тозилъного кольца с химсдвигом 9.31; 4 протона то-

зилъного кольца в виде двух дублетов с химсдвигом 7.56–7.76; 4 протона СН<sub>2</sub>-групп сложнэфирного остатка в виде квартета с химсдвигом 4.24–4.28; 3 протона СН<sub>3</sub>-группы тозилъного кольца в виде синглета с химсдвигом 2.09; 6 протонов СН<sub>3</sub>-групп аминофе-



нольного кольца в виде синглета с химсдвигом 1.88; 6 протонов  $\text{CH}_3$ -группы сложноэфирных остатков в виде триплета с химсдвигом 1.24–1.26. В спектре ЯМР<sup>13</sup>C присутствуют сигналы всех атомов углерода.

ЯМР<sup>1</sup>H спектр полученного продукта в гексадегидродиметилсульфоксиде приведен на рис. 2.

Выход 2,6-ди(метоксикарбонил)-3,5-диметилсульфаниламидо-4-аминофенол.  $T_{\text{пл}}$  200–202 °C, составил 75 %. В ЯМР<sup>1</sup>H спектре в ДМСО-d<sub>6</sub>,  $\delta$ , м. д.: 10.52 (1H, NH); 10.00 с (1H, OH); 9.72 с (1H, NH тозильного кольца); 7.70–7.85 д (4H, тозильного кольца); 3.89 с (6H,  $\text{COCH}_3$ ); 2.23 с (6H,  $\text{CH}_3$  аминофенольного кольца); 2.03 с (3H,  $\text{CH}_3$  тозильного кольца). В спектре ЯМР<sup>13</sup>C присутствуют сигналы всех атомов углерода.

#### Библиографические ссылки

1. Краснюк И. И., Михайлова Г. В. Практикум по технологии лекарственных форм : учеб. пособие. М. : Академия, 2006. 432 с.

2. Вартанян Р. С., Синтез основных лекарственных средств. М. : Медицинское информационное агентство, 2004. 845 с.

3. Синтез нового 4-амино-3,5-диметил-2,6-ди(этоксикарбонил)фенола и его сульфонилирование / И. Г. Поваров, В. А. Тетерина, Н. А. Шиленков и др. //

Химическая наука и образование Красноярья : сб. материалов X Юбилейной межрегион. науч.-практ. конф., посвящ. 85-летию КГПУ им. В. П. Астафьева (17–19 мая 2017, г. Красноярск). Красноярск, 2017. С. 110–114.

#### References

1. Krasnyuk I. I., Mikhailova G. V. Practice on the technology of medicinal forms. Tutorial. M. : Akademiya Publishing Center, 2006. 432 p.

2. Vartanyan R. S. Synthesis of essential medicines. M. : Medical News Agency, 2004. 845 p.

3. Synthesis of the new 4-amino-3,5-dimethyl-2,6-di(ethoxycarbonyl) phenol and its sulfonylation / I. G. Povarov, V. A. Teterina, N. A. Shilenkov et al. // Article in Sat. Materials of the 10th anniversary interregional scientific and practical conference “Chemical Science and Education of Krasnoyarsk”, dedicated to the 85th anniversary of the KSPU named after V. P. Astafyeva (May 17–19, 2017 Krasnoyarsk). Krasnoyarsk, 2017. P. 110–114.

© Поваров И. Г., Шиленков Н. А., Товбис М. С., 2018

**ИЗУЧЕНИЕ СМАЧИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ФЛЮСА, БРОМИДА ДИЭТИЛДИБЕНЗИЛАММОНИЯ, НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА МЕДЬ – ФЛЮС-СВЯЗКА**

Н. И. Полежаева

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: piv-80@mail.ru

*Поверхностный монтаж – современная технология монтажа компонентов на печатные платы при изготовлении электронных средств, широко используемых в ракетостроении. Монтажные соединения образуются в процессе пайки, для прохождения которой необходимо хорошее смачивание паяемых поверхностей. Показано, что в результате адсорбционного модифицирования твердой поверхности молекулами бромид диэтилдибензиламмония качественно меняется характер смачивания.*

*Ключевые слова: флюс, бромид диэтилдибензиламмоний, органическое связующее, полиэфирная смола, флюс-связка, поверхностное натяжение, смачивание, адгезия.*

**STUDY OF THE MIXING CAPACITY OF FLUX DIMETHYLBENZYLAMMONIUM BROMIDE, AT COPPER – FLUX PHASE BOUNDARY**

N. I. Polezhaeva

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: piv-80@mail.ru

*Surface-mount technology is a method for producing electronic devices and it's widely used in rocketry. Mounting connections forms in soldering process which requires of soldered surfaces to be well-wettable. It is shown, that absorbtive modification of solid surface with dimethylethylbenzylammonium bromide molecules changes wetting patterns.*

*Keywords: flux, dimethylethylbenzylammonium bromide, organic binder, polyester resin, flux binder, surface tension, wetting, adhesion.*

Монтажная (электромонтажная) пайка представляет собой процесс механического и электрического соединения металлических деталей с нагревом ниже температуры их расплавления путем смачивания и заполнения зазора между ними расплавленным припоем и сцепления за счет отверждения паяного шва. В процессе пайки развиваются реакции на границах жидкого, а потом и затвердевшего, припоя и поверхностей спаиваемых деталей. Течение твердофазных реакций определяется двумя механизмами: диффузией и процессами на границе фаз: жидкой (расплавленный припой) и твердой (соединяемые детали). Развитие процессов на границе раздела: припой – спаиваемые поверхности – проходит несколько стадий: адсорбция – адгезия – смачивание – физическое растворение или поверхностные химические реакции – сцепление. Конечным условием надежной пайки является смачивание поверхности соединяемых металлов припоем. Следовательно, главным требованием к флюсу является обеспечение хорошей смачиваемости поверхности паяного шва расплавленным припоем за счет уменьшения поверхностного натяжения припоя и улучшения его растекания по всем зазорам паяного шва [1].

При серийном производстве изделий ремонт дефектов, проявляющихся на конечных стадиях процесса пайки, становится все более сложным и дорогим, а зачастую даже невозможным. Наиболее распростра-

ненный дефект, связанный с низким уровнем смачиваемости или её отсутствием, – это «холодная пайка», которая обнаруживается только в процессе эксплуатации или на рентгеновском снимке изделия [2].

Изделия могут работать в условиях переменных температур и влажности, подвергаться ударным и вибрационным воздействиям. Если паяное соединение недостаточно прочное, в процессе эксплуатации в соединениях разовьются трещины, что приведет к разрушению паяного соединения. Поэтому при выборе паяльных паст показатель смачиваемости зачастую играет большую роль, чем время жизни паяльной пасты и липкость.

При смачивании жидкий припой растекается по поверхности контактных площадок и выводов электронных компонентов. Когда жидкость попадает на поверхность твердого тела, она принимает форму, которая определяется свойствами и жидкости, и твердого тела. Угол, образованный поверхностью жидкости и твердого тела в точке контакта, называют «углом контакта» [2].

Контактный угол определяли следующим образом: на обезжиренную ацетоном медную подложку наносили каплю полиэфирной смолы, модифицированной канифолью, и флюс-связку, полиэфирную смолу с введенным в неё флюсом, бромидом диэтилдибензиламмония.

**Краевой угол смачивания, поверхностное натяжение, работа адгезии и работа смачивания полиэфирной смолы и флюса-связки, полиэфирной смолы и йодида диметилэтилфенилammония при 25 °С**

Исследуемая система	$\cos \theta$	$\sigma_c$ , мДж/м <sup>2</sup>	$W_{ад}$ , мДж/м <sup>2</sup>	$W_{см}$ , мДж/м <sup>2</sup>
Полиэфирная смола, модифицированная канифолью	0,50	72,79	109,19	36,40
Полиэфирная смола + бромид диэтилдибензиламмония	0,38	70,72	97,62	26,88

После установления равновесия в системе, подложку с нанесенной на ней каплей фотографировали. Величину угла смачивания измеряли между твердой поверхностью и касательной, проведенной к поверхности капли в точке соприкосновения твердой, жидкой, газообразной фаз. Измерение угла производили со стороны жидкости [3].

Если жидкость или твердое тело имеют поверхность раздела с другой жидкостью или твердым телом, то между ними проявляется адгезия (прилипание).

Количественно адгезия оценивается работой адгезии  $W_{ад}$ , которая соответствует работе, затрачиваемой на разрыв межфазного соединения и приходящейся на единицу площади поверхности. Её можно рассчитать по уравнению Дюпре–Юнга:

$$W_{ад} = \sigma_{ж/г} (1 + \cos \theta). \quad (1)$$

Для нахождения величины поверхностного натяжения на границе раздела флюс-связка – воздух ( $\sigma_{ж/г}$ ) использовали метод наибольшего давления пузырьков [4].

Явления адгезии и смачивания тесно связаны между собой. Влияние смачивания на адгезионное взаимодействие отражает уравнение (1). Из этого уравнения видно, что чем лучше смачивание (меньше  $\theta$ ), тем больше работа адгезии.

Степень взаимодействия медной поверхности подложки с флюсом-связкой определяли по работе смачивания ( $W_{см}$ ). Для расчета  $W_{см}$  использовали уравнение

$$W_{см} = \sigma_{ж/г} \cos \theta. \quad (2)$$

В таблице представлены значения косинуса краевого угла смачивания, поверхностного натяжения, работы адгезии и работы смачивания.

При нанесении флюса-связки на медную подложку образуется граница раздела фаз флюс-связка – медь на которой адсорбируются молекулы бромид диэтилдибензиламмония. Благодаря свойству дифильности молекулы ПАВ на границе раздела фаз начинают ориентироваться в соответствии с принципом уменьшения свободной поверхностной энергии Гиббса: лиофобные (неполярные группировки молекул) поворачиваются к лиофобной медной подложки, а лиофильные (полярные) поворачиваются к раствору флюса-связки.

Образующийся монослой из молекул ПАВ лиофилизует поверхность медной подложки. Величины работ адгезии и смачивания (см. таблицу), показывают, что введение в полиэфирную смолу, модифицированную канифолью, флюса – бромид диэтилдибензиламмония улучшается смачивание флюсом-связкой поверхности медной подложки, в результате адсорб-

ционного модифицирования твердой поверхности молекулами флюса.

#### Библиографические ссылки

1. Медведев А. М. Сборка и монтаж электронных устройств. М. : Техносфера, 2007. 256 с.
2. Нижник М. Паяльные пасты: все о главном. Ч. 1 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mettatron.ru/stati/103-payalnye-pasty-vse-o-glavnom-chast-1> (дата обращения: 04.09.2018).
3. Нижник М. Паяльные пасты: все о главном. Ч. 2 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mettatron.ru/stati/103-payalnye-pasty-vse-o-glavnom-chast-2> (дата обращения: 04.09.2018).
4. Полежаева Н. И., Мосин И. О. Исследование влияния флюса, йодида диметилэтилфенилammония, на смачивание и адгезию на границе раздела медь – флюс-связка // Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф (08–11 ноября 2017, Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред Ю. Ю. Логинова ; СибГТУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2017. С. 57–58.
5. Лабораторные работы и задачи по коллоидной химии / под ред. Ю. Г. Фролова, А. С. Гродского. М. : Химия, 1986. 216 с.

#### References

1. Medvedev A. M. *Sborka i montazh elektronnykh ustroystv* [Assembly and installation of electronic devices]. Moscow, Teknosfera Publ., 2007. 256 p.
2. Nizhnik M. solder pastes: all about the main thing. Part 1. [Assembly and installation of electronic devices]. Available at: <https://www.mettatron.ru/stati/103-payalnye-pasty-vse-o-glavnom-chast-1> (accessed: 09.04.2018).
3. Nizhnik M. solder pastes: all about the main thing. Part 2. [Assembly and installation of electronic devices]. Available at: <https://www.mettatron.ru/stati/103-payalnye-pasty-vse-o-glavnom-chast-2> (accessed: 09.04.2018).
4. Polezhaeva N. I., Mosin I. O. Investigation of the effect of flux, dimethylethylphenylammonium iodide, on wetting and adhesion at the copper-flux-bond interface // Reshetnevsky readings: materials XXI Intern. Research. conf. (08–11 November, 2017, Krasnoyarsk): at 2 parts / under the total. Ed Yu. Yu. Loginova ; Siberian State University of Science and Technology Academician M. F. Reshetnev. Krasnoyarsk, 2017. P. 57–58.
5. Frolov U. G., Grodskiy A. S. *Laboratornye raboty i zadachi po kolloidnoy khimii* [Colloid chemistry laboratory works and assignments]. Moscow, Khimiya Publ., 1986. 216 p.

© Полежаева Н. И., 2018

## РАЗРАБОТКА ОРГАНИЧЕСКОГО СВЯЗУЮЩЕГО ДЛЯ ПАЯЛЬНЫХ ПАСТ СО СТРОГО ЗАДАНЫМИ РЕОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Н. И. Полежаева

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: piv-80@mail.ru

*Технологией поверхностного монтажа изготавливаются электронные изделия, широко используемые в ракетостроении. В паяльных пастах, основном композиционном материале для данной технологии, применяются органические связующие, обеспечивающие строго заданную реологию паст. В работе исследовано реологическое поведение концентрированных растворов полиэфирной смолы.*

*Ключевые слова: технология поверхностного монтажа, паяльная паста, органическое связующее, растворы полиэфирной смолы, вязкость, энергия активации вязкого течения.*

## DEVELOPMENT OF ORGANIC BINDER FOR SOLDER PASTE WITH STRICTLY SPECIFIED RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS

N. I. Polezhaeva

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: piv-80@mail.ru

*Surface mount technology made electronic products, widely used in the rocket science. The solder pastes, mainly for the composite material of the technology used organic binders provide strictly predetermined rheology pastes. We have investigated the rheological behavior of concentrated solutions of the polyester resin.*

*Keywords: surface mount technology, soldering paste, organic binder, solutions of polyester resin, viscosity, energy, viscous flow activation energy.*

Электронная промышленность развивается, и плотность монтажа компонентов на печатной плате растёт, а размер компонентов уменьшается. Из-за этого требования к характеристикам и качеству паяльных паст ужесточаются [1].

Флюсы, входящие в состав паяльных паст, оказывают наибольшее влияние на качество печати. Флюс паяльной пасты – довольно сложная химически активная смесь растворителей, лубрикантов и др., обладающих разной вязкостью, тиксотропностью, химической активностью. Оптимизация конечных свойств подобной смеси имеет важное значение для качества печати [2].

Вязкость паяльной пасты влияет на растекаемость и другие свойства, отвечающие за качество печати. Тиксотропные добавки обеспечивают устойчивость пасты к напряжениям сдвига при печати. Это свойство обеспечивает восстановление вязкостных показателей (стойкость к осадке) при непрерывной печати. Тиксотропные вещества называются восками. Воски делают пасту устойчивой к механическим напряжениям, возникающим при ракульной печати, и снижают трение пасты о стенку, что важно для нормального отделения трафарета [2].

Скорость испарения растворителей, входящих в состав паяльных паст, определяет время жизни паяльной пасты. Различают время жизни паяльной пасты на

трафарете и время жизни после нанесения. Поскольку на контактную площадку наносится маленькое количество пасты, время жизни после нанесения зачастую меньше, чем на трафарете. Для обеспечения высокого качества паяльных паст в состав флюса вводится более 14 растворителей с температурами кипения до 220–290 °С. При использовании только низкокипящих растворителей с высокой скоростью испарения паста на трафарете высыхает слишком быстро [2].

Реологические исследования паст и исходных материалов позволяют классифицировать пасты по их реологическим характеристикам, получать органические связующие для паст со строго заданной реологией, управлять технологическим процессом приготовления паст и их нанесения. Реологические свойства пасты определяют ее поведение на трафарете, геометрические характеристики отпечатка и характер изменения их во времени [3–5].

Пасты относятся к категории неньютоновских жидкостей, в которых вязкость изменяется при заданных температуре и давлении и зависит от скорости деформации сдвига, конструктивных особенностей устройств для их нанесения и предыстории жидкости. Основное влияние на поведение паст в процессе печати оказывают природа и реологические характеристики используемого в их составе органического связующего.

**Эффективные энергии активации вязкого течения концентрированных растворов полиэфирной смолы, модифицированной канифолью**

Концентрация полиэфирной смолы масс. %	$E_a$ (кДж/моль) в интервале температур					
	20–30 °С	30–40 °С	40–50 °С	50–60 °С	60–70 °С	70–80 °С
66,7	89±2	87±2	71±2	69±2	63±2	42±2
69,6	101±2	88±2	81±2	72±2	71±2	62±2
75,0	103±2	97±2	79±2,0	76±2	69±2	66±2

Реология паст начинается с приготовления органического связующего со строго заданными реологическими характеристиками.

Для подбора необходимых вязкостных свойств органического связующего готовили растворы различной концентрации полиэфирной смолы, модифицированной канифолью, в бензиловом спирте [6].

Температурная зависимость вязкости полимеров существенно влияет на их технологические свойства, поскольку чувствительность вязкости к изменению температуры определяет не только выбор режима пайки, но и влияет на её качество. Вязкость органического связующего для паст должна минимально зависеть от температуры.

Для анализа изменения вязкости при переходе от одного температурного интервала к другому был выбран узкий температурный диапазон. Эффективные энергии активации вязкого течения растворов полиэфирной смолы в температурных интервалах рассчитывались по экспериментально найденным величинам вязкости (см. таблицу) по формуле

$$E_a = \frac{RT_1T_2}{T_1 - T_2} \ln \frac{\eta_{T_2}}{\eta_{T_1}}$$

Полученные значения энергий активации вязкого течения растворов полиэфирной смолы в 50...100 кДж/моль (см. таблицу) по числовым значениям соизмеримы с энергиями химических связей в макромолекулах и определяются числом и эффективностью пространственной сетки зацеплений формирующейся в концентрированном растворе полимера за счет межмолекулярных взаимодействий.

Полиэфирная смола содержит в сегменте цепи в среднем по 3 карбоксильные и 6 оксофункциональных групп. Расчет показывает, что если энергия активации течения низкомолекулярных жидкостей 5...7 кДж/моль, то энергия активации вязкого течения растворов полиэфирной смолы должна составлять 50...70 кДж/моль, что хорошо согласуется с экспериментальными данными (см. таблицу). Также свой вклад в величину энергии активации вязкого течения вносит наличие разветвлений в цепях полиэфирной смолы.

Увеличение энергии активации с повышением концентрации полиэфирной смолы объясняется уменьшением гибкости цепи полимера и увеличением межмолекулярного взаимодействия.

### Библиографические ссылки

1. Нижник М. Паяльные пасты: все о главном. Ч. 1 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mettatron.ru/stati/103-payalnye-pasty-vse-o-glavnom-chast-1> (дата обращения: 04.09.2018).
2. Нижник М. Паяльные пасты: все о главном. Ч. 2 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mettatron.ru/stati/103-payalnye-pasty-vse-o-glavnom-chast-2> (дата обращения: 04.09.2018).
3. Taylor B. E., Slutsky J., Larry J. R. Technology of electronic grade solder pastes // Solid-State Technology. 1981. Sept. P. 127–135.
4. Miller L. T. Screenability and Rheology // Solid State Technology. 1974. Vol. 17. P. 39–43.
5. Попов И. Г., Георгиев Н. П. Реологические свойства резистивных паст // Электронная техника. Сер. 6. Материалы, 1980. Вып. 5 (142). С. 109–111.
6. Исследование реологических свойств концентрированных растворов полиэфирной смолы, модифицированной канифолью / Н. И. Полежаева, А. Ю. Радзюк, В. А. Бабкин и др. // Химия растительного сырья. 2010. № 4. С. 171–175.

### References

1. Nizhnik M. solder pastes: all about the main thing. Part 1. [Assembly and installation of electronic devices]. Available at: <https://www.mettatron.ru/stati/103-payalnye-pasty-vse-o-glavnom-chast-1> (accessed: 09.04.2018).
2. Nizhnik M. solder pastes: all about the main thing. Part 2. [Assembly and installation of electronic devices]. Available at: <https://www.mettatron.ru/stati/103-payalnye-pasty-vse-o-glavnom-chast-2> (accessed: 09.04.2018).
3. Taylor B. E., Slutsky J., Larry J. R. Technology of electronic grade solder pastes // Solid-State Technology. 1981. Sept. P. 127–135.
4. Miller L. T. Screenability and Rheology // Solid State Technology. 1974. Vol. 17. P. 39–43.
5. Popov I. G., Georgiev N. P. Reological properties of resistive pastes // Electronic equipment. Se. 6. 1980. P. 109–111.
6. Investigation of the rheological properties of concentrated solutions of polyester resin modified with rosin N. I. Polezhaeva, A. Y. Radziuk, V. A. Babkin et al. // Chemistry of plant raw materials. 2010. No. 4. P. 171–175.

УДК 547.562.4+543.544.5.068.7

**ВЭЖХ/МС-АНАЛИЗ ПАРА-НИТРОЗОФЕНОЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ ПИРИДИНОВЫЙ ФРАГМЕНТ**

А. Д. Раджабов, А. А. Кукушкин, Е. В. Роот, 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: amirrajabov1997@gmail.com

*Проведено исследование состава пара-нитрозофенолов, содержащих пиридиновый фрагмент, с помощью ВЭЖХ/МС.*

*Ключевые слова: ВЭЖХ/МС, пара-нитрозофенолы, пиридиновый фрагмент, фрагментационный распад.*

**HPLC/MS ANALYSIS OF PARA-NITROSOPHENOLS CONTAINING PYRIDINE FRAGMENT**

A. D. Rajabov, A. A. Kukushkin, E. V. Root, G. A. Suboch

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
 E-mail: amirrajabov1997@gmail.com

*In this article, showed research the compounds of para-nitrosophenoles with pyridine fragment, by HPLC / MS.*

*Keywords: HPLC/MS, para-nitrosophenoles, pyridine fragment, fragmentation decay.*

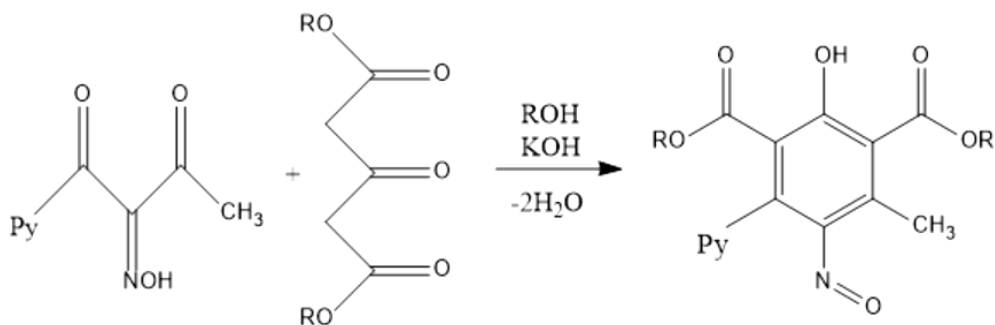
Ранее нами были синтезированы гексазамещенные нитрозофенолы с пиридиновым заместителем в ароматическом ядре [1; 2] (см. рисунок). Полученные нитрозофенолы являются ценными полупродуктами для получения аминофенолов, которые могут обладать полезными биологическими свойствами и могут быть в дальнейшем использованы как потенциальные лекарственные препараты.

Введение в сложноэфирную группу алкильного заместителя С4–С5 увеличивает полезную область применения циклоконденсации бета-дикетонов, содержащих пиридиновый фрагмент с эфирами ацетондихлорановой кислоты. Это объясняется лучшей жирорастворимостью алкильных заместителей по сравнению с заместителями С1–С2.

На настоящий момент строение нитрозофенолов (1–4) было доказано только с помощью методов

УФ-спектроскопии. Известно, что масс-спектропия успешно используется для анализа органических соединений. На основе данных по молекулярному иону и характеру фрагментации можно идентифицировать органическое соединение [3]. Поэтому целью данной работы является установление состава полученных пара-нитрозофенолов, содержащих пиридиновый фрагмент с помощью ВЭЖХ/МС.

Спектры полученных соединений регистрировались на квадрупольном масс-спектрометре с электронапылительным источником ионов Shimadzu LC/MS-2020 на колонке RAPTOR ARC-18 100 (диаметр 2,1 мм, зернистость 0,1 мм, длина 100 мм). Исследуемые образцы веществ растворяли в ацетонитриле с концентрацией 0,01 мг/мл, запись проводилась в изотоническом режиме, при  $t = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$  в термостатируемой колонке.



1 R = Bu,  $\gamma$ -Py, 2 R = Bu,  $\beta$ -Py 3 R = i-Am,  $\gamma$ -Py 4 R = i-Am,  $\beta$ -Py

Получение пара-нитрозофенолов, содержащих пиридиновый фрагмент

Запись спектров проводили в режиме электроннапыления при прямом вводе образца и элюата. Ввод образца в хроматограф осуществляли с использованием автоплунжерного насоса со скоростью 10 мкл/мин.

Для регистрации масс-спектров были подобраны следующие условия: положительная поляризация, напряжение электроспрея 5500,0 В, потенциал декластеризации и потенциал ввода – соответственно 60 В при давлении газа завесы 5,0 psi и газа распыления 15,0 psi, скорость 10 мкл/мин. Диапазон сканирования составлял 20–500 Да.

Во всех спектрах для всех соединений **1–4** имелись молекулярные ионы  $[M/Z]$ ,  $[M/Z+1]$  и  $[M/Z+2]$  соответствующие рассчитанным. Кроме того, для всех нитрозофенолов была выявлена общая закономерность распада молекулы при ионизации электроспреем. Сначала раскрывается кольцо пиридинового заместителя (молекулярные ионы: **1** – 414,5, 403, 390, 378, 365, 351 Да; **2** – 414,5, 401, 374, 359, 348 Да; **3** – 442, 432, 428, 416, 398, 386 Да; **4** – 442, 434, 416, 402, 388, 373 Да), это возможно объясняется не строго компланарным перекрытием  $\pi$ -орбиталей пиридинового и бензольного колец в пара-нитрозофеноле содержащем пиридиновый заместитель. Дальнейший распад молекулы протекает по нитрозогруппе (молекулярные ионы: **1** – 337, 323 Да; **2** – 332, 308 Да; **3** – 377, 342 Да; **4** – 373, 345 Да) соответственно, дальнейшее расщепление идет по связи С-С метильной группы связанной с бензольным кольцом (молекулярные ионы: **1** – 295 Да; **2** – 292 Да; **3** – 295 Да; **4** – 317 Да) и раскрытием ароматического ядра (молекулярные ионы: **1** – 266, 250 Да; **2** – 278, 266, 245 Да; **3** – 281, 183 Да; **4** – 303, 262 Да), затем расщепляются сложноэфирные группы по связям С-С. Во всех спектрах соединений **1–4** имеется устойчивый молекулярный ион высокой интенсивности  $m/e^+$  (**1–2** 184–186 Да; **3–4** 142 Да).

Четная молекулярная масса веществ подтверждает наличие двух атомов азота в соединениях. Отношение  $[M/Z]$  к  $[M/Z+1]$  и  $[M/Z+2]$  доказывает наличие 6 ато-

мов кислорода в нитрозофенолах **1–4**; углеродный состав соответствует рассчитанному.

Наличие молекулярных ионов в спектрах нитрозофенолов **1–4**, изотопный анализ и аналогия в распаде молекул при ESI однозначно доказывают их состав.

### Библиографические ссылки

1. Синтез гамма-пиридилзамещенных паранитрозофенолов с бутоксикарбонильными заместителями / А. Д. Раджабов, А. А. Кукушкин, Е. В. Роот, М. С. Товбис // Химия и химическая технология в XXI веке. 2018. С. 223–224.
2. Синтез 2,6-диизоамилоксикарбонил-3(5)-метил-5(3)-(пиридин-4-ил)-4-нитрозофенолята калия / А. Д. Раджабов, А. А. Кукушкин, Е. В. Роот и др. // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. 2018. С. 67–68.
3. Спектрометрическая идентификация органических соединений : пер. с англ. / Р. Сильверстейн, Ф. Вебстер, Д. Кимл. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. 557 с. (Методы в химии).

### References

1. Sintez gamma-piridilzameshchennykh paranitrozofenolov s butoksikarbonilnymi zamestitelyami / A. D. Radzhabov, A. A. Kukushkin, E. V. Root, M. S. Tovbis // Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya v XXI veke. 2018. P. 223–224.
2. Sintez 2,6-diizoamiloksikarbonil-3(5)-metil-5(3)-(piridin-4-il)-4-nitrozofenolyata kaliya / A. D. Radzhabov, A. A. Kukushkin, E. V. Root et al. // Molodezh. Obshchestvo. Sovremennaya nauka, tekhnika i innovatsii. 2018. P. 67–68.
3. Spektrometricheskaya identifikatsiya organicheskikh soyedineniy / R. Silversteyn, F. Vebster, D. Kiml ; per. s angl. M. : BINOM. Laboratoriya znaniy. 2014. 557 p. (Metody v khimii).

© Раджабов А. Д., Кукушкин А. А., Роот Е. В., Субоч Г. А., 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

### Секция

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

<b>Алякрецкий Р. В., Михеев А. Е., Крушенко Г. Г., Решетникова С. Н., Двирный Г. В.</b> Повышение качества поверхности металлоизделий .....	5
<b>Ананьев В. В., Зайцев Р. В., Гусев В. Ю., Демченко А. И., Скачков И. А.</b> Разработка головки для орбитальной сварки неповоротных стыков изделий цилиндрической формы .....	7
<b>Брылев Р. С., Руденко М. С., Пикулин С. А., Кольга В. В.</b> Конструирование универсального устройства для монтажа стабилизаторов модели ракеты .....	9
<b>Гордовенко М. А., Михнёв М. М.</b> Анализ конструкции приспособления для формования размеростабильных рефлекторов антенн космического аппарата .....	12
<b>Едигеева Л. С.</b> Тросовая система, применимая для космических лифтов и орбитальных перелетов .....	15
<b>Замятин Д. А.</b> Проектирование анизотридного адаптера для космического аппарата .....	17
<b>Замятин Д. А., Баранова Е. Г.</b> Особенности космической платформы информационного обеспечения .....	19
<b>Ишков С. А., Фадеев П. В., Филиппов Г. А.</b> Проектно-баллистический анализ космического аппарата для сбора космического мусора на геостационарной орбите на базе платформы «Экспресс-2000» .....	22
<b>Климовский Д. А., Смирнов Н. А.</b> Кантование изделий ракетно-космической техники на механизме параллельной структуры с гибкими звеньями .....	25
<b>Козлов В. С.</b> Распределение давления на поверхности рефлектора антенны .....	27
<b>Коловский И. К., Подолякин В. Н., Шмаков Д. Н.</b> Баллистическое построение орбитальной группировки «Гонец-М» для организации межспутниковой линии связи внутри орбитальной плоскости .....	30
<b>Коловский И. К., Подолякин В. Н., Шмаков Д. Н.</b> Оценка использования баллистических данных NORAD для космических аппаратов «Гонец-М» на низкой круговой орбите .....	32
<b>Костарев И. С., Лекарев А. Ф.</b> Оптимизация управления по балансу необходимой и накопленной в системе энергии .....	34
<b>Красилова Е. В., Пикулин С. А.</b> Анализ возможности мониторинга солнечного ветра с помощью микроспутника .....	37
<b>Крушенко Г. Г., Елфимова М. В., Решетникова С. Н., Кузнецов А. Д., Кукушкин И. В.</b> Применение алюминий-магниевого сплава для изготовления литых деталей летательных аппаратов .....	39
<b>Мироненко Е. Д., Авкельгин С. В.</b> Разработка узла регулировки натяжения вант для закрепления композитного бака высокого давления .....	41
<b>Орлин П. А., Руденко М. С.</b> Технология вакуумно-магнетронного напыления покрытий на элементы космического аппарата .....	44
<b>Пекарская И. В., Остапенко А. В.</b> Использование экранно-вакуумной теплоизоляции для емкостей хранения криогенных компонентов .....	46
<b>Пикулин С. А., Красилова Е. В.</b> Применение топологической оптимизации при проектировании беспилотных космических аппаратов .....	48
<b>Реготов Г. А., Марченко И. А.</b> Оценка возможности применения электроосмотического насоса в однофазном контуре системы терморегулирования .....	50
<b>Скачков И. А., Ананьев В. В., Гусев В. Ю., Злобин С. К., Зайцев Р. В.</b> Технологические мероприятия по обнаружению дефектов сварных и паяных соединений трубопроводов .....	52
<b>Стукалов А. А., Шатров А. К.</b> Эффективность применения вставок в элементы сотовых конструкций в машиностроительном производстве .....	54



<b>Тарасов В. И., Слабиков Б. А., Крицкий С. П., Григорьева И. В., Садковская Н. Е.</b> Прогрессивные технологии коммутации фотопреобразователей космического назначения в производстве солнечных батарей .....	56
<b>Фалькова Е. В., Климовский Д. А., Назарова Л. П., Фесенко Е. Н., Вайкус А. Л.</b> Определение положения равновесия кантователя на основе механизма параллельной структуры с гибкими звеньями .....	58
<b>Финк В. А., Чагай Т. А., Кольга В. В.</b> Исследование свойств воспламенителей, используемых в моделях твердопливных двигателей .....	60
<b>Худоногова Т. Ю., Азингареев В. В., Слепнева Н. Г.</b> Анализ различных дефектов, возникающих в изделиях при их изготовлении методом газостатического изотермического прессования .....	62
<b>Шестаков И. Я., Пшенко Е. Б., Шестаков В. И.</b> Исследование электроактиватора воды с коаксиальным расположением электродов .....	64

## Секция

**«КРУПНОГАБАРИТНЫЕ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ»**

<b>Азин А. В., Пономарев С. В., Рикконен С. В., Марицкий Н. Н., Кузнецов С. А.</b> Разработка прецизионных приводов для систем регулировки формы отражающей поверхности рефлектора космического аппарата .....	67
<b>Ананьев В. В., Голованова В. В.</b> Термоэлектрический охладитель грунта .....	70
<b>Ануфриенко В. Е., Васильева Т. С., Скрябин В. В., Агеев П. О.</b> Методика оптимизации геометрических размеров сетчатой балки треугольного сечения, выполненной из композиционных материалов .....	73
<b>Анциферов А. А., Двирный В. В.</b> Конструкторско-технологическая разработка корпуса мотора-редуктора .....	75
<b>Баданин Е. И., Лавриненко А. И.</b> Система вывесок для раскрытия панелей батарей солнечных в условиях гравитации Земли .....	77
<b>Белоглазов А. П., Еремин А. Г., Ладыко М. А.</b> Исследование возможности использования углеродного материала в конструкции холодильника-излучателя космического аппарата .....	80
<b>Бернс В. А., Жуков Е. П., Лысенко Е. А., Маленкова В. В., Лакиза П. А.</b> Исследование способа выявления трещин по портретам вынужденных колебаний .....	82
<b>Бернс В. А., Левин В. Е., Красноруцкий Д. А., Жуков Е. П., Лакиза П. А.</b> Модальный анализ макета антенны космического аппарата по результатам испытаний его составных частей .....	84
<b>Братышева В. Е., Орлов Д. В.</b> Особенности бортовых антенно-фидерных устройств космических аппаратов .....	86
<b>Величко А. И., Кисанов Ю. А., Церихов В. И., Матросова И. В.</b> Ободной крупногабаритный космический рефлектор со стойками повышенной жёсткости .....	88
<b>Вехов А. С., Титаренко С. А.</b> Применение аддитивных технологий в современном производстве .....	90
<b>Воронина С. Ю., Власов А. Ю., Пасечник К. А., Обверткин И. В.</b> Оценка интеллектуальных свойств композита на основе полимерной матрицы с памятью формы в разворачиваемых конструкциях .....	93
<b>Ворончихин В. Д., Свередюк В. В.</b> Основные принципы создания углеродсодержащих токопроводящих клеевых композиций .....	95
<b>Голдобин Н. Н.</b> Анализ эффективности орбитальной юстировки крупногабаритного рефлектора .....	97
<b>Джан Ц., Зимин В. Н., Крылов А. В., Чурилин С. А.</b> Некоторые аспекты моделирования динамики трансформируемых космических конструкций .....	100
<b>Евдокимов А. С., Валишевский О. К., Шендалев Д. О.</b> Оптимизация схемы армирования штанги рефлектора для снижения температурных деформаций .....	103
<b>Жуков А. П., Валишевский О. К., Шендалев Д. О., Евдокимов А. С., Пономарев С. В., Пономарев В. С., Величко А. И., Халиманович В. И.</b> Конструкция крупногабаритного зонтичного рефлектора с шестью спицами .....	105

<b>Завьялов П. С., Кравченко М. С., Уржумов В. В., Куклин В. А., Михалкин В. М.</b>	
Исследование метрологических характеристик системы PulsESPI применительно к прецизионному контролю термодетформаций .....	107
<b>Зайцева Т. С.</b> Фенопласты, содержащие фенолформальдегидные смолы .....	110
<b>Зоммер С. А., Немчинов С. И.</b> Проектирование трансформируемой штанги ферменной конструкции для антенных систем космического аппарата .....	112
<b>Иванов А. В., Шальков В. В.</b> Проектирование механизма раскрытия зонтичного рефлектора с жесткой центральной частью .....	114
<b>Иголкин А. А., Сафин А. И., Филипов А. Г.</b> Модальный анализ динамического макета малого космического аппарата .....	117
<b>Исеева О. А., Писарев М. С., Двирный В. В., Крушенко Г. Г.</b> Перспективы применения полимеров с памятью формы в космической индустрии .....	119
<b>Калабегашвили Г. И., Бикеев Е. В., Матыленко М. Г.</b> Выбор устройства для орбитальной юстировки рефлектора крупногабаритной трансформируемой антенны .....	121
<b>Кисанов Ю. А., Мешковский В. Е., Сдобников А. Н., Чурилин С. А.</b> Численное моделирование крупногабаритных разворачиваемых отражателей космических систем ферменного типа .....	123
<b>Кожевникова Л. А.</b> Солнечные элементы и батареи космического применения .....	126
<b>Копылов В. М.</b> Способ измерения малых колебаний полезной нагрузки космических аппаратов .....	128
<b>Кочеткова С. С., Чичурин В. Е., Лайзан В. В., Болгов В. В., Тайгин В. Б.</b> Силовая рама как элемент конструкции крупногабаритного рефлектора .....	131
<b>Крючек С. Д.</b> Способ соединения полиимидных пленок для экранно-вакуумной теплоизоляции космических аппаратов .....	133
<b>Кудрявцев И. В., Гоцелюк О. Б.</b> Напряженно-деформированное состояние ленточного штыря в транспортировочном положении .....	135
<b>Лихачев А. Н.</b> Применение термоактивных полимерных композитов для реализации задачи реконфигурации конструкций авиационно-космической техники .....	137
<b>Мартынова Е. Ю., Пестов А. Б.</b> Повышение энергоэффективности системы электропитания космического аппарата за счет использования энергии электростатического заряда .....	139
<b>Масалимов Р. Ф.</b> Преимущества использования ПКМ с интеллектуальной матрицей при изготовлении рефлекторов .....	141
<b>Мельник А. М., Двирный В. В.</b> Современные технологии, позволяющие повысить эффективность фрезерной обработки сотовых панелей .....	143
<b>Минаев О. А.</b> Проблемы и их решения при формовании стрингеров сложной конфигурации .....	146
<b>Моисеев П. П., Викторов А. И.</b> Система управляемого последовательного разворачивания панелей солнечной батареи .....	148
<b>Морозков И. С., Трофимова М. А., Уханев С. А.</b> Разработка гибких волноводных секций для антенных систем субмиллиметрового диапазона космических аппаратов связи .....	150
<b>Овчар А. В.</b> Многоразовая ракета-носитель «Гравикон» грузоподъемностью от 4 до 25 тонн .....	152
<b>Овчар А. В.</b> Прорывное движение без пропеллента .....	155
<b>Окшина О. В.</b> Перспективы использования полиэфиркетона в качестве полиэфирной смолы для пропитки стекловолокна .....	158
<b>Похабов Ю. П.</b> Новая комплексная методика анализа и оценки надежности .....	160
<b>Пушница А. С., Ворончихин В. Д.</b> Перспективы применения этилен-пропиленовых каучуков для создания УФ-стойких покрытий .....	162
<b>Рожков И. П.</b> Проблемы формостабильности космических трансформируемых антенн .....	164
<b>Серяков А. В., Конькин А. В., Алексеев А. П.</b> Резонансное вибрационное повышение коэффициента теплопередачи коротких низкотемпературных тепловых труб при больших тепловых нагрузках .....	166

<b>Серяков А. В.</b> Исследование вихреобразования в паровом канале коротких низкотемпературных тепловых труб при больших тепловых нагрузках .....	169
<b>Старостин Е. А., Московских М. С., Двирный В. В., Лебедев А. П.</b> Защита высокотехнологичных устройств от экстремальных внешних воздействующих факторов .....	172
<b>Сухарев Н. В.</b> Технология развития контрольно-проверочной аппаратуры, применяемой для проверки аккумуляторных батарей космических аппаратов .....	175
<b>Толстикова А. С., Чубич В. М., Черникова О. С.</b> Повышение качества решения задачи эфемеридного обеспечения на основе современных методов параметрической идентификации .....	177
<b>Уракова А. С., Наговицин В. Н.</b> Применение сотовых панелей в спутниковой технике .....	179
<b>Хвалько А. А., Калюжная А. Б.</b> Исследование микрополоскового полосно-пропускающего фильтра с широкой полосой заграждения .....	181
<b>Хрущев П. А.</b> Проектирование жесткостных параметров спицы рефлектора аналитическим методом .....	183
<b>Шевчугов В. О., Шальков В. В.</b> Разработка параметрической модели фронтальной сети формообразующей структуры рефлектора с трапецидальной формой facets .....	185
<b>Шевчугов В. О., Евдокимов А. С.</b> Разработка программы для оценки среднеквадратического отклонения поверхности рефлектора от теоретического параболоида на этапе фасетирования .....	188
<b>Свердюк В. В., Ворончихин В. Д.</b> Преимущества токопроводящих клеевых композиций в сравнении с токопроводящими покрытиями .....	190

## Секция

**«ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ПРОИЗВОДСТВО И ИСПЫТАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ»**

<b>Асташов И. В., Жуйков Д. А.</b> Численная модель течения в неподвижном межлопаточном канале центробежного насоса энергетических установок летательных аппаратов .....	193
<b>Бегишев А. М., Яценко Г. А.</b> Возможности оптимизации газонасыщения компонентов ракетного топлива в процессе огневых испытаний жидкостных ракетных двигателей .....	195
<b>Веселов А. В.</b> Модернизация тягоизмерительного устройства на испытательных стендах жидкостных ракетных двигателей .....	198
<b>Зув А. А., Назаров В. П., Фальков В. О.</b> Экспериментальные исследования и стендовые испытания криогенных жидкостных ракетных двигателей перспективных разгонных блоков .....	201
<b>Королёва Т. А., Журавлев В. Ю., Остапенко Д. В., Зайцев М. А., Савчин Д. А.</b> Методы определения остаточных деформаций колеса турбины .....	203
<b>Лобза А. А., Васянина А. Ю., Ермоленко Д. А., Лобза В. С.</b> Бесконтактные методы 3DX-контроля геометрических параметров узлов и агрегатов жидкостных ракетных двигателей .....	205
<b>Назаров В. П., Зув А. А., Фальков В. О.</b> Особенности стендовых испытаний криогенных жидкостных ракетных двигателей разгонных блоков .....	207
<b>Орешков М. А.</b> Способы контроля геометрических размеров сборки камеры жидкостных ракетных двигателей .....	210
<b>Остапенко Д. В., Зайцев М. А., Толстомятов М. И.</b> Анализ методик термодинамического расчета жидкостных ракетных двигателей .....	212
<b>Савчин Д. А., Швецова Д. С., Назаров В. П.</b> Возможность реализации ускоренного метода кавитационных испытаний центробежных насосов жидкостных ракетных двигателей .....	215
<b>Титенков С. В., Журавлев В. Ю.</b> Алгоритм проектирования модели трубопровода сложной конфигурации для станка – трубогиба .....	217
<b>Торгашин А. С., Жуйков Д. А.</b> Повышение точности определения доверительного интервала энергетических параметров осевой газовой турбины .....	220
<b>Швецова Д. С., Савчин Д. А., Назарова Л. П.</b> Метод измерения крутящего момента на стендах испытания насосов с использованием фазометра .....	222

<b>Шевченко Т. А., Корчикова О. В.</b> Высокочастотные колебания в камерах сгорания жидкостных ракетных двигателей .....	225
<b>Яцуненко Г. С.</b> Технический анализ способов зажигания и воспламенения компонентов топлива жидкостных ракетных двигателей .....	227

## Секция

**«ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В КОНСТРУКЦИЯХ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК  
И СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ»**

<b>Васильев Е. Н., Дервянко В. А., Емельянов Д. П.</b> Исследование температурного режима подшипника .....	231
<b>Васильев Е. Н.</b> Расчет холодильного коэффициента термоэлектрической системы охлаждения с учетом термических сопротивлений .....	234
<b>Ермаков М. А., Тоньшина А. В., Ермиенко И. Ю.</b> Применение аддитивных технологий при изготовлении рабочих колес микротурбинных установок .....	236
<b>Ермаков М. А., Шевченко Ю. Н., Кишкин А. А., Попугаев М. М., Делков А. В.</b> Разработка программы проведения испытаний физического макета энергетической установки на модельном рабочем теле .....	239
<b>Кишкин А. А., Шевченко Ю. Н., Делков А. В., Потес Д. В., Чайкин Д. Ю.</b> Математическая модель регенерации потерь энтальпии в проточной части турбомашин .....	241
<b>Кишкин А. А., Шевченко Ю. Н., Попугаев М. М., Куприянов А. В., Делков А. В.</b> Моделирование проточной части центробежных турбин различной степени реактивности .....	243
<b>Попугаев М. М., Потес Д. В.</b> Разработка испытательного стенда для физического моделирования турбомашин .....	245
<b>Тестоедов Н. А., Кривов Е. В.</b> Двухфазная система терморегулирования космического аппарата с активной циркуляцией теплоносителя .....	248
<b>Ходенков А. А., Мелкозеров М. Г., Ходенкова Э. В., Ермиенко И. Ю.</b> Двухфазная система терморегулирования космических аппаратов .....	250
<b>Ходенков А. А., Делков А. В., Мелкозеров М. Г., Ходенкова Э. В., Кишкин А. А.</b> Автоматизированный измерительный комплекс для испытаний теплоэнергетических установок .....	252
<b>Шевченко Ю. Н., Кузнецов Е. В., Чайкин Д. Ю.</b> Канальные подводящие устройства микротурбин .....	254

## Секция

**«СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, КОСМИЧЕСКАЯ НАВИГАЦИЯ И СВЯЗЬ»**

<b>Баранова И. С., Кусова В. Р., Манушичев С. Ю., Овечко В. М.</b> Применение теории графов к решению задачи распределения средств управления космическими аппаратами .....	257
<b>Гриц В. И., Шестаков И. Я., Малышев Д. О.</b> Основные протоколы квантовой криптографии .....	259
<b>Копылов Е. А., Мизрах Е. А., Лобанов Д. К.</b> Экспериментальное исследование характеристик опытного образца модуля зарядно-разрядного устройства .....	262
<b>Копылов Е. А., Мизрах Е. А., Лобанов Д. К.</b> Исследование низковольтного импульсного преобразователя напряжения зарядно-разрядного устройства литий-ионных аккумуляторов .....	265
<b>Крат Н. М.</b> Многоканальный алгоритм для уменьшения влияния рассогласования импедансов при калибровке имитаторов навигационных сигналов .....	268
<b>Лелеков А. Т., Кадыров В. Ф., Денисов С. Л.</b> Пассивная система выравнивания по ёмкости для литий-ионных батарей .....	270
<b>Проценко Е. Б., Гришаева Л. В., Бычкова А. В.</b> Разработка перспективного метода проведения проверок высокочастотных характеристик связанных полезных нагрузок .....	272

<b>Старченко А. Е.</b> Оптимизация траектории перелёта межорбитального буксира на геостационарную орбиту для снижения поглощенной дозы радиации .....	275
<b>Фатеев А. В., Хохлов А. И., Тентилов Ю. А., Васильев А. А.</b> Логика работы навигационной системы «ГЛОНАСС» при прохождении особых участков теневых орбит .....	277
<b>Штабель Н. В., Самотик Л. А., Мизрах Е. А.</b> Выбор датчиков постоянного тока для применения в устройствах защитной автоматики .....	279
<b>Шуринова Д. А.</b> Система управления поддержания заданного давления циклопентана в подающем трубопроводе .....	281

## Секция

## «КОСМИЧЕСКОЕ И СПЕЦИАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ»

<b>Виноградов Д. С., Бобриков А. Н.</b> Трехфазные датчики положения ротора .....	284
<b>Виноградов К. Н., Кухтарь С. Е., Шестаков И. Я., Фадеев А. А., Надараина Ц. Г.</b> Применение тепловых труб в источнике бесперебойного питания для энергообеспечения лунной станции .....	286
<b>Голубев Е. Н., Зырянова К. Е.</b> Тестирование реконфигурируемого бортового компьютера с сетью SpaceWire .....	289
<b>Миронов А. А.</b> Выбор оптимальной структуры ограничителя пускового тока для системы электропитания космических аппаратов .....	292
<b>Никитин А. С., Карабан В. М.</b> Концепция применения пористых структур в базовых несущих конструкциях бортовой РЭА космических аппаратов .....	295
<b>Осипов А. В., Журавлев И. М., Хлыстунов М. Е., Лопатин А. А.</b> Вольтодобавочный резонансный преобразователь энергии солнечной батареи с активным выпрямителем .....	297
<b>Пономарева Н. И., Алексанов П. А.</b> Анализ способа влияния коммутации фаз электродвигателя на пульсации электромагнитного момента .....	300
<b>Савенков В. В., Тищенко А. К., Волокитин В. Н.</b> Аппаратура регулирования и контроля системы электропитания перспективного пилотируемого транспортного корабля .....	303

## Секция

## «ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

<b>Афанасьев А. А.</b> Проблемы при проектировании радиационно-стойких ИВЭП для систем электропитания космической аппаратуры .....	306
<b>Кириченко Д. И., Шалаев П. Д., Роговин В. И.</b> Направления разработки и производства в АО «НПМ «Алмаз» ламп бегущей волны для спутников связи .....	309
<b>Кулибаба А. Я., Сашов А. А.</b> Анализ влияния дополнительных испытаний на характеристики надежности электронной компонентной базы для ракетно-космической техники .....	312
<b>Масич И. С., Федосов В. В., Краева Е. М.</b> Логические закономерности для классификации электрорадиоизделий космического применения .....	313
<b>Орлов В. И., Рожнов И. П., Казаковцев Л. А., Гудыма М. Н.</b> Алгоритм поиска в чередующихся окрестностях для задачи выделения однородных производственных партий электрорадиоизделий .....	315
<b>Орлов В. И., Федосов В. В., Белов С. А., Голованов С. М.</b> Исследование стойкости интегральных схем к воздействию ионизирующих излучений космического пространства с применением комплексного параметрического анализа .....	317
<b>Полянский Е. М., Бономорский П. О., Тусков Д. С.</b> Новые разработки радиационно-стойких модулей питания АО «ГК «Электронинвест» .....	320
<b>Рожнов И. П., Орлов В. И., Казаковцев Л. А.</b> Формирование электронной компонентной базы с особыми требованиями качества с применением ансамблей алгоритмов кластеризации .....	322

## Секция

## «КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ»

<b>Бондаренко А. Ю., Митин А. Ю., Толченев В. А., Эйхорн А. Н., Юранев О. А.</b> О способе проведения наземной отработки изделий РКТ на переходные процессы с использованием копрово-пружинного стенда .....	326
<b>Двирный Г. В., Шевчук А. А., Двирный В. В.</b> О возможности применения светодиодных источников в имитаторе солнечного излучения для наземной отработки космических аппаратов .....	329
<b>Игнатенко В. В., Бубнов О. В., Юдинцев А. Г.</b> Энергосберегающий многоканальный обратимый преобразователь .....	332
<b>Комлев Г. В., Мухин С. В., Чудагашев А. В.</b> Внедрение центра обработки данных информационно-управляющей системы при огневых стендовых испытаниях жидкостных ракетных двигателей .....	334
<b>Максимов Д. Ю.</b> Криовакуумная установка для очистки охлаждающей системы космического аппарата от остатков и паров масла-теплоносителя ЛЗ-ТК .....	337
<b>Орлов С. А., Копытов В. И., Мацыгорин А. И.</b> Использование стендов типа к200 при ударных испытаниях бортовой аппаратуры космических аппаратов .....	340
<b>Орлов С. А., Копытов В. И., Пасько А. В.</b> О некоторых особенностях испытаний на высокоинтенсивные ударные воздействия систем космических аппаратов .....	342
<b>Проценко Е. Б., Иконников С. И., Шаров А. А., Кислица А. С., Нестеренко И. С.</b> Анализ методик проведения наземных испытаний связанных полезных нагрузок в АО «ИСС» .....	344
<b>Солдатов Д. А., Солдатова Е. С., Костина М. А., Шульгин Е. М.</b> Диагностика электрических контактных соединений .....	348
<b>Хахленков А. В., Симанов Р. С.</b> Повторное использование рабочего тела при проведении огневых испытаний двигателей систем коррекции космических аппаратов .....	350
<b>Ширшов Е. О., Сугак Е. В.</b> Современные методы измерения объемов в ракетостроении .....	352

## Секция

«МАЛЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ: ПРОИЗВОДСТВО,  
ЭКСПЛУАТАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ»

<b>Ефремова С. В., Храпунова В. В., Скопинцева Л. М.</b> Модульное программное обеспечение наземного комплекса управления малыми космическими аппаратами .....	355
<b>Кудабаев Б. Т., Микишев Г. С., Анаров М. Ж., Куцев М. А.</b> Разработка автоматизированной системы контроля параметров спутниковых сигналов при многостанционном доступе с временным разделением каналов .....	357
<b>Леонов В. В., Салиев Е. Р., Тютюнник Н. Н., Щеглов Г. А.</b> Разработка универсальной платформы для малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли .....	359
<b>Лепёшкина Е. С., Ханов В. Х., Шахматов А. В.</b> Использование активной отказоустойчивости для наноспутников класса CubeSat .....	361

## Секция

«ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ, ТЕХНОЛОГИЙ  
И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ МОНИТОРИНГА  
И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ»

<b>Балтайс В. В., Сорокин А. В.</b> Диэлектрические свойства крон деревьев .....	364
<b>Лапко А. В., Лапко В. А.</b> Непараметрический алгоритм автоматической классификации многомерных случайных величин в условиях больших выборок .....	367
<b>Лапко А. В., Лапко В. А.</b> Программные средства анализа данных дистанционного зондирования на основе непараметрических алгоритмов принятия решений .....	369

<b>Макаров Д. С., Харламов Д. В., Сорокин А. В.</b> Использование сигналов навигационных спутников в мониторинге земных покровов .....	371
<b>Матузко А. К., Якубайлик О. Э.</b> Повышение детальности спутникового картографирования температуры земной поверхности в г. Красноярске .....	374
<b>Токарев А. В.</b> Приборно-измерительное обеспечение для оценки загрязнения атмосферы мелкодисперсной пылью на базе БПЛА .....	376
<b>Якубайлик О. Э.</b> Особенности современных систем обработки данных дистанционного зондирования Земли .....	379

## Секция

## «ЭКСПЛУАТАЦИЯ И НАДЕЖНОСТЬ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ»

<b>Акзигитов А. Р., Андронов А. С.</b> Внедрение отечественной спутниковой системы связи «Гонец» в процесс мониторинга воздушных судов .....	382
<b>Акзигитов Р. А., Стаценко Н. И., Писарев Н. С.</b> Предупреждение отказов вычислителей пилотажно-навигационных комплексов самолетов гражданской авиации при использовании бортовых цифровых систем управления .....	384
<b>Батку О. П., Шестаков И. Я.</b> Привод колеса шасси вертолета .....	386
<b>Балалаев С. В., Смирнова Т. А., Акзигитов А. Р.</b> Государственные закупки в системе авиации МЧС .....	388
<b>Герасимова Д. С., Палухин А. А.</b> Замена ресурсных авиационных компонентов с помощью СППР .....	390
<b>Горбунов Э. В., Андреев Д. А., Майнашева С. О., Кравченко А. В., Овсянников Н. П.</b> Повышение эффективности непрерывного мониторинга воздушных судов посредством GPS-трекера .....	392
<b>Деунезева М. А.</b> Совершенствование метрологического обеспечения лаборатории авиационной метрологии ООО «Аэропорт Емельяново» на основе риск-ориентированного подхода .....	394
<b>Дмитриев Д. В., Акзигитова И. А., Огородникова Ю. В.</b> Бортовая радиолокационная система посадки вертолета на неподготовленную площадку .....	396
<b>Дмитриев Д. В., Акзигитова И. А., Огородникова Ю. В.</b> Система автоматического управления посадочным маневром беспилотного летательного аппарата при действии бокового ветра .....	398
<b>Козарь Н. В., Кацура А. В., Строков Д. Е., Кацура А. А., Громова А. А.</b> Оптимизация управления технологическими процессами узлового аэропорта .....	400
<b>Колосов В. А., Коркин А. Н., Лозовенко С. Н., Перфилов А. В., Цайтлер А. В.</b> Изотермический контейнер для транспортирования космических аппаратов .....	402
<b>Коршуненко М. В., Баринов А. С., Перевертов В. Ю.</b> Исследование возможностей повышения эффективности обновления аэронавигационных данных системы управления полетом самолета Airbus A320 .....	404
<b>Легкова Т. А., Бойко О. Г., Андреев Д. А.</b> Анализ применения метода сетевых графиков к производственному планированию технического обслуживания воздушных судов .....	406
<b>Липатов Д. В.</b> Метод поддержания летной годности воздушных судов с бортовым цифровым комплексом в условиях экстремально низких температур .....	409
<b>Макиенко К. В., Кацура А. В., Строков Д. Е., Кацура А. А., Громова А. А.</b> Повышение эффективности эксплуатации аэропорта Красноярск .....	411
<b>Менчиков Р. В., Панкеев Е. С., Парпуц А. А.</b> Методы технического диагностирования авиационных двигателей .....	413
<b>Неверов Ю. А., Шинкевич С. М.</b> Информационно-измерительная система пирометрического типа для малоразмерного беспилотного летательного аппарата .....	415
<b>Огородникова Ю. В., Лукасов В. В., Дмитриев Д. В.</b> Работа системы смазки авиационного двигателя .....	417
<b>Сяков Е. Е., Афанасьев А. В., Лукасов В. В.</b> Выбор оптимального регионального самолета России .....	419

<b>Терина Е. А.</b> Совершенствование метрологического обеспечения лаборатории авиационной метрологии ООО «Аэропорт Емельяново» на основе процессного подхода .....	421
<b>Турсунгалиев И. К., Урдуханов Ш. Р., Степанцов Е. А., Коваленко Г. Д.</b> Анализ влияния среды на полет ДПЛА .....	423

## Секция

## «ТЕХНОЛОГИЯ И МЕХАТРОНИКА В МАШИНОСТРОЕНИИ»

<b>Бинчуров А. С., Индаков Н. С., Гордеев Ю. И.</b> Влияние технологических параметров ротационного точения многогранными резцами на качество поверхности .....	426
<b>Гусев В. Ю., Демченко А. И., Зайцев Р. В., Ананьев В. В., Скачков И. А.</b> Особенности формирования телескопических сварных соединений тонкостенных трубопроводов из аустенитных нержавеющей сталей, выполненных лазерной и автоматизированной аргодуговой сваркой .....	429
<b>Елисеев А. В., Кузнецов Н. К., Трофимов А. Н.</b> Метод обобщенной функции зазора в приложении к контактным взаимодействиям механических колебательных систем .....	432
<b>Елисеев С. В., Выонг К. Ч., Миронов А. С.</b> Дополнительные связи как фактор изменения динамических свойств механических колебательных систем .....	435
<b>Ермаков Д. В.</b> Демпфер на основе трабекулярной структуры .....	438
<b>Зайцев Р. В., Гусев В. Ю., Ананьев В. В., Скачков И. А., Злобин С. К.</b> Повышение точности изготовления волноводно-распределительных трактов космических аппаратов связи .....	440
<b>Захарова Н. В.</b> Оптимальные нагрузочно-скоростные режимы трения антифрикционных покрытий .....	442
<b>Лапшин В. Л., Большаков Р. С., Николаев А. В.</b> Влияние внешних возмущений на работу вибрационной технологической машины .....	444
<b>Лунин Е. А., Захарова Н. В., Карелина Е. А.</b> Методы и приборы контроля оценки качества нанесения антифрикционного покрытия .....	447
<b>Малько Л. С., Суханова О. А.</b> Особенности конструкции и технологии изготовления долбежных резцов с механическим креплением режущего инструмента .....	449
<b>Неверов А. Л., Бурюкин Ф. А., Жигарев В. А.</b> Автономная пакерная система .....	452
<b>Панаськов А. О., Шумилина Я. Е., Будьков В. А.</b> Система управления положением подводного мехатронного модуля с бионическим движителем .....	454
<b>Пронин А. В., Раменский В. В., Янковская Н. Ф., Раменская Е. В.</b> Жесткость в технологии производства рабочих машин .....	456
<b>Пушкарев А. Ю., Вайлов А. В., Амельченко Н. А., Раменская Е. В.</b> Влияние вылета инструмента и выбора стратегии на погрешность обработки при фрезеровании .....	458
<b>Рублевская Е. В., Щербакова А. В.</b> Использование мехатронных систем в процессе термообработки .....	460
<b>Суханова О. А., Сутягин А. В., Малько Л. С., Трифанов И. В.</b> Метрологическое обеспечение измерения силы резания при ротационном точении глобоидной винтовой поверхности .....	462
<b>Трифанов В. И., Оборина Л. И., Квитунов А. С., Трифанов И. В.</b> Повышение эффективности сжигания топлива .....	464
<b>Филиппов К. Ю., Раменский В. В., Бокова В. И., Филиппов Ю. А., Раменская Е. В.</b> Метод конструирования дисковых пил с внутренней режущей кромкой .....	466
<b>Филиппов К. Ю., Раменский В. В., Раменская Е. В., Филиппов Ю. А.</b> Анализ цилиндрической жесткости кольцевых пил .....	468
<b>Черепанова Д. С., Карелина Е. А., Трифанов В. И.</b> Способ изготовления волноводных изгибов .....	470



## Секция

## «МЕХАНИКА СПЕЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ»

<b>Гумарова А. А., Ермиенко И. Ю., Кукушкин Е. В.</b> Исследование напряженно-деформированного состояния проушины вилки карданной передачи .....	474
<b>Ереско С. П., Межов В. Г., Ушаков А. В.</b> Расчетная схема привода для динамического расчета стенда калибрования древесностружечных плит .....	478
<b>Ереско С. П., Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В.</b> Система автоматического регулирования гидравлического тормозного устройства стенда для испытания карданных передач .....	481
<b>Ереско В. С., Ереско С. П., Ереско Т. Т.</b> Автоматизация процесса проектирования и изготовления эластомерных уплотнителей .....	484
<b>Иванов М. Е., Фадеев А. А., Ереско Т. Т.</b> Разработка математической модели планетарного мотора-редуктора с бесколлекторным вентильным двигателем обратной конструкции .....	488
<b>Иванов Ю. Ф., Ереско С. П., Ахмадеев Ю. Х., Лопатин И. В., Клопотов А. А.</b> Разработка комбинированного электронно-ионно-плазменного метода формирования многофазных субмикро-наноразмерных сплавов на основе алюминия .....	490
<b>Ковалев В. И., Романенко Д. А., Кукушкин Е. В.</b> Устройство для замера вибрации карданных передач .....	493
<b>Кукушкин Е. В.</b> Исследование напряженно-деформированного состояния крестовины карданного шарнира .....	496
<b>Кустов А. В., Гончарова Я. С., Карелина А. А., Литвинова М. М.</b> Гидродинамика вихревой контактной ступени ректификационной колонны .....	500
<b>Кустов А. В., Межов В. Г., Брыксина Я. Ю., Харченко П. В.</b> Сопrotивление вихревой контактной ступени ректификационной колонны .....	503
<b>Михалев О. Н., Янюшкин А. С., Ереско В. С.</b> Проектирование интеллектуальной обработки на станках с ЧПУ .....	506
<b>Цаплин П. В., Ереско С. П., Шастовский П. С., Мещерякова А. В., Алашкевич Ю. Д.</b> Кинематика привода механизма обработки поверхности древесно-стружечных плит .....	510
<b>Чулкин С. Г., Елисеев К. В., Зиновьева Т. В., Пискунов В. А.</b> Расчет прочности защитной конструкции при ударе .....	513
<b>Швалева Н. А., Фадеев А. А., Ереско Т. Т.</b> Математическая модель работы линейного электродинамического двигателя при ударе с учетом упругой деформации .....	515

## Секция

«НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ  
В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ»

<b>Владимиров В. М., Юксеев В. А., Лапухин Е. Г.</b> Эволюция геосинхронной ретроградной орбиты для мониторинга Северного морского пути и Антарктики .....	518
<b>Владимиров В. М., Лапухин Е. Г., Юксеев В. А.</b> Оптическая система для мониторинга Северного морского пути и Антарктики в УФ, видимом и ИК-диапазонах .....	520
<b>Герасимов В. С., Ершов А. Е., Бикбаев Р. Г., Рассказов И. Л., Карпов С. В.</b> Проявление дополнительных аномалий Рэлея в периодических массивах плазмонных наночастиц, внедренных в одномерный фотонный кристалл .....	522
<b>Гохфельд Д. М., Герасимов В. С., Ершов А. Е., Исаев И. Л.</b> Определение масштаба циркуляции тока .....	525
<b>Ершов А. Е., Гаврилюк А. П., Герасимов В. С., Карпов С. В.</b> Фотохромные эффекты в композитных средах, содержащих агрегаты плазмонных наночастиц в импульсных лазерных полях .....	527
<b>Костюков А. С., Филимонов С. А., Ершов А. Е., Герасимов В. С., Карпов С. В.</b> Оптимизация фототермических методов лазерной гипертермии злокачественных клеток с применением биоконъюгатов многослойных наночастиц с ДНК-аптамерами .....	529

<b>Кретинин В. В., Фисенко О. Б., Юхно М. Ю.</b> Электрическая поляризация твердых растворов селенидов марганца .....	532
<b>Логинов Ю. Ю., Мозжерин А. В., Паклин Н. Н., Брильков А. В.</b> Численное моделирование процессов образования структурных дефектов в теллуриде кадмия .....	534
<b>Масюгин А. Н., Фисенко О. Б.</b> Магнитоэлектрический эффект в пленках висмут-неодимовых ферритов-гранатов .....	536
<b>Михайлов М. М., Ловицкий А. А.</b> О возможности использования порошков $BaSO_4$ в качестве пигментов терморегулирующих покрытий космических аппаратов .....	539
<b>Райхерт И. К., Телегин С. В.</b> Оптимизация толщины слоя гетерогенного радиационного экрана .....	541
<b>Рябиков А. Е., Долгова Ю. Н., Мамаев А. И., Баранова Т. А., Чубенко А. К.</b> Наноструктурные неметаллические неорганические радиопоглощающие покрытия для космической техники, сформированные методом микроплазменного оксидирования .....	543
<b>Сенашов С. И., Савостьянова И. Л.</b> Закон Гука как группа Ли .....	545
<b>Ситников М. Н., Харьков А. М., Масюгин А. Н., Фисенко О. Б., Мироненко В. В.</b> Электрические свойства $Tm_xMn_{1-x}S$ .....	547
<b>Утюшев А. Д., Ершов А. Е., Герасимов В. С., Рассказов И. Л., Карпов С. В.</b> Сверхузкополосные выделяющие плазмонные фильтры для телекоммуникационного диапазона длин волн .....	549
<b>Фёдоров Л. Ю., Ушаков А. В., Карпов И. В., Лепешев А. А., Иртюго Л. А.</b> Высокотемпературные сверхпроводники вакуумно-дугового синтеза для космической техники .....	552
<b>Харьков А. М., Ситников М. Н., Кретинин В. В., Мироненко В. В., Рыбина У. И.</b> Индуктивность и добротность твердых растворов $Tm_xMn_{1-x}S$ ( $x = 0.05, 0.15$ ) .....	555

## Секция

**«МЕХАНИКА СПЛОШНЫХ СРЕД (ГАЗОДИНАМИКА, ГИДРОДИНАМИКА,  
ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ, РЕОЛОГИЯ)»**

<b>Белолипецкий В. М., Генова С. Н.</b> Одномерная модель эмиссии метана в зонах вечной мерзлоты .....	558
<b>Варыгина М. П.</b> Численное моделирование процессов распространения сейсмических волн под действием электромагнитного импульсного источника «Енисей» .....	560
<b>Вяткин А. В., Кучунова Е. В.</b> Полулагранжев метод для численного решения уравнений Навье–Стокса для вязкого теплопроводного газа .....	562
<b>Гилева Л. В., Карпова Е. Д., Пьяных А. А.</b> Применение специальных эрмитовых конечных элементов для уравнения диффузии с переменным коэффициентом .....	564
<b>Козлова С., Мялдун А., Рыжков И., Шевцова В.</b> Анализ коэффициентов диффузии тройных смесей в различных системах отсчета .....	566
<b>Матвеев А. Д.</b> Метод многосеточных конечных элементов в расчетах композитных балок сложной формы .....	568
<b>Сабиров Р. А.</b> К анализу деформированного состояния тонкой трубки .....	570
<b>Сабиров Р. А., Петухова И. Я.</b> Вариационно-разностный метод расчета пластины в условиях плоского напряженного состояния в функциях напряжений на температурные нагрузки .....	572
<b>Садовская О. В., Садовский В. М.</b> Численное исследование волновых полей, генерируемых сейсмоисточником «Енисей», в блочно-слоистых средах .....	575
<b>Садовский В. М., Садовская О. В., Петраков И. Е.</b> Об определяющих уравнениях волокнистых композитов, по-разному сопротивляющихся растяжению и сжатию .....	578
<b>Сенашов С. И., Савостьянова И. Л.</b> Трехмерные пластические течения, соответствующие однородному напряженному состоянию .....	581

<b>Смолехо И. В.</b> Параллельная реализация алгоритма, учитывающего воздействие электрического поля на жидкие кристаллы .....	583
<b>Трифанов В. И., Суханова О. А., Оборина Л. И., Трифанов И. В.</b> Оценка температуразмерных параметров волноводов, работающих в КВЧ-диапазоне .....	586
<b>Трифанов В. И., Суханова О. А., Оборина Л. И., Трифанов И. В.</b> Модель для расчета величины усадки при обработке каналов волноводов дорнованием .....	588
<b>Ченцов Е. П.</b> Моделирование волновых процессов в трещиноватых композитных материалах со слоистой и блочной структурой .....	589
<b>Шанько Ю. В.</b> О высших симметриях уравнения Мутара .....	592
<b>Якубович М. В.</b> Моделирование течения многокомпонентной газовой смеси с помощью комбинации полулагранжевого метода и метода конечных элементов .....	594

## Секция

## «ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ»

<b>Ашихин А. С., Семиченко Е. С.</b> О строении продукта взаимодействия 3-(гидроксимино)пентан-2,4-диона и 1-нафтиламина .....	597
<b>Вигуль Д. О., Косицына А. С., Субоч Г. А., Товбис М. С.</b> Изучение новой антидетонационной присадки .....	600
<b>Ворончихин В. Д., Селютина П. Е., Мельникова П. С., Персидская Д. И., Любяшкин А. В.</b> Исследование процесса структурирования эластомерных композиций в присутствии замещенных пиразолов .....	602
<b>Круглякова Л. А., Сачивко А. В., Пехотин К. В., Мамаев И. А.</b> Кинетика и механизм термораспада 3,7-динитрозо-1,3,5,7- тетраазабицикло[3.3.1]нонана в неизотермических условиях .....	604
<b>Пен В. Р., Левченко С. И.</b> Размол как механохимический процесс 2. Математическое моделирование .....	607
<b>Пен В. Р., Левченко С. И.</b> Размол как механохимический процесс 3. Математическое моделирование .....	609
<b>Персидская Д. И., Ефимов В. В., Кукушкин А. А., Товбис М. С.</b> Изотопный анализ и фрагментационный распад 4-метокси-1-(4-хлорфенил)бутан-1,2,3-трион-2-оксима .....	611
<b>Поваров И. Г., Шиленков Н. А., Товбис М. С.</b> Получение новых сульфаниламидных производных аминифенолов и установление их строения .....	614
<b>Полежаева Н. И.</b> Изучение смачивающей способности флюса, бромида диэтилдибензиламмония, на границе раздела медь – флюс-связка .....	617
<b>Полежаева Н. И.</b> Разработка органического связующего для паяльных паст со строго заданными реологическими характеристиками .....	619
<b>Раджабов А. Д., Кукушкин А. А., Роот Е. В., Субоч Г. А.</b> ВЭЖХ/МС-анализ пара-нитрозофенолов, содержащих пиридиновый фрагмент .....	621

## CONTENTS

### *Section*

#### “PROJECTING AND PRODUCTION OF AIRCRAFT, SPACE RESEARCH WORKS AND PROJECTS”

<b>Alyakretskii R. V., Mikheev A. E., Krushenko G. G., Reshetnikova S. N., Dvirnyi G. V.</b> Improving the quality of metal surfaces .....	5
<b>Ananev V. V., Zaitsev R. V, Gusev V. Y., Demchenko A. I., Skachkov I. A.</b> Development of the head for orbital welding of non-turned cushions of cylindrical form products .....	7
<b>Brylev R. S., Rudenko M. S., Pikulin S. A., Kolga V. V.</b> Designing a universal device for the installation of stabilizers of rocket model .....	9
<b>Gordovenko M. A., Mikhnev M. M.</b> The structural analysis of the work tool for the moulding high stability dimension reflectors for the spacecraft antenna .....	12
<b>Edigeeva L. S.</b> Cable system applicable for space elevators and orbital flights .....	15
<b>Zamyatin D. A.</b> Design of anisogrid adapter for spacecraft .....	17
<b>Zamyatin D. A., Baranova E. G.</b> Information support space platform specifics .....	19
<b>Ishkov S. F., Fadeenkov P. V., Filippov G. A.</b> Ballistic analyze of spacecraft for space debris disposal at geostationary orbit at base of platform “Express-2000” .....	22
<b>Klimovskiy D. A., Smirnov N. A.</b> Tilting of rocket parts in parallel kinematic machine with flexible link .....	25
<b>Kozlov V. S.</b> The pressure distribution on the surface of the antenna reflector .....	27
<b>Kolovsky I. K., Podolyakin V. N., Shmakov D. N.</b> Ballistic building of the “Gonets-M” orbital constellation for ensuring the inter-satellite link inside orbital plane .....	30
<b>Kolovsky I. K., Podolyakin V. N., Shmakov D. N.</b> Assessment of the use of the ballistic databases NORAD for satellite «Gonets-M» into a low circular orbit .....	32
<b>Kostarev I. S., Lekarev A. F.</b> Optimization of control on the balance of the necessary and accumulated in the system of energy .....	34
<b>Krasilova E. V., Pikulin S. A.</b> Analysis of the monitoring of the solar wind using microsatellite .....	37
<b>Krushenko G. G., Elfimova M. V., Reshetnikova S. V., Kuznecov A. D., Kukushkin I. V.</b> The use of aluminum-magnesium alloys for the manufacture of cast parts of aircraft .....	39
<b>Mironenko E. D., Avkelgin S. V.</b> Design of high-tech control unit guys’ system tension for composite overwrapped pressure vessel fixing .....	41
<b>Orlin P. A., Rudenko M. S.</b> Coatings applied by the method of magnetic spray to satellites .....	44
<b>Pekarskaya I. V., Ostapenko A. V.</b> Main typical indicators of estimation of the level of technological development of enterprises of the rocket and space industry .....	46
<b>Pikulin S. A., Krasilova E. V.</b> Usage of topology optimization in the design of unmanned spacecrafts .....	48
<b>Regotov G. A., Marchenko I. A.</b> Evaluation of the opportunity of application of electro-kinetic pump in a single-phase circuit of the thermoregulating system .....	50
<b>Skachkov I. A., Ananev V. V., Gusev V. Y., Zlobin S. K., Zaitsev R. V.</b> Technological measures to detect defects in welded and soldered joints of pipelines .....	52
<b>Stukalov A. A., Shatrov A. K.</b> Efficiency of application of the lateral panels of the construction elements of machine-building production .....	54
<b>Tarasov V. I., Slabikov B. A., Kritsky S. P., Grigorieva I. V., Sadkovskaya N. E.</b> Progressive technologies of switching of photoconverters of space appointment in production of solar batteries .....	56
<b>Falkova E. V., Klimovskiy D. A., Nazarova L. P., Fesenko E. N., Vaikus A. L.</b> Determination of the equilibrium position for tilter based on parallel kinematic machine with flexible link .....	58
<b>Fink V. A., Chagai T. A., Kolga V. V.</b> Investigation of igniter used in the model of solid fuel engines .....	60

<b>Khudonogova T. U., Azingareev V. V., Slepneva N. G.</b> Analysis of various defects arising in products in their manufacturing by the hypical method space industry .....	62
<b>Shestakov I. Ya., Pschenko E. B., Shestakov V. I.</b> Investigation of water electroactive with coaxial location of electrodes .....	64

## Section

## “LARGE TRANSFORMABLE CONSTRUCTIONS OF SPACECRAFT”

<b>Azin A. V., Ponomarev S. V., Rikkonen S. V., Maritsky N. N., Kuznetsov S. A.</b> Development of precision drives for the adjustment systems of the spacecraft antenna reflecting surface .....	67
<b>Ananiev V. V., Golovanova V. V.</b> Thermoelectric cooler soil .....	70
<b>Anufrienko V. E., Vasilyeva T. S., Skryabin V. V., Ageev P. O.</b> Optimisation methods for lattice pattern beam with triangular profile made of composite materials .....	73
<b>Antsiferov A. A., Dvirniy V. V.</b> Design and technological development of the case gear motor .....	75
<b>Badanin E. I., Lavrinenko A. I.</b> System of signboards for disclosing of panels of batteries solar in the conditions of gravitation of the Earth .....	77
<b>Beloglazov A. P., Eremin A. G., Ladyko M. A.</b> Possibility research of using carbon material in the design of spacecraft radiator .....	80
<b>Berns V. A., Zhukov E. P., Lysenko E. A., Malenkova V. V., Lakiza P. A.</b> Research on the crack detection method by the forced vibrations portraits .....	82
<b>Berns V. A., Levin V. E., Krasnorutsky D. A., Zhukov E. P., Lakiza P. A.</b> Modal analysis of the spacecraft antenna mockup based on the results of its component parts tests .....	84
<b>Bratysheva V. E., Orlov D. V.</b> Features of onboard antenna-feeder devises of space craft .....	86
<b>Velichko A. I., Kisanov Yu. A., Tserikhov V. I., Matrosova I. V.</b> Rimmed large-sized space reflector with increased stiffness struts .....	88
<b>Vehov A. S., Titarenko S. A.</b> The use of additive technologies in modern manufacturing .....	90
<b>Voronina S. Y., Vlasov A. Y., Pasechnic K. A., Obvertkin I. V.</b> Evaluation of intelligent properties of a composite on the basis of a polymer matrix with the shape memory effect of a form in reflector designs .....	93
<b>Voronchikhin V. D., Sveredyuk V. V.</b> The basics of creating a carbon-containing conductive adhesive compositions .....	95
<b>Goldobin N. N.</b> Analysis of efficiency of orbital adjustment of the large-sized reflector .....	97
<b>Dzhan Ts., Zimin V. N., Krylov A. V., Churilin S. A.</b> Some aspects of modeling of transformable space structures dynamics .....	100
<b>Evdokimov A. S., Valishevsky O. K., Shendalev D. O.</b> Optimization of laminate of reflector boom for decrease temperature deformations .....	103
<b>Zhukov A. P., Valishevsky O. K., Shendalev D. O., Evdokimov A. S., Ponomarev S. V., Ponomarev V. S., Velichko A. I., Halimanovich V. I.</b> Structure of the large-sized umbrella-type reflector with six spokes .....	105
<b>Zavyalov P. S., Kravchenko M. S., Urzhumov V. V., Kuklin V. A., Mihalkin V. M.</b> Metrological characteristics investigation of the PulsESPI system for thermodeformations precision control .....	107
<b>Zaitseva T. S.</b> Phenolic plastics containing phenol-formaldehyde resin .....	110
<b>Zommer S. A., Nemchaninov S. I.</b> Designing of the deployable mast of truss structure for the antenna systems of the spacecraft .....	112
<b>Ivanov A. V., Shal'kov V. V.</b> Design of the mechanism of the disclosure of the umbrella reflector with the hard central part .....	114
<b>Igolkin A. A., Safin A. I., Filipov A. G.</b> Modal analysis of the dynamic model of a mockup, a small spacecraft .....	117
<b>Iseeva O. A., Pisarev M. S., Dvirniy V. V., Krushenko G. G.</b> Prospects of application of shape memory polymers in the space industry .....	119

<b>Kalabegashvili G. I., Bikeev E. V., Matylenko M. G.</b> Selection of the device for orbital alignment of the reflector of a large transformable antenna .....	121
<b>Kisanov Yu. A., Meshkovsky V. Ye., Sdobnikov A. N., Churilin S. A.</b> Computer simulation of trussed space systems large deployable reflectors .....	123
<b>Kozhevnikova L. A.</b> Solar cells and batteries for space application .....	126
<b>Kopylov V. M.</b> A method for measuring small oscillations of spacecraft payload .....	128
<b>Kochetkova S. S., Chichurin V. E., Laizan V. V., Bolgov V. V., Taygin V. B.</b> Load frame as the structure member of the large-sized reflector .....	131
<b>Kryuchek S. D.</b> Method of compound polyimide films for thermal blanket of spacecraft .....	133
<b>Kudryavtsev I. V., Gotselyuk O. B.</b> The stress-deformed state of the tape spring in over-the-road position .....	135
<b>Likhachev A. N.</b> The use of thermosetting polymer composites for the realization of the objectives of reconfiguratio designs aviarian and space equipment .....	137
<b>Martynova E. Yu., Pestov A. B.</b> Increasing the energy efficiency of a spacecraft power supply system using the electrostatic energy .....	139
<b>Masalimov R. F.</b> Advantages of using PCM with intelligent matrix when manufacturing reflectors .....	141
<b>Melnik A. M., Dvirniy V. V.</b> Modern technologies that increase the efficiency of milling of honeycomb panels .....	143
<b>Minaev O. A.</b> Problems and their decisions when obtaining stringers of complex configuration .....	146
<b>Moiseev P. P., Victorov A. I.</b> System of managed sequential deployment of sunny battery panels .....	148
<b>Morozkov I. S., Trofimova M. A., Ukhanyov S. A.</b> Development of flexible waveguide sections for the submillimeter range of spacecrafts of communications .....	150
<b>Ovchar A. V.</b> Reusable launch vehicles “Gravicon” lifting capacity from 4 to 25 tons .....	152
<b>Ovchar A. V.</b> Breakthrough propulsion without propellant .....	155
<b>Okshina O. V.</b> Prospects for the use of polyetherketone as polyester resin to impregnate the fiberglass .....	158
<b>Pokhabov Yu. P.</b> New integrated method of analysis and assessment of reliability .....	160
<b>Pushnitsa A. S., Voronchikhin V. D.</b> Perspetive applications ethylene-propylene rubbers to generate UV-resistant coatings .....	162
<b>Rozhkov I. P.</b> Problems form-stable of space transformable antennas .....	164
<b>Seryakov A. V., Konkin A. V., Alekseev A. P.</b> Resonant vibration increase of the heat transfer coefficient of short low-temperature heat pipes at high heat loads .....	166
<b>Seryakov A. V.</b> The study of the vortex formation in the vapour channel of short low temperature heat pipes at high heat loads .....	169
<b>Starostin E. A., Moskovskih M. S., Dvirniy V. V., Lebedev A. P.</b> High-technology devices protection from extreme external impact .....	172
<b>Sukharev N. V.</b> Technology of development of the control and test equipment used to check of rechargeable batteries of spacecrafts .....	175
<b>Tolstikov A. S., Chubich V. M., Chernikova O. S.</b> Improvement of quality of the problem of ephemeris providing based on modern methods of parametrical identification .....	177
<b>Urakova A. S., Nagovitsin V. N.</b> Using cellular panels in satellite technology .....	179
<b>Xwalko A. A., Kalyuzhnaya A. B.</b> Investigation of the microproof band-filter filter with a wide band strength .....	181
<b>Khrushchelev P. A.</b> Design of stiffness parameters of the spoke of the reflector by analytical method .....	183
<b>Shevchugov V. O., Shal'kov V. V.</b> Development of parametric model of a front net of the shape-generating structure with trapezoidal form of facets .....	185

<b>Shevchugov V. O., Evdokimov A. S.</b> Development of a program for estimation the root-mean-square deviation of reflector surface from the theoretical paraboloid at the stage of faceting .....	188
<b>Sveredyuk V. V., Voronchikhin V. D.</b> The advantages of the conductive adhesive compositions in comparison with a conductive coating .....	190

## Section

## “PROJECTING, PRODUCTION AND TESTING OF AEROSPACE ENGINES”

<b>Astashov I. V., Zhuikov D. A.</b> Numerical simulation of the flow in the fixed inter-blade centrifugal pumps channel power units spacecraft .....	193
<b>Begishev A. M., Yatsenko G. A.</b> Opportunities for optimizing the gas consumption of rocket fuel components in the process of fire laser tests .....	195
<b>Veselov A. V.</b> Modernization thesmiling the device on the test bench LRE .....	198
<b>Zuev A. A., Nazarov V. P., Falkov V. O.</b> Experimental investigations and bench tests of cryogenic liquid rocket engines are promising upper stages .....	201
<b>Korolyova T. A., Zhuravlyov V. U., Ostapenko D. V., Zaycev M. A., Savchin D. A.</b> Method for the determination of residual voltages of the turbine wheel .....	203
<b>Lobza A. A., Vasyanina A. U., Ermolenko D. A., Lobza V. S.</b> Non-contact 3D geometrical parameters control of the product .....	205
<b>Nazarov V. P., Zuev A. A., Falkov V. O.</b> Features of bench tests of cryogenic liquid rocket engines boosters .....	207
<b>Oreshkov M. A.</b> Methods for controlling geometric sizes of the assembly of the lpg chamber .....	210
<b>Ostapenko D. V., Zaycev M. A., Tolstopyatov M. I.</b> Analysis of the methods of thermodynamic calculation of liquid rocket engines .....	212
<b>Savchin D. A., Shvetsova D. S., Nazarov V. P.</b> Possibility of using accelerated cavitation tests of liquid rocket engine pumps .....	215
<b>Titenkov S. V., Zhuravlev V. Yu.</b> Algorithm design model of a pipeline of complex configuration for machine-bending .....	217
<b>Torgashin A. S., Zhuikov D. A.</b> Improvement of accuracy of determination of trusting interval of energy parameters of axial gas turbine .....	220
<b>Shvetsova D. S., Savchin D. A., Nazarova L. P.</b> The method of torque measurement on the pump test stands with using phasometer .....	222
<b>Shevchenko T. A., Korchikova O. V.</b> High-frequency oscillations in combustion chambers of liquid rocket engines .....	225
<b>Yatsunenko G. S.</b> Technical analysis of ignition methods of fuel components of liquid rocket engines .....	227

## Section

## “HEAT-MASS EXCHANGE PROCESSES IN AIRCRAFT, POWER STATIONS AND LIFE SUPPORT SYSTEMS”

<b>Vasil'ev E. N., Derevyanko V. A., Emel'yanov D. P.</b> Investigation of temperature regime of bearing .....	231
<b>Vasil'ev E. N.</b> Calculation of coefficient of performance of thermoelectric cooling system with thermal resistances account .....	234
<b>Ermakov M. A., Tonshina A. V., Yermiyenko I. Yu.</b> Application of additive technologies in the manufacturing of microturbine working wheels .....	236
<b>Ermakov M. A., Shevchenko Ju. N., Kishkin A. A., Popugayev M. M., Delkov A. V.</b> Development of the experimental investigation program for physical layout of the energy unit on the model working fluid .....	239

<b>Kishkin A. A., Shevchenko Yu. N., Delkov A. V., Potes D. V., Chaykin D. Yu.</b> Mathematical model of entalpia loss regeneration in the flow part of turbine .....	241
<b>Kishkin A. A., Shevchenko Yu. N., Popugayev M. M., Kupriyanov A. V., Delkov A. V.</b> Modeling of the centripetal turbines flowing part in cases of various reactivity degree .....	243
<b>Popugayev M. M., Potes D. V.</b> Development of the experimental stand for physical modeling of turbomashines .....	245
<b>Testoedov N. A., Krivov E. V.</b> The two-phase thermal control system of the spacecraft with circulation of heat carrier .....	248
<b>Khodenkov A. A., Melkozerov M. G., Khodenkova E. V., Ermienko I. Yu.</b> Spacecraft two-phase thermal control system .....	250
<b>Khodenkov A. A., Delkov A. V., Melkozerov M. G., Khodenkova E. V., Kishkin A. A.</b> Automated measuring complex for testing of heat-power plants .....	252
<b>Shevchenko Yu. N., Kuznetsov E. V., Chaikin D. Yu.</b> Microturbines channel feeding devices .....	254

*Section*

**“CONTROL SYSTEMS, SPACE NAVIGATION AND COMMUNICATION SYSTEMS”**

<b>Baranova I. S., Kusova V. R., Manushichev S. Yu., Ovechko V. M.</b> The application of graph theory to the solve of the problem of the distribution of spacecraft controls .....	257
<b>Grits V. I., Shestakov I. Ya., Malyshev D. O.</b> Main protocols of quantum cryptography .....	259
<b>Kopylov E. A., Mizrakh E. A., Lobanov D. K.</b> Experimental investigation of the charge-discharge device module prototype .....	262
<b>Kopylov E. A., Mizrakh E. A., Lobanov D. K.</b> Lithium-ion cells charge-discharge device low-voltage pulse converter investigation .....	265
<b>Krat N. M.</b> Multichannel algorithm for impedance mismatch reducing at navigation signal simulator calibration .....	268
<b>Lelekov A. T., Kadyrov V. F., Denisov S. L.</b> Passive cell capacity balancing system for Li-ion batteries .....	270
<b>Protsenko E. B., Grishaeva L. V., Bychkova A. V.</b> The development of a promising method for conducting audits of high-frequency characteristics of the communication payloads .....	272
<b>Starchenko A. E.</b> Trajectory optimization of a low-thrust spacecraft geostationary orbit insertion maneuver for total ionizing dose decrease .....	275
<b>Fateev A. V., Khokhlov A. I., Tentilov U. A., Vasilev A. A.</b> Logic of work of navigating system “GLONASS” at passage of special sites of shadow orbits .....	277
<b>Shtabel N. V., Samotik L. A., Mizrakh E. A.</b> Selection of direct current sensors for automatic protection devices .....	279
<b>Shurinova D. A.</b> Control system of supported pressure of cyclopentan in pilot pipeline .....	281

*Section*

**“SPACE AND SPECIAL-PURPOSE ELECTRONIC INSTRUMENT ENGINEERING”**

<b>Vinogradov D. S., Bobrikov A. N.</b> Three-phase rotor position detector .....	284
<b>Vinogradov K. N., Kuhtar S. E., Shestakov I. Ja., Fadeev A. A., Nadaraia C. G.</b> Application of thermal pipes in the source of uninterrupted power supply for the energy supply of the lunar station .....	286
<b>Golubev E. N., Zyryanova K. E.</b> Testing of on-board reconfigurable control computer (OCC) with SpaceWire network .....	289
<b>Mironov A. A.</b> Selection of the optimal structure of the starting current limiter for power supply sistems of space vehicles .....	292



<b>Nikitin A. S., Karaban V. M.</b> A concept of porous structures application for spacecraft electronic modules' support systems .....	295
<b>Osipov A. V., Zhuravlev I. M., Hlistunov M. E., Lopatin A. A.</b> Resonant add-voltage converter solar energy with active rectifier .....	297
<b>Ponomareva N. I., Aleksanov P. A.</b> Analysis of influence of a way of switching of phases of the electric motor on pulsations of the electromagnetic moment .....	300
<b>Savenkov V. V., Tishchenko A. K., Volokitin V. N.</b> Control and regulation equipment for power supply system of the perspective manned transport spacecraft .....	303

## Section

## “ELECTRONIC COMPONENT BASE OF SPACE SYSTEMS”

<b>Afanasyev A. A.</b> Problems in the design of radioresistant secondary power supplies for power supply systems in spacecraft hardware .....	306
<b>Kirichenko D. I., Shalaev P. D., Rogovin V. I.</b> Development and production in SC “RPE “Almaz” travel wave tube for communication satellites .....	309
<b>Kulibaba A. Ya., Sashov A. A.</b> Analysis of influence of additional tests on characteristics of reliability of the electrical, electronic and electromechanical (EEE) parts for rocket and space equipment .....	312
<b>Masich I. S., Fedosov V. V., Kraeva E. M.</b> Logical patterns for classifying EEE-parts in space applications .....	313
<b>Orlov V. I., Rozhnov I. P., Kazakovtsev L. A., Gudyma M. N.</b> Variable neighborhood search algorithm for the problem of detection of homogenous production batches of semiconductor devices .....	315
<b>Orlov V. I., Fedosov V. V., Belov S. A., Golovanov S. M.</b> Investigation of integrated circuits resistance to the ionizing space ionizing radiation with the use of complex parametric analysis .....	317
<b>Poliansky E. M., Bonomorsky P. O., Tuskov D. S.</b> Newest radiatoin tolerant space DC-DC converters from JSC “Electroninvest group” .....	320
<b>Rozhnov I. P., Orlov V. I., Kazakovtsev L. A.</b> Formation of electronic component base with special quality requirements with the use of clustering algorithms .....	322

## Section

## “CONTROL AND TESTING OF AEROSPACE EQUIPMENT”

<b>Bondarenko A. Yu., Mitin A. Yu., Tolchenov V. A., Eykhorn A. N., Yuranev O. A.</b> An approach to ground testing of rockets and space vehicles on transient processes by copra-spring stand .....	326
<b>Dvirniy G. V., Shevchuk A. A., Dvirniy V. V.</b> Possibility of led-based sources application in solar simulator for spacecrafts ground testing .....	329
<b>Ignatenko V. V., Bubnov O. V., Yudintsev A. G.</b> Energy-saving multichannel reciprocal converter .....	332
<b>Komlev G. V., Mukhin S. V., Chudagashev A. V.</b> The data processing centre of the information control system for the liquid rocket engine fire tests implementation .....	334
<b>Maximov D. Y.</b> Cryo-vacuum unit for cleaning the cooling system of the spacecraft from residues and vapors of the LZ-TK heat carrier oil .....	337
<b>Orlov S. A., Kopytov V. I., Matsygorin A. I.</b> On the use of K200 pile-driver benches in shock tests of the board equipment for spacecrafts .....	340
<b>Orlov S. A., Kopytov V. I., Pasko A. V.</b> On some features of tests of spacecrafts on shock impacts of high intensity .....	342
<b>Protsenko E. B., Ikonnikov S. I., Sharov A. A., Kislitsa A. S., Nesterenko I. S.</b> Analysis of ground tests methodology for communication payload .....	344
<b>Soldatov D. A., Soldatova E. S., Kostina M. A., Shylgin E. M.</b> Electrical contact connections diagnostics .....	348

<b>Hahlenkov A. V., Simanov R. S.</b> Repeated use of the working body at fire test of engines of spacecraft correction system .....	350
<b>Shirshov E. O., Sugak E. V.</b> Modern methods of measurement of volumes in missile building .....	352

*Section*

**“SMALL SPACECRAFT: PRODUCTION, EXPLOITATION AND CONTROL”**

<b>Efremova S. V., Hrapunova V. V., Skopintseva L. M.</b> Modular software of the ground-based control complex of small space vehicles .....	355
<b>Kudabayev B., Mikishev G., Anarov M., Kucev M.</b> Development of automatic control system of satellite signals parameters in time division multiplex access channels .....	357
<b>Leonov V. V., Saliev E. R., Tyutyunnik N. N., Shcheglov G. A.</b> Development of universal platform for a small spacecraft aimed at Earth remote sensing .....	359
<b>Lepeshkina E. S., Khanov V. Kh., Shakhmatov A. V.</b> Active fault tolerance using for CubeSat .....	361

*Section*

**“USAGE OF SPACE MEANS, TECHNOLOGIES AND GEOINFORMATION SYSTEM FOR ENVIRONMENTAL MONITORING AND MODELLING”**

<b>Baltajs B. B., Sorokin A. V.</b> Dielectric properties of tree crowns .....	364
<b>Lapko A. V., Lapko V. A.</b> Nonparametric algorithm of automatic classification of a multidimensional random variables in large samples .....	367
<b>Lapko A. V., Lapko V. A.</b> Software to analyze remote sensing data on the basis of nonparametric decision algorithms .....	369
<b>Makarov D. S., Kharlamov D. V., Sorokin A. V.</b> Using signals of navigation satellites in the monitoring of the earth cover .....	371
<b>Matuzko A. K., Yakubailik O. E.</b> Increasing the detail of the satellite mapping of the land surface temperature at Krasnoyarsk .....	374
<b>Tokarev A. V.</b> Drone based device for evaluation of fine particulate air pollution .....	376
<b>Yakubailik O. E.</b> The features of modern data processing systems for remote sensing .....	379

*Section*

**“EXPLOITATION AND RELIABILITY OF AIRCRAFT”**

<b>Akzigitov A. R., Andronov A. S.</b> Introduction of the domestic satellite communication system “Gonets” in process of aircraft monitoring .....	382
<b>Akzigitov R. A., Statsenko N. I., Pisarev N. S.</b> Warning failure calculators flight control and navigation systems of civil aircraft when the use of on-board digital control systems .....	384
<b>Batku O. P., Shestakov I. Y.</b> Wheel drive chassis of the helicopter .....	386
<b>Balalaev S. V., Smirnova T. A., Akzigitov A. R.</b> State purchases in the aviation system of the ministry of emergency situations .....	388
<b>Gerasimova D. S., Palukhin A. A.</b> Replacement of the resource of aircraft components using DSS .....	390
<b>Gorbunov E. V., Andreev D. A., Maynasheva S. O., Kravchenko A. V., Ovsyannikov N. P.</b> Increase of efficiency of continuous monitoring of aircraft by means of GPS-tracker .....	392
<b>Deunezheva M. A.</b> Improvement of metrological support of aircraft metrology laboratory of LLC “Airport Emelyanovo” based on risk-oriented approach .....	394
<b>Dmitriev D. V., Akzigitova I. A., Ogorodnikova Yu. V.</b> On-board radar system of helicopter landing on an unprepared site .....	396

<b>Dmitriev D. V., Akzigitova I. A., Ogorodnikova Yu. V.</b> The automatic control system of the landing maneuver of UAV under the wind effect .....	398
<b>Kozar N. V., Katsura A. V., Strokov D. E., Katsura A. A., Gromova A. A.</b> The optimization of technological processes control of hub airport .....	400
<b>Kolosov V. A., Korkin A. N., Lozovenko S. N., Perfilov A. V., Tsaytler A. V.</b> Heat-insulated container for spacecraft transportation .....	402
<b>Korshunenkov M. V., Barinov A. S., Perevertov V. Yu.</b> Exploring the possibilities of improving the efficiency of updating the aeronautical data of the airbus a320 flight control system .....	404
<b>Legkova T. A., Boyko O. G., Andreev D. A.</b> Applying of the critical path scheduling method for planning of aircraft maintenance services .....	406
<b>Lipatov D. V.</b> Method of maintaining airworthiness of aircraft with on-board digital complex in extremely low temperatures .....	409
<b>Makienko K. V., Katsura A. V., Strokov D. E., Katsura A. A., Gromova A. A.</b> Increase in efficiency of operation of the airport Krasnoyarsk .....	411
<b>Menchikov R. V., Pankeev E. S., Parputs A. A.</b> Methods of technical diagnosing of aviation engines .....	413
<b>Neverov Yu. A., Shinkevich S. M.</b> Information-measuring system of pyrometric type for small unmanned aerial vehicle .....	415
<b>Ogorodnikova J. V., Lucasov V. V., Dmitriev D. V.</b> The operation of the lubrication system of aircraft engine .....	417
<b>Syakov E. E., Afanaseva A. V., Lukasov V. V.</b> The choice of the optimal regional aircraft of Russia .....	419
<b>Terina E. A.</b> Improvement of metrological support of laboratory of aviation metrology of LLC “Yemelyanovo airport” on the basis of the process approach .....	421
<b>Tursungaliyev I. K., Urdukhanov S. R., Stepantsov E. A., Kovalenko G. D.</b> Analysis of influence of environment on remotely piloted aircraft .....	423

*Section*

**“TECHNOLOGY AND MECHATRONICS IN MACHINE BUILDING”**

<b>Binchurov A. S., Indakov N. S., Gordeev Y. I.</b> Influence of technological parameters of rotary turning by multifaceted cutters on quality of surface .....	426
<b>Gusev V. U., Demchenko A. I., Zaitsev R. V., Ananov V. V., Skachkov I. A.</b> The features of the formation of telescopic of welded joints of thin-walled pipelines from austenitic stainless steels made by laser and automated argon-arc welding .....	429
<b>Eliseev A. V., Kuznetsov N. K., Trofimov A. N.</b> Method a generalized function of the gap in the application to the contact interaction of mechanical oscillation systems .....	432
<b>Eliseev S. V., Vuong Q. T., Mironov A. S.</b> Additional ties as a factor of changing the dynamic properties of mechanical oscillatory systems .....	435
<b>Ermakov D. V.</b> The damper based on the trabecular structure .....	438
<b>Zaitsev R. V., Gusev V. U., Ananov V. V., Skachov I. A., Zlobin S. K.</b> Improving the accuracy of fabrication of the waveguide-junction of paths of spacecraft communication .....	440
<b>Zakharova N. V.</b> Optimal loading-speed modes of friction anti-friction coatings .....	442
<b>Lapshin V. L., Bolshakov R. S., Nikolaev A. V.</b> Influence of external disturbances of vibration technological machine work .....	444
<b>Lunin E. A., Zakharova N. V., Karelina E. A.</b> Methods and control devices evaluation of the quality of application of antifriction coating .....	447
<b>Mal'ko L. S., Sukhanova O. A.</b> Features of the design and manufacturing of slotting cutters with mechanical fastening of cutting tool .....	449
<b>Neverov A. L., Buryukin F. A., Zhigarev V. A.</b> Autonomous packer system .....	452

<b>Panas'kov A. O., Shumylyna J. E., Bud'kov V. A.</b> The control system of underwater position mechatronic module with bionic actuator .....	454
<b>Pronin A. V., Ramenskiy V. V., Yankovskaya N. F., Ramenskaya E. V.</b> Rigidity in the production technology of working machines .....	456
<b>Pushkarev A. Y., Vaylov A. V., Amelchenko N. A., Ramenskaya E. V.</b> The influence of the tool of the instrument and the selection of the strategy for milling processing milling .....	458
<b>Rublevskaya E. V., Scherbakova A. V.</b> Use of mechatronic systems in the thermal treatment process .....	460
<b>Sukhanova O. A., Sutyagin A. V., Malko L. S., Trifanov I. V.</b> Metrological support of measurement of cutting force in rotary turning globoid spiral surface .....	462
<b>Trifanov V. I., Oborina L. I., Kvitunov A. S., Trifanov I. V.</b> Improving the efficiency of fuel combustion .....	464
<b>Filippov K. Yu., Ramenskiy V. V., Bokova V. I., Filippov Yu. A., Ramenskaya E. V.</b> Method of design annular saw with internal cutting edge .....	466
<b>Filippov K. Yu., Ramenskiy V. V., Ramenskaya E. V., Filippov Yu. A.</b> Analysis of cylindrical rigidity of hole saws .....	468
<b>Cherepanova D. S., Karelina E. A., Trifanov V. I.</b> A method of manufacturing the waveguide bends .....	470

Section

“MECHANICS OF SPECIAL SYSTEMS”

<b>Gumarova A. A., Ermienko I. Yu., Kukushkin E. V.</b> Investigation of the stress-deformed state of the leaf carded transmission form .....	474
<b>Eresko S. P., Mezhov V. G., Ushakov A. V.</b> Design diagram of the drive for the dynamic calculation of the stand of calibration of wooden spraying plates .....	478
<b>Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V.</b> Automatic control system of hydraulic brake device stand for testing of universal joint transmissions .....	481
<b>Eresko V. S., Eresko S. P., Eresko T. T.</b> Automation of the designing process and production of elastomeric sealants .....	484
<b>Ivanov M. E., Fadeev A. A., Eresko T. T.</b> Creation of the mathematical model of a planetary geared motor with reverse designed brushless DC electric motor .....	488
<b>Ivanov Yu. F., Eresko S. P., Ahmadeev Yu. H., Lopatin I. V., Klopotov A. A.</b> Development of combined electron-ionly-plasma method for formation of multiphase submicro-nanoscale alloys based on aluminum .....	490
<b>Kovalev V. I., Romanenko D. A., Kukushkin E. V.</b> Device for measuring vibration of universal joint gears .....	493
<b>Kukushkin E. V.</b> Investigation of the stressed-deformed condition of the crosspieces of universal joints .....	496
<b>Kustov A. V., Goncharova Ya. S., Karelina A. A., Litvinova M. M.</b> Hydrodynamics of the vortex contact stage of the rectification column .....	500
<b>Kustov A. V., Mezhov V. G., Ya. Yu. Bryksina, P. V. Kharchenko</b> Resistance of a vortex contact step of a rectification column .....	503
<b>Mikhalev O. N., Yanyushkin A. S., Eresko V. S.</b> Design of intelligent processing on CNC machines .....	506
<b>Tsaplin P. V., Eresko S. P., Shastovsky P. S., Meshcheryakova A. V., Alashkevich Y. D.</b> The kinematics of the drive mechanism for the surface treatment of chipboards .....	510
<b>Chulkin S. G., Eliseev K. V., Zinovieva T. V., Piskunov V. A.</b> Calculation of the strength of protective design upon impact .....	513
<b>Shvaleva N. A., Fadeev A. A., Eresko T. T.</b> Mathematical model of the operation of a linear electrodynamic motor upon impact with allowance for elastic deformation .....	515

## Section

## “NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES IN AEROSPACE INDUSTRY”

<b>Vladimirov V. M., Yukseev V. A., Lapukhin E. G.</b> Evolution of a geosynchronous retrograde orbit for monitoring of the Northeast passage and Antarctic region .....	518
<b>Vladimirov V. M., Lapukhin E. G., Yukseev V. A.</b> Optical systems for monitoring of the Northeast passage and Antarctic region .....	520
<b>Gerasimov V. S., Ershov A. E., Bikbaev R. G., Rasskazov I. L., Karpov S. V.</b> The manifestation of additional rayleigh anomalies in periodic plasmonic arrays embedded into a one-dimensional photonic crystal .....	522
<b>Gokhfeld D. M., Gerasimov V. S., Ershov A. E., Isaev I. L.</b> Estimation of the scale of current circulations .....	525
<b>Ershov A. E., Gavriilyuk A. P., Gerasimov V. S., Karpov S. V.</b> Photochromic effects in composite media with plasmonic nanoparticle aggregates in pulsed laser fields .....	527
<b>Kostyukov A. S., Filimonov S. A., Ershov A. E., Gerasimov V. S., Karpov S. V.</b> Optimization of photothermal methods of hyperthermia of malignant cells using nanoparticle core-shell bioconjugates with DNA aptamers .....	529
<b>Kretinin V. V., Fisenko O. B., Yukhno M. Yu.</b> Electrical polarization of solid solutions selenides of manganese .....	532
<b>Loginov Y. Y., Mozhherin A. V., Paklin N. N., Brilikov A. V.</b> Computer simulation of the structural defects formation in cadmium telluride .....	534
<b>Masyugin A. N., Fisenko O. B.</b> Magnetoelectric effect in bismuth-neodymium ferrite-granate films .....	536
<b>Mikhailov M. M., Lovitskiy A. A.</b> About the possibility of using BaSO <sub>4</sub> powders as pigments of thermoregulating coatings of space appliances .....	539
<b>Rayhert I. K., Telegin S. V.</b> Optimization of the layer thickness of a heterogeneous radiation shield .....	541
<b>Ryabikov A. E., Dolgova U. N., Mamaev A. I., Baranova T. A., Chubenko A. K.</b> Nanostructural non-metallic inorganic radio-absorbing coatings for space technology, generated by micro-arc oxidation method .....	543
<b>Senashov S. I., Savostyanova I. L.</b> Hooke's law as a Lie group .....	545
<b>Sitnikov M. N., Kharkov A. M., Masyugin A. N., Fisenko O. B., Mironenko V. V.</b> Electrical properties Tm <sub>x</sub> Mn <sub>1-x</sub> .....	547
<b>Utyushev A. D., Ershov A. E., Gerasimov V. S., Rasskazov I. L., Karpov S. V.</b> Super-narrow selective plasmonic filters for telecommunication wavelength range.....	549
<b>Fedorov L. Yu., Ushakov A. V., Karpov I. V., Lepeshev A. A., Irtyugo L. A.</b> High-temperature superconductors of vacuum arc synthesis for space technology.....	552
<b>Kharkov A. M., Sitnikov M. N., Kretinin V. V., Mironenko V. V., Rybina U. I.</b> Inductivity and good quality solid solutions Tm <sub>x</sub> Mn <sub>1-x</sub> S (x = 0.05, 0.15).....	555

## Section

## “CONTINUUM MECHANICS (GASDYNAMICS, HYDRODYNAMICS, THEORY OF ELASTICITY AND THEORY OF PLASTICITY, REOLOGY)”

<b>Belolipetskii V. M., Genova S. N.</b> One-dimensional model of methane emission in permafrost zones .....	558
<b>Varygina M. P.</b> Numerical modeling of seismic wave propagation generated by the electromagnetic pulse source “Yenisei” .....	560
<b>Vyatkin A. V., Kuchunova E. V.</b> The semi-lagrangian method for the numerical solution of the Navier–Stokes equations of viscous heat-conducting gas .....	562
<b>Gileva L. V., Karepova E. D., Pinykh A. A.</b> The application of special hermite finite elements to the diffusion equation with a variable coefficient .....	564

<b>Kozlova S., Mialdun A., Ryzhkov I., Shevtsova V.</b> The analysis of diffusion coefficients of ternary mixtures in different reference frames .....	566
<b>Matveev A. D.</b> Multigrid finite element method in the calculations of composite beams of irregular shape .....	568
<b>Sabirov R. A.</b> The analysis of the strain state of a thin tube .....	570
<b>Sabirov R. A., Petukhova I. Ya.</b> Variational-difference method of calculation of a plate under conditions of plane stress state in the function of stresses for temperature loads .....	572
<b>Sadovskaya O. V., Sadovskii V. M.</b> Numerical study of wave fields, generated by seismic source “Yenisei”, in blocky-layered media .....	575
<b>Sadovskii V. M., Sadovskaya O. V., Petrakov I. E.</b> On constitutive equations of fibrous composites, differently resistant to tension and compression .....	578
<b>Senashov S. I., Savostyanova I. L.</b> Three-dimensional plastic flow corresponding to a homogeneous stress state .....	581
<b>Smolekho I. V.</b> Parallel implementation of the algorithm considering the influence of electric field on liquid crystals .....	583
<b>Trifanov V. I., Sukhanova O. A., Oborina L. I., Trifanov I. V.</b> Estimate the temperature of the dimensional parameters of the waveguides operating in the UHF range .....	586
<b>Trifanov V. I., Sukhanova O. A., Oborina L. I., Trifanov I. V.</b> Model to calculate the magnitude of the shrinkage during the processing of channel waveguides burnishing .....	588
<b>Chentsov E. P.</b> Modelling of waves propagation process in fractured composite materials with layered and blocky structure .....	589
<b>Shan’ko Yu. V.</b> On higher symmetries of Moutard equation .....	592
<b>Yakubovich M. V.</b> Modelling of motion of multicomponent gas mixture by the combination of semi-lagrangian algorithm and finite element method .....	594

Section

“CHEMISTRY AND CHEMICAL TECHNOLOGIES”

<b>Ashikhin A. S., Semichenko E. S.</b> On the structure of the reaction product of 3-(hydroximino)pentane-2,4-dione and 1-naphthylamine .....	597
<b>Vigul D. O., Kositsyna A. S., Suboch G. A., Tovbis M. S.</b> Study of a new antidetonation additive .....	600
<b>Voronchikhin V. D., Selyutina P. E., Melnikova P. S., Persidskaya D. I., Lyubyashkin A. V.</b> The study of the process of structuring the elastomer compositions in the presence of substituted pyrazoles .....	602
<b>Kruglyakova L. A., Sachivko A. V., Pekhotin K. V., Mamaev I. A.</b> Thermal decomposition kinetics and mechanism of 3,7-dinitrozo-1,3,5,7-tetraazabicyclo[3.3.1]nonane under nonisothermal conditions .....	604
<b>Pen V. R., Levchenko S. I.</b> Mathematical modeling of grind as mechanochemical process 2 .....	607
<b>Pen V. R., Levchenko S. I.</b> Mathematical modeling of grind as mechanochemical process 3 .....	609
<b>Persidskaya D. I., Efimov V. V., Kukushkin A. A., Tovbis M. S.</b> Isotope analysis and fragmentation decay of 4-metoxi-1-(4-chlorophenyl)butane-1,2,3-trion-2-oxime .....	611
<b>Povarov I. G., Shilenkov N. A., Tovbis M. S.</b> Synthesis of new sulphonylamide derivatives of aminophenols and the verification of their structure .....	614
<b>Polezhaeva N. I.</b> Study of the mixing capacity of flux dimethylbenzylammonium bromide, at copper – flux phase boundary .....	617
<b>Polezhaeva N. I.</b> Development of organic binder for solder paste with strictly specified rheological characteristics .....	619
<b>Rajabov A. D., Kukushkin A. A., Root E. V., Suboch G. A.</b> HPLC/MS-analysis of para-nitrosophenoles containing pyridine fragment .....	621