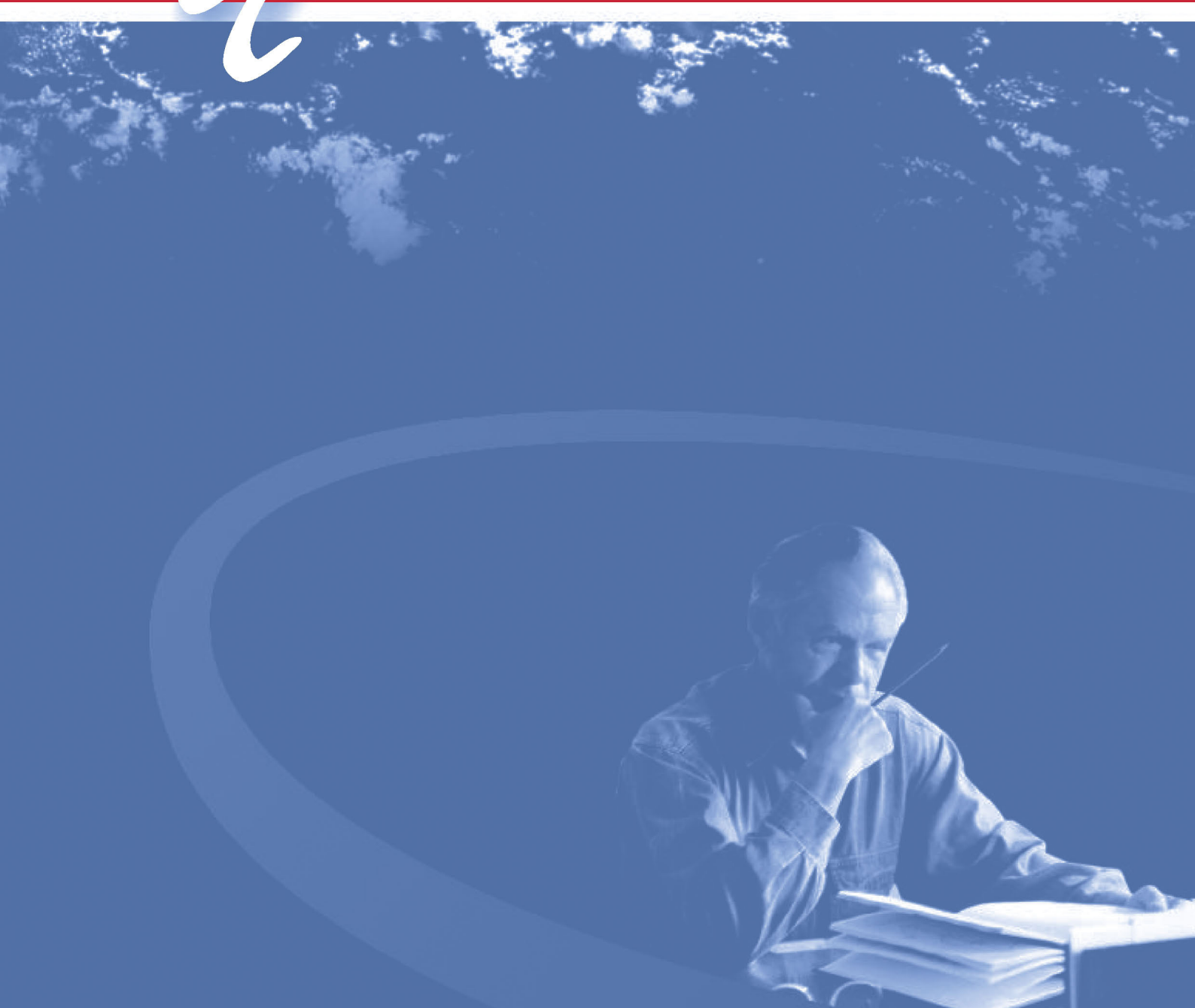


Д Т У ЕШЕТНЕВСКИЕ ТЕНИЯ

ISBN 978-5-86433-846-9



Часть 1
•
XXIV

Красноярск • 2020

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»
Консорциума аэрокосмических вузов России
Технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система»



**РЕШЕТНЕВСКИЕ
ТЕННИЯ**

*Материалы XXIV Международной научно-практической конференции,
посвященной памяти генерального конструктора
ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева
(10–13 ноября 2020, г. Красноярск)*

В 2 ЧАСТЯХ. ЧАСТЬ 1

Электронное издание

Красноярск 2020

© СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2020

УДК 629.7
ББК 30 + 2
Р47

Редакционная коллегия:

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

Под общей редакцией

доктора физико-математических наук Ю. Ю. ЛОГИНОВА

Решетневские чтения [Электронный ресурс] : материалы XXIV Междунар. науч.-практ.
Р47 конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика
М. Ф. Решетнева (10–13 нояб. 2020, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. –
Электрон. текстовые дан. (1 файл: 19,1 МБ). – Систем. требования : Internet Explorer; Acrobat
Reader 7.0 (или аналогичный продукт для чтения файлов формата .pdf) ; СибГУ им. М. Ф. Решет-
нева. – Красноярск, 2020. – Ч. 1. – Режим доступа: [https://reshetnev.sibsau.ru/page/materialy-
konferentsii](https://reshetnev.sibsau.ru/page/materialy-konferentsii). – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-86433-846-9

Сборник содержит материалы XXIV 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 со-
трудников, аспирантов и студентов высших учебных заведений Российской Федерации и стран
ближнего и дальнего зарубежья.

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

В статьях сохранен авторский стиль изложения.

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

**УДК 629.7
ББК 30 + 2**

ISBN 978-5-86433-846-9



Подписано к использованию: 09.11.2020. Объем: 19,1 МБ. С 218/20.

Корректор *Л. В. Звонарева*

Макет и компьютерная верстка *М. А. Светлаковой*

Редакционно-издательский отдел СибГУ им. М. Ф. Решетнева.
660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.
E-mail: rio@mail.sibsau.ru. Тел. (391) 201-50-99.



Уважаемые коллеги!

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

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

Михаил Фёдорович Решетнев – ярчайший представитель той плеяды учёных и организаторов производства, которых в нашей стране принято называть первопроходцами космических трасс. М. Ф. Решетнев остался в нашей памяти как величайший учёный современности, как человек, внесший неоценимый вклад в развитие общества.

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

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

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

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

«Управление космическими системами» (НОЦ УКС) и «Ракетно-космические технологии» (НОЦ РКТ).

В 2020 году исполняется 60 лет со дня образования ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева» (завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института, Красноярский институт космической техники, Сибирская аэрокосмическая академия, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева) и 90 лет со дня образования Сибирского государственного технологического университета (Сибирский лесотехнический институт, Сибирский технологический институт, Красноярская государственная технологическая академия), вошедшего в объединенный университет приказом Минобрнауки России от 17.03.2016 № 225. За годы образования СибГУ им. М. Ф. Решетнева университетам удалось в тесном взаимодействии с базовыми предприятиями решить сложные задачи формирования и развития кадрового и научного обеспечения развития экономики Красноярского края и сибирского региона.

В этом юбилейном для обоих университетов 2020 году проводится очередная, XXIV международная конференция «Решетневские чтения». Общее число участников более 1000, из них в конференции с докладами планируют выступить 576 человек из 35 предприятий и НИИ, 24 университетов, 4 стран и 23 городов. Число секций конференции составляет 31. С 2015 года избранные труды конференции публикуются в журнале Conference Series: Materials Science and Engineering, который индексируется в Scopus.

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

На конференции специалисты-практики, представители базовых предприятий и научного сообщества, студенты профильных направлений подготовки смогут обменяться опытом в области высоких технологий, обсудить перспективы дальнейшей работы, начать совместные проекты. За 24 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!

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

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

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



Секция

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

СТРАТЕГИЧЕСКИЙ БЕСПИЛОТНЫЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ С БОЛЬШОЙ ДАЛЬНОСТЬЮ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬЮ ПОЛЕТА

Р. Н. Агаев, Р. М. Калинин, А. В. Коротеев, А. Г. Ганжин, А. В. Чариков

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

Представлен проектировочный расчет стратегического беспилотного летательного аппарата с аэродинамической схемой тандем. Также представлены 3D-модели проектируемого беспилотного летательного аппарата.

Ключевые слова: стратегический беспилотный летательный аппарат, проектирование, характеристики.

STRATEGIC UNMANNED AERIAL VEHICLE WITH A LONG RANGE AND DURATION OF FLIGHT

R. N. Agaev, R. M. Kalinin, A. V. Koroteev, A. G. Ganjin, A. V. Churikov

Military educational scientific center air force «Air force Academy named after
professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin»
54a, Old Bolsheviks Str., Voronezh, 394064, Russian Federation
E-mail: nurad@yandex.ru

The article presents the design calculation of a strategic unmanned aerial vehicle with a tandem aerodynamic scheme. Also presented are 3D models from the projected unmanned aerial vehicle.

Keywords: strategic unmanned aerial vehicle, design, characteristics.

Беспилотные летательные самолеты, а также беспилотные летательные аппараты (БпЛА) в целом, с каждым годом выполняют все большие и большие задачи как в военной, так и в гражданских сферах.

Эксперты из разных стран, анализируя и наблюдая за возрастающим количеством демонстрируемых в мире беспилотных летательных аппаратах, делают вывод, что дистанционно управляемая беспилотная авиация в ближайшее время начнет господствовать над пилотируемой.

Особенно эта доминация наблюдается в военной сфере.

Активное развитие БпЛА объясняется характерными только им достоинствами. Например, это полное беспилотное управление, относительно малая стоимость, малые затраты на их обслуживание и эксплуатацию, увеличенная дальность и продолжительность полета, связанные с отсутствием усталости экипажа в полете.

К проектируемому БпЛА предъявляются следующие требования:

- обеспечение необходимых условий для размещения боевой нагрузки;
- обеспечение большого радиуса действия, потребного для выполнения поставленных задач;

– возможность функционирования в рамках созданной единой информационной сети, состоящей из различных средств разведки;

– необходимая прочность конструкции.

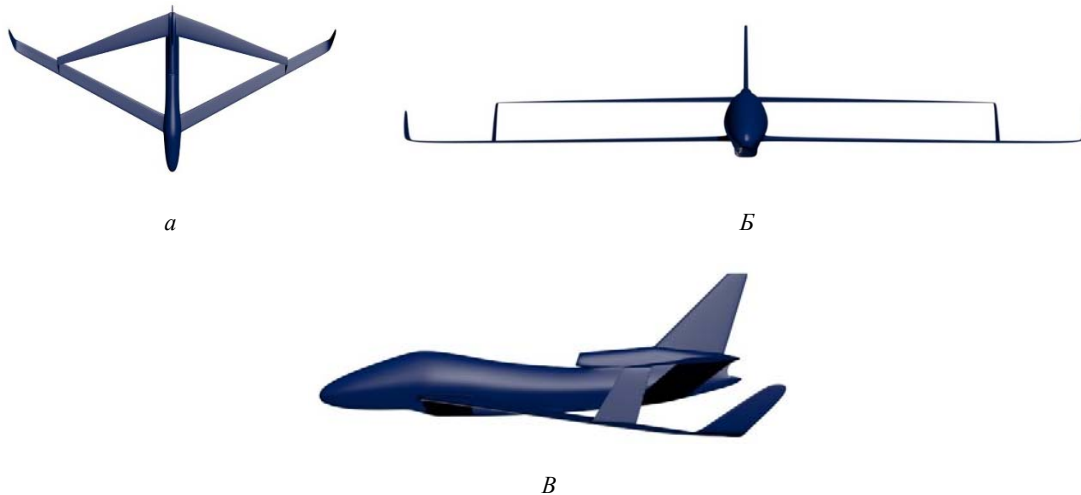
Проектируемый беспилотный летательный аппарат является оперативным самолетом разведчиком, который способен выполнять задачи также такие задачи, как патрулирование, постановку помех, имитировать воздушную мишень. Тактико-технические требования, предъявляемые для проектирования, представлены в табл. 1 [1].

Таблица 1

Основные тактико-технические характеристики проектируемого БпЛА

Тип летательного аппарата	Разведчик	
	Нагрузка целевая	$m_{цн}$, кг
Число М полета крейсерское	$M_{кр}$	0,7
Высота полета	H , км	7
Дальность полета	L , км	5000

В процессе выбора аэродинамической компоновки осуществляется выбор размеров, форм и взаимного расположения крыла, фюзеляжа и оперения, которые образуют внешние аэродинамические обводы. Таким образом определяется аэродинамическое совершенство проектируемого БпЛА.



Стратегический беспилотный летательный аппарат:
a – вид сверху; *б* – вид спереди; *в* – вид сбоку

Среди всего многообразия параметров, характеризующих аэродинамическую компоновку, в расчетах следует ограничиться выбором и определением следующих характеристик и показателей [2; 3]:

1. Тип аэродинамической схемы БПЛА: тандем. Вместо горизонтального оперения применяется второе крыло;

2. Характер размещения двигателя в составе силовой установки: в фюзеляже, в его хвостовой части, в районе килевой надстройки;

3. Формы крыльев в плане, их геометрические характеристики: оба крыла трапецевидные, второе крыло соединено с первым и образует единый контур;

4. Тип и геометрические характеристики вертикального оперения: киль с рулем направления.

После выбора основных проектных параметров проектируемого БПЛА, следует построение его 3D-модели для моделирования. Создание модели состоит из нескольких этапов:

– на первом этапе определяется последовательность создания конструктивных частей и соответствующие для этого методы;

– на втором этапе проводится общая сборка и доработка БПЛА в целом;

– на третьем этапе для создания реалистичной модели осуществляется окончательная визуализация модели БПЛА (см. рисунок).

После проведенных объемно-массовых, геометрических и аэродинамических расчетов были получены параметры и характеристики проектируемого БПЛА (табл. 2).

Проектируемый БПЛА является дистанционно управляемым при помощи лётчика-оператора из наземной станции управления и при необходимости автоматически управляемым, с предварительным заданием программы полета.

Внешний облик спроектированного стратегического БПЛА в каких-то моментах собрал все лучшее у уже существующих образцов БПЛА, но в то же время получился своеобразным и оригинальным.

Таблица 2

Расчетные параметры и характеристики проектируемого БПЛА

Параметры и характеристики	Проектируемый БПЛА
Размах крыла, м	15,65
Длина, м	8
Целевая нагрузка, кг	1200
Взлетная масса, кг	13052
Максимальная скорость полета, км/ч	562
Крейсерская скорость, км/ч	424,8
Мах дальность полета, км	6074
Практический потолок, м	14000
Продолжительность полета, ч	20,35

Библиографические ссылки

1. Выбор основных параметров самолета : учеб. пособие. Воронеж : ВУНЦ ВВС, 2012. 125 с.
2. Основы устройства, проектирования, конструирования и производства летательных аппаратов / под ред. Н. С. Голубева и Ю. И. Янкевича. М. : МАИ, 2005. 283 с.
3. Егер С. М. Проектирование самолетов. М. : Машиностроение, 1983.

References

1. The choice of the main parameters of the aircraft : Textbook. Voronezh : Air Force Research Center, 2012. 125 p.
2. Fundamentals of the design, engineering, construction and production of aircraft / edited by N. S. Golubeva and Y. I. Yankevich. M. : MAI, 2005. 283 p.
3. Yeager S. M. Design of aircraft. M. : Mechanical engineering, 1983.

© Агаев Р. Н., Калинин Р. М., Коротеев А. В., Ганжин А. Г., Чариков А. В., 2020

ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МНОГОЦЕЛЕВОЙ ЭКРАНОПЛАН С ЗАМКНУТЫМ КОНТУРОМ КРЫЛА

Р. Н. Агаев, А. М. Салахов, А. А. Степанов

Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия
имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»
Российская Федерация, 394052, г. Воронеж, ул. Маршала Неделина, 133
E-mail: anvar.salakhov@gmail.com

Рассмотрена возможность создания и применения экранопланов с аэродинамической компоновкой «замкнутое крыло».

Ключевые слова: экраноплан, экранный эффект, замкнутый.

ADVANCED MULTI-PURPOSE SCREEN PLAN WITH CLOSED WING

R. N. Agaev, A. M. Salakhov, A. A. Stepanov

Military Educational and Scientific Centre of the Air Force
N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy
133, Marshal Nedelin Str., Voronezh, 394052, Russian Federation
E-mail: anvar.salakhov@gmail.com

This article is about the possibility of creating and using ekranoplanes with an aerodynamic layout “closed wing”.

Keywords: ekranoplan, ground effect, closed.

Замкнутое крыло способно эффективно реализовывать транспортные задачи по необходимости реализовать большую дальность полета в сравнении с другими компоновками летательных аппаратов.

Данные схемы имеют следующие преимущества:

- большая жесткость конструкции в целом;
- малое индуктивное сопротивление по сравнению с равным стандартным крылом;
- более выгодное распределение давлений во время полета на околозвуковой скорости;
- более высокий коэффициент боковой силы, следовательно, и больший допустимый угол скольжения;
- малая площадь смачиваемой поверхности по сравнению с эквивалентным стандартным крылом и малое значение вредного сопротивления;
- непосредственное управление подъемной силой;
- хорошая устойчивость и управляемость.

Указанные выше преимущества делают компоновку замкнутого крыла особенно привлекательной для различных видов самолетов и экранопланов.

Замкнутое крыло – это компоновка с большой степенью интеграции общей конструкции воздушного судна, в которой части летательного аппарата выполняют сразу множество функций, что делает возможным реализовать малый вес конструкции с более выгодными аэродинамическими характеристиками и транспортной эффективностью, по сравнению с другими решениями.

Данная аэродинамическая компоновка может быть эффективно применена в таком виде транспорта как экраноплан [3].

Экранопланы это высокоскоростные транспортные средства, которые поддерживаются в воздухе за счёт экранного эффекта (воздушной подушки) который образуется путём нагнетания воздушного потока, набегающего на низкой высоте [1].

Достоинства экранопланов:

- высокая живучесть;
- довольно большие скорости (по сравнению с кораблями);
- высокие показатели экономичности и большая грузоподъемность в сравнении с самолётами;
- малая заметность на радарх при полёте на малой высоте, быстрходность, невосприимчивость к противокорабельным минам;
- безопасность при эксплуатации (в случае неисправности в полёте экраноплан плавно приземлится на воду, без совершения каких-либо маневров;
- возможность безаэродромного базирования.

Однако среди всех этих преимуществ есть и недостатки:

- экраноплан движется в непосредственной близости от земли в зонах максимальной концентрации птиц, что негативно влияет на работу двигателей экраноплана;
- низкая маневренность;
- требует специальных навыков пилотирования
- полёт «на экране»: хоть и связан с меньшими энергетическими затратами, чем у воздушного судна, но процедура старта требует большей тяговооружённости, что вызывает необходимость применения дополнительных стартовых двигателей, не задействованных на маршевом режиме (для крупных экрано-

планов), либо особых стартовых режимов для основных двигателей, что ведёт к дополнительному расходу топлива.

Экраноплан с замкнутым крылом (рис. 1), лишен ряда выше перечисленных недостатков. За счет применения такой схемы увеличится дальность полёта и экономичность.

Тактико-технические характеристики:

- размах крыла – 30 м;
- длина – 45 м;
- высота – 11 м;
- масса пустого – 100 000 кг;
- тип двигателей – НК-8-4К, ВСУ-ТА-6А;
- количество двигателей – 4 шт.;
- скорость: крейсерская – 400 км/ч, максимальная – 450 км/ч;
- практическая дальность – 1800 км;
- грузоподъемность – 35000 кг.

Применение экраноплана можно разделить на четыре основных направления:

1) транспортно-десантное – учитывая их высокую мобильность и амфибийность, можно использовать

десантные экранопланы для захвата плацдармов, на которые дальнейшая высадка войск будет производиться с обыкновенных десантных кораблей;

2) поисково-спасательное – для спасения в океане терпящих бедствие судов. В этом случае благодаря своей скорости и дальности экранопланы могут прийти в заданный район практически в любой точке мирового океана гораздо быстрее спасательных кораблей. Высокая мореходность и полезная нагрузка позволит им осуществлять спасение и оказание необходимой помощи прямо в открытом море при большом волнении, чем это могут делать гидросамолеты;

3) ударное – предполагается использовать экранопланы для борьбы с авианосными соединениями вероятного противника. При этом учитывается их высокая скорость, дальность, огневая мощь, малая заметность и трудность поражения экранопланов средствами ПВО;

4) патрульно-противолодочное – слежение и борьба с подводными лодками противника, а также перехват базирующихся на них баллистических ракет на разгонном участке траектории[2].

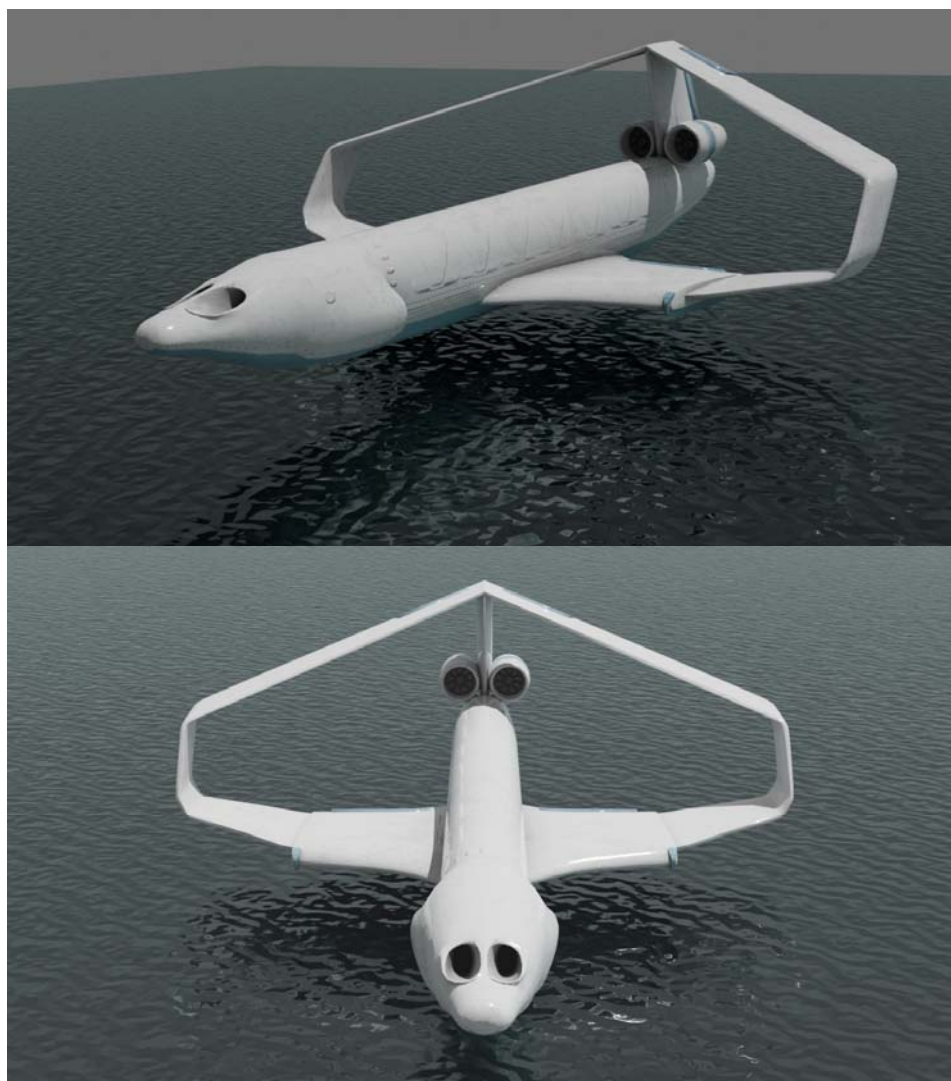


Рис. 1. Экраноплан с замкнутым крылом



Рис. 2. унифицированная ракета X-35УЭ

Вариант возможного вооружения. Для выполнения задач по уничтожению противника предлагается применение ракеты X-35УЭ. Модернизированная активно-пассивная радиолокационная головка самонаведения «Грань-К» позволяет захватывать цели на дальности 50 км, против 20 км у базового варианта. Статус (по состоянию на 17 августа 2011 года): проходит испытания. Диапазон поворота достиг 130°. Имеет корабельное, вертолётное, береговое и самолётное базирование. Высота полёта 10–15 метров на маршевом участке и 3–4 при выходе на цель. Масса боевой части 145 кг.

Тактико-технические характеристики X-35УЭ:

- длина, м: самолётного базирования: 3,85;
- размах крыла, м: 1,33;
- диаметр ракеты, м: 0,42;
- стартовая масса, кг: самолётного базирования – 550;
- двигатель: ТРДД;
- топливо: авиационный керосин;
- система наведения: активная радиолокационная ГСН;
- боевая часть: осколочно-фугасная проникающего типа;
- масса боевой части, кг: 145;
- дальность пуска, км: до 260;
- высота полёта на маршевом участке, м: 10–15;
- высота полёта на конечном участке, м: 3–4;
- скорость полёта: 0,8–0,85 М.

X-35УЭ – это унифицированная противокорабельная ракета (рис. 2). Причем, первая в стране унифицированная ракета, в равной мере ее носителями могут быть надводные корабли, вертолеты, самолеты, береговые ракетные комплексы. И даже подводные лодки, хоть такой вариант использования ракеты пока еще не рассматривался ни ВМФ России, ни ВМС стран, активно закупаящих у нас вооружение и военную тех-

нику. Создание унифицированной ракеты позволило существенно снизить ее стоимость, поскольку сократило расходы на разработку.

Использование беспилотного экраноплана позволяет увеличить экономическую отдачу по сравнению с самолетами (сопоставимого взлетного веса и полезной нагрузки). Это связано с тем, что для экраноплана характерно высокое аэродинамическое качество, влияющее как на эффективность аэродинамической компоновки, так и в конечном итоге на расход топлива. Более того, экраноплан взлетает с воды, следовательно, ему не требуется дорогостоящие аэродромы. Кроме того, экраноплан обладает такими качествами как манёвренность, значительная грузоподъемность, большой радиус действия.

Библиографические ссылки

1. Петров Г. Гидросамолеты и экранопланы России: 1910–1999. Русавиа, 2000.
2. Панченков А., Драчев П. Экспертиза экранопланов. Н. Новгород : ООО Типография «Поволжье», 2006. 656 с.
3. Рахмати А. Аэродинамические характеристики замкнутого параболического крыла. Киев, 2017.

References

1. Petrov G. Seaplanes and ekranoplanes of Russia: 1910–1999. Rusavia, 2000.
2. Panchenkov A., Drachev P. Expertise of ekranoplanes. N. Novgorod : Povolzhye Printing House LLC 2006. 656 p.
3. Rakhmati A. Aerodynamic characteristics of a closed parabolic wing, Kiev, 2017.

© Агаев Р. Н., Салахов А. М., Степанов А. А., 2020

ОТКЛОНЯЕМЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Д. А. Анашкин, Е. П. Олейников

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

Рассматриваются разновидности, технические особенности и области применения отклоняемых поверхностей летательных аппаратов.

Ключевые слова: технические особенности отклоняемых поверхностей, аэродинамические свойства самолета, космические технологии, авиационные технологии, отклоняемые поверхности.

DEFLECTED SURFACES OF AIRCRAFT

D. A. Anashkin, E. P. Oleynikov

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

Varieties, technical features and areas of variation of deflected surfaces of aircraft are considered.

Keywords: technical features of deflected surfaces, aerodynamic properties of the aircraft, space technologies, aviation technologies, deflected surfaces.

В связи с развитием летательных аппаратов и увеличением их основных характеристик, таких как скорость и масса, были созданы отклоняемые поверхности, которые позволяли регулировать подъемную силу, баллистические характеристики, изменять скорость и углы атаки.

На данный момент в конструкции летательных аппаратов существует множество отклоняемых поверхностей, выполняющих самые разнообразные задачи.

К примеру:

1. Отклоняемый закрылок. Представляет регулирующую заднюю секцию крыла. Принцип работы заключается в следующем: при отклонении закрылков кривизна профиля летательного аппарата возрастает, тем самым, увеличивая подъемную силу и повышая лобовое сопротивление. Существует несколько режимов работы закрылков. При взлёте самолёта закрылки, обычно, отклоняются на 15–20 градусов, а при посадке на более большие углы так как, в этом случае, они выполняют ещё и функцию аэродинамических тормозов. Также, закрылки делятся на несколько разновидностей, в зависимости от области применения летательного аппарата: щелевые закрылки, закрылки Гуга, закрылки Заппа, закрылки Юнкерса и др.

2. Предкрылки. Крайний передний силовой элемент крыла самолёта, который способствует увеличению подъемной силы за счёт отклонения вперед, либо же вниз передней кромки крыла, тем самым увеличивая кривизну и площадь, а также, образуя щель, по которой проходит воздушный поток. Предкрылки также имеют свои разновидности, отличающиеся конструкцией, принципом работы и областью применения.

3. Воздушные тормоза. Отклоняемая часть самолёта, которая увеличивает лобовое сопротивление самолета.

4. Элероны. Механизмы аэродинамического управления, которые симметрично расположены на задних консольных кромках крыла, предназначены для управления углом крена самолета. Работают по дифференциальному принципу – отклоняются в противоположные стороны. Принцип работы заключается в том, что у крыла, элерон которого поднят вверх, подъемная сила уменьшается, а у противоположной стороны наоборот – увеличивается, тем самым, изменяя крутящий момент, который определяет скорость вращения самолёта.

5. Интерцепторы (спойлеры). Выпускаемые или отклоняемые поверхности крыла, которые увеличивают лобовое сопротивление и уменьшают подъемную силу. В зависимости от использования и расположения на крыле интерцепторы делят на элерон-интерцепторы и спойлеры. Элерон-интерцепторы являются дополнительной частью элеронов и используются для управления по крену. Спойлеры используются для подавления подъемной силы, используются симметрично на обеих консолях крыла, гася подъемную силу самолёта, тем самым осуществляя его торможение.

Библиографические ссылки

1. Как устроен самолет названия частей самолета [Электронный ресурс]. URL: <https://yandex.ru/turbo/class-tour.com/s/kak-ustroen-samolet-nazvaniya-chastej-samoleta/> (дата обращения: 09.09.2020)

2. Краснов Н. Ф. Аэродинамика. Ч. 1. Основы теории. Аэродинамика профиля и крыла. М. : Libroком, 2010. 498 с.

3. Механизация крыла [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%85%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%BA%D1%80%D1%8B%D0%BB%D0%B0 (дата обращения: 09.09.2020)

4. Закрылок. Википедия [Электронный ресурс] URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D1%80%D1%8B%D0%BB%D0%BE%D0%BA> (дата обращения: 09.09.2020)

5. Новиков В. Н., Авхимович Б. М., Вейтин В. Е. Основы устройства и конструирования летательных аппаратов. М. : Машиностроение, 1991. 368 с.

References

1. Как устроено самолета названа частей самолета [Electronic resource]. URL: <https://yandex.ru/turbo/class->

[tour.com/s/kak-ustroen-samolet-nazvania-cestej-samoleta/](https://yandex.ru/turbo/class-tour.com/s/kak-ustroen-samolet-nazvania-cestej-samoleta/) (access: 09.09.2020)

2. Krasnov N. F. Aerodinamika. Chast 1. Osnovi teorii. Aerodinamika profila I krila. M. F. Librokom, 2010. 498 с.

3. Mexanizacia krila [Electronic resource]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%85%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%BA%D1%80%D1%8B%D0%BB%D0%B0 (access: 09.09.2020)

4. Zakrilok.Wikipedia [Electronic resource]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D1%80%D1%8B%D0%BB%D0%BE%D0%BA> (access: 09.09.2020)

5. Novikow V. N., Avximovitch B. M., Veitin V. E. Osnovi ystroistva I konstryirovania letatelnix apparatov. M. : Mashinostroenie, 1991. 368 с.

© Анашкин Д. А., Олейников Е. П., 2020

УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В КОМПОЗИТНЫХ СЕТЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЯХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ*

Л. А. Бабкина*, А. В. Лопатин

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

*E-mail: L_babkina@mail.ru

В работе выполнено численное моделирование теплопереноса в композитных сетчатых конструкциях с целью отвода избыточного тепла, аккумулируемого медным кольцом, интегрированным в структуру.

Ключевые слова: численное моделирование, композитная оболочка, теплоперенос.

NUMERICAL MODELING OF HEAT TRANSFER IN COMPOSITE MESH STRUCTURES OF SPACECRAFT

L. A. Babkina*, A. V. Lopatin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: L_babkina@mail.ru

In this work, a numerical simulation of heat transfer in composite anisogrid structures is carried out in order to remove excess heat accumulated by a copper ring integrated into the structure.

Keywords: numerical simulation, composite shell, heat transfer.

Сетчатые анизогридные цилиндрические оболочки, изготавливаемые из высокомодульных углепластиков, широко используются в качестве конструктивных элементов космических аппаратов [1–3]. Эти сетчатые оболочки можно разделить на две основные группы. В первую группу входят корпуса космических аппаратов, которые нагружаются во время запуска и рассчитаны на минимальную массу при ограничениях по прочности и жесткости. Ко второй группе относятся космические конструкции, не испытывающие действия значительных нагрузок при запуске и работе в космосе. Такие конструкции должны обладать достаточной жесткостью, термостойкостью и минимальной массой.

В работе рассматривается задача теплопереноса в композитной сетчатой цилиндрической оболочке, являющейся составной частью космического телескопа. Один край оболочки нагревается, прикрепленным к нему оборудованием. Тепло по спиральным ребрам распространяется ко второму краю оболочки. На этом краю расположено оборудование, чувствительное к нагреву. Для уменьшения теплового потока от одного края оболочки к другому предлагается добавить в сетчатую структуру кольцевое ребро, выполненное из меди. Для моделирования теплопереноса в сетчатой оболочке была создана конечно-элементная модель (рис. 1) [4]. Эта модель состоит из трехмерных твер-

дотельных конечных элементов, используемых в пакете SolidWorks Simulation [5].

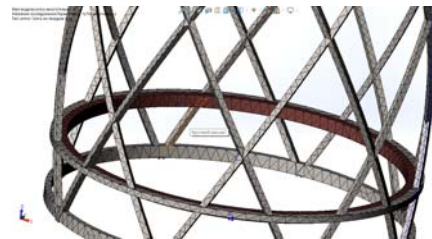


Рис. 1. Конечно-элементная модель

Край оболочки, служащий источником тепла, подвергался воздействию определенной температуры. Были выполнены два расчета тепловых полей в сетчатой оболочке. В первом расчете сетчатая структура не содержала медного кольцевого ребра. Во втором расчете это кольцо было введено в структуру оболочки. Картина теплового поля в оболочке с ребром показана на рис. 2. Из сравнения температурных полей, рассчитанных для двух конструкций сетчатой оболочки, следует, что введение медного кольца позволяет значительно снизить температуру сетчатой структуры на краю оболочки, на котором находится аппаратура, чувствительная к нагреву.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, уникальный идентификатор проекта RFMEF160419X0233.

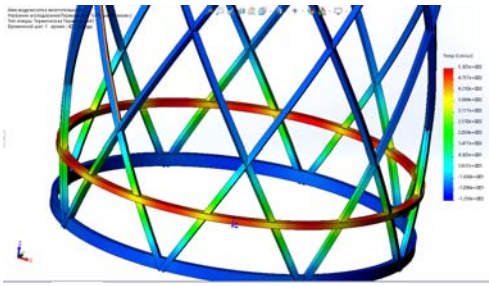


Рис. 2. Картина теплового поля в сетчатой конструкции из углепластика с медным кольцевым ребром

Таким образом, в работе предложен и проанализирован способ отвода тепла в композитных сетчатых цилиндрических оболочках, используемых в конструкциях космических телескопов.

Библиографические ссылки

1. Vasiliev V. V., Barynin V. A., Rasin A. F. Anisogrid lattice structures – survey of development and application. *Composite Structures*. 2001. № 54. P. 361–370.
2. Vasiliev V. V., Rasin A. F. Anisogrid composite lattice structures for spacecraft and aircraft applications. *Composite Structures*. 2006. № 76. P. 182–189.
3. Vasiliev V. V., Barynin V. A., Rasin A. F. Anisogrid composite lattice structures – development and aerospace applications. *Composite Structures*. 2012. № 94. P. 1117–1127.
4. Лопатин А. В., Шатов А. В., Бабкина Л. А. Создание конечно-элементных моделей композитных

сетчатых конструкций в программном комплексе FEMAP/NX NASTRAN : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017. 92 с.

5. Алямовский А. А. *SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации*. М. : ДМК Пресс, 2015. 562 с.

References

1. Vasiliev V. V., Barynin V. A., Rasin A. F. Anisogrid lattice structures – survey of development and application. *Composite Structures*. 2001. № 54. P. 361–370.
2. Vasiliev V. V., Rasin A. F. Anisogrid composite lattice structures for spacecraft and aircraft applications. *Composite Structures*. 2006. № 76. P. 182–189.
3. Vasiliev V. V., Barynin V. A., Rasin A. F. Anisogrid composite lattice structures – development and aerospace applications. *Composite Structures*. 2012. № 94. P. 1117–1127.
4. Lopatin A. V., Shatov A. V., Babkina L. A. *Sozdanie konechno-jelementnyh modelej kompozitnyh setchatyh konstrukcij v programmnom komplekse FEMAP/NX NASTRAN* [Creation of finite element models of composite mesh structures in the FEMAP / NX NASTRAN software package] / Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2017. 92 p.
5. Aljamovskij A. A. *SolidWorks Simulation. Inzhenernyj analiz dlja professionalov: zadachi, metody, rekomendacii*. [Engineering analysis for professionals: tasks, methods, recommendations.] M. : DMK Press, 2015. 562 p.

© Бабкина Л. А., Лопатин А. В., 2020

УДК 521.313

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОСКУЛИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ ЭВОЛЮЦИИ ОРБИТЫ

П. А. Воложанин, А. В. Нестерова, В. В. Кольга, А. В. Быков

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

Рассмотрено пространственное определение космического аппарата. Смоделировано движение космического аппарата в оскулирующих координатах. Получена эволюция орбиты с учетом возмущающего ускорения.

Ключевые слова: орбита, космические аппараты, моделирование, оскулирующие элементы.

THE USE OF OSCULATING ELEMENTS IN PREDICTION OF ORBIT EVOLUTION

P. A. Volozhanin, A. V. Nesterova, V. V. Kolga, A. V. Bykov

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

The article deals with the spatial definition of a spacecraft. The movement of the spacecraft in osculating coordinates has been modeled. The evolution of the orbit is obtained taking into account the disturbing acceleration.

Keywords: orbit, spacecraft, modeling, osculating elements.

В настоящее время космическая промышленность занимает значительную роль в жизни людей. Спутниковые системы позволяют обеспечивать обмен информацией по всему миру, без чего жизнь современного человека не представляется возможной. Обеспечение вывода и поддержания орбит этих самых систем ложится на плечи инженеров, задействованных в космической отрасли. Для вывода космического аппарата на орбиту используют разгонные блоки, во время работы они создают ускорение для изменения траектории движения, но также на космический аппарат действуют возмущающие ускорения со стороны различных тел солнечной системы и не только. Данные факторы могут исказить необходимую орбиту.

Стандартная задача двух тел не способна решить данную проблему. Для этого прибегнем к так называемым оскулирующим элементам.

Уравнение задачи двух тел с учетом возмущенного ускорения выглядит следующим образом:

$$\ddot{r} = \mu \frac{r}{r^3} = F.$$

Если $F \neq 0$, то орбита, в общем случае, не будет коническим сечением. Однако можно считать, что в каждый момент времени спутник находится на некотором коническом сечении, а именно, на той Кеплеровой орбите, на которой он оказался бы, если в рассматриваемый момент времени действие возмущающего ускорения прекратится. Для каждого момента времени t будет своя такая Кеплерова орбита. Ее эле-

менты с течением времени меняются, но в каждый момент времени эта орбита касается истинной траектории спутника в той самой точке, где в этот момент находится спутник. Непрерывно меняющаяся Кеплерова орбита, которая строится таким образом, называется оскулирующей орбитой, а ее элементы $\Omega(t), i(t), \omega(t), p(t), e(t), \tau_\pi(t)$, называются оскулирующими. Если функции известны, то можно найти положение спутника в любой момент времени [1–3].

Решение системы дифференциальных уравнений, в оскулирующих элементах, было реализовано в программном пакете Maple.

В качестве расчетного случая был выбран переход с низкой опорной орбиты (НОО), на геостационарную орбиту (ГСО) при помощи разгонного блока «Бриз-М», где в качестве возмущающего ускорения представлена работа двигательной установки С5.98М.

Получен общий вид траектории (рис. 1), данная траектория наиболее приближена к реальной. Так как двигательная установка в течение какого-то времени передает импульс космическому аппарату, орбита изменяется постепенно, переходя от одного эллипса к другому.

Также были получены зависимости радиус вектора исходящего от центра Земли до исследуемого объекта (рис. 2, а) и абсолютной скорости этого объекта относительно центра Земли (рис. 2, б).

В результате реализации задачи двух тел с учетом возмущающего ускорения удалось получить эволюцию орбиты.

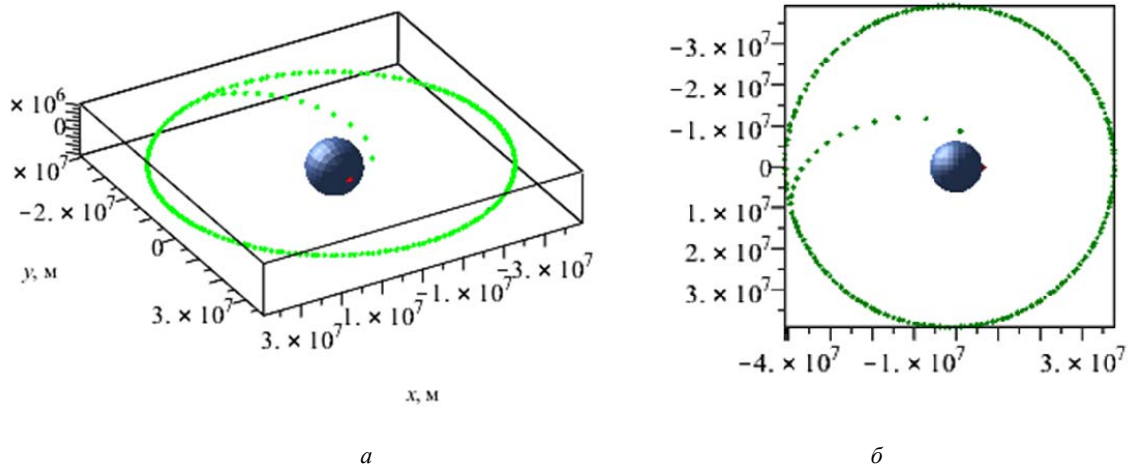


Рис. 1. Траектория вывода на ГСО в результате расчета

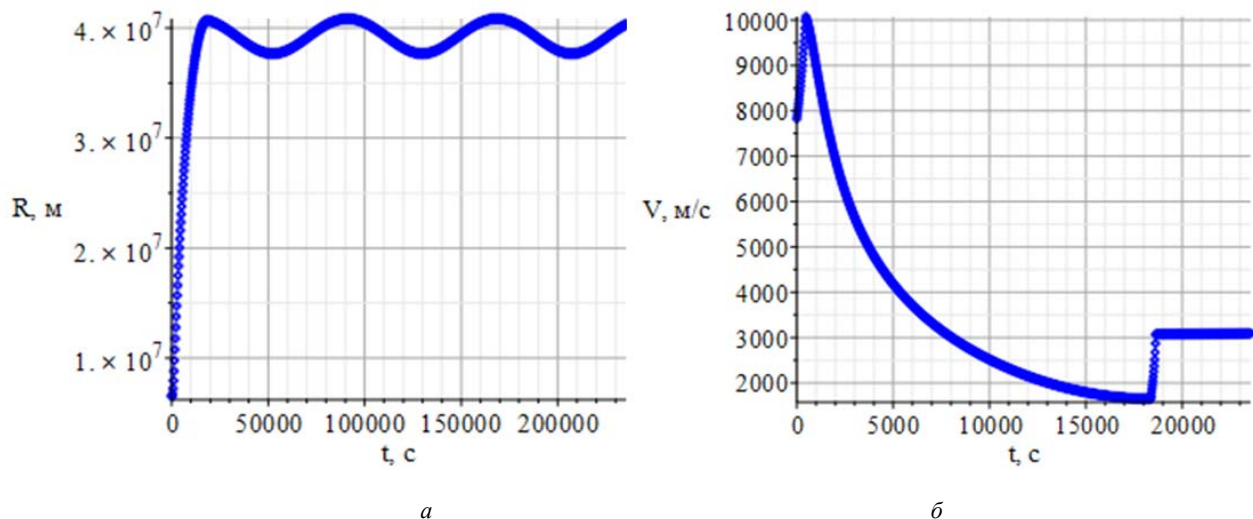


Рис. 2. Параметры движения КА

Таким образом, определив положение космических тел солнечной системы, предоставляется возможным учесть возмущение космического аппарата и построить трехмерную траекторию его движения и соответственно принять меры для нивелирования этого возмущения с целью поддержания текущей орбиты.

Библиографические ссылки

1. Мирер С. А. Механика космического полета орбитального движения. Резолит, 2007. 270 с.
2. Аппазов Р. Ф., Сытин О. Г. Методы проектирования траекторий носителей и спутников Земли. М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1987. 436 с.
3. Механика космического полета / М. С. Константинов, Е. Ф. Каменков, Б. П. Перельгин,

В. К. Безверевый ; под ред. В. П. Мишина. М. : Машиностроение, 1989. 408 с.

References

1. Mirer S. A. *Mehanika kosmicheskogo poleta orbital'nogo dvizhenija*. Rezolit, 2007. 270 p.
2. Appazov R. F., Sytin O. G. *Metody proektirovaniya traektorij nositelej i sputnikov Zemli*. M. : Izdatel'stvo "Nauka". Glavnaja redakcija fiziko-matematicheskoy literatury, 1987. 436 p.
3. *Mehanika kosmicheskogo poleta* / M. S. Konstantinov, E. F. Kamenkov, B. P. Perelygin, V. K. Bezverevy; pod red. V. P. Mishina. M. : Mashinostroenie, 1989. 408 p.

© Воложанин П. А., Нестерова А. В.,
Кольга В. В., Быков А. В., 2020

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

А. С. Елпатов*, С. В. Харлашина, Т. Г. Орешенко

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

*E-mail: norcivx@gmail.com

В течение долгого времени ученым не удается решить проблему объединения общей теории относительности и квантовой механики, в данной статье выдвигается гипотеза, доказательство которой может привести к решению данной проблемы.

Ключевые слова: электромагнитные поля, общая теория относительности, квантовая механика.

ELECTROMAGNETIC FIELDS IN SPACE

A. S. Elpatov*, S. V. Kharlashina, T. G. Oreshenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: norcivx@gmail.com

For a long time, scientists have not been able to solve the problem of combining General relativity and quantum mechanics this article puts forward a hypothesis, the proof of which can lead to a solution to this problem.

Keywords: electromagnetic fields, General relativity, quantum mechanics.

Одной из нерешенных задач современной науки является объединение разных разделов физики, общей теории относительности и квантовой механики. Общая теория относительности описывает один из видов взаимодействия – гравитацию. В свою очередь, квантовая механика описывает электромагнитное, сильное и слабое взаимодействие [1]. В данной статье будет представлена гипотеза влияния электромагнитного поля в межзвёздном пространстве на траекторию движения космических объектов.

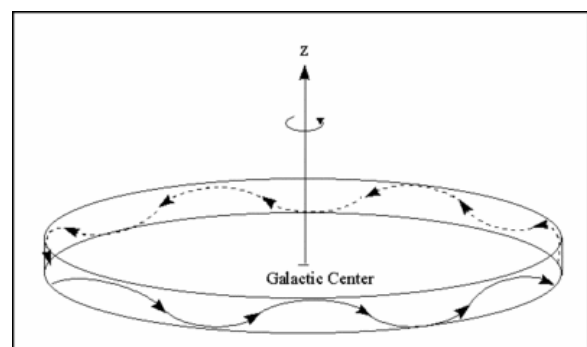
Главным противоречием между квантовой механикой и ОТО, является отсутствие частиц-переносчиков гравитации. В квантовой теории, электромагнитное взаимодействие пользуется фотонами, сильное – глюонами, а слабое – w и z бозонами [2].

В 2015 г. ученые смогли доказать теорию о том, что черная дыра в центре галактики обладает электромагнитным полем, с помощью которого захватывается материя вблизи неё, а также выбрасывается эта материя в виде джетов. Также было установлено, что сила электромагнитного поля в отдельных местах изменялась каждые 15 минут [3]. С учетом этих данных, можно предположить, что черная дыра является своеобразным генератором электромагнитных волн с периодом T равным 15 минутам и длиной волны λ равной метрам $27 \cdot 10^{10}$. Известно, что траектория движения Солнца относительно центра галактики имеет вид, как показано на рисунке [4]. Если сопоставить эти два факта, можно увидеть зависимость траектории Солнца и электромагнитными волнами излучающейся черной дырой в центре галактики.

Принято полагать, что квантовая теория не влияет на объекты крупнее атомов и заряженных частиц из-

за замедления времени, которое обусловлено гравитационным взаимодействием, что неоднократно подтверждалось экспериментами, проводимыми учеными, которые говорят нам о том, что время течет неоднородно внутри гравитационных полей [5].

При сопоставлении вышеупомянутых фактов, можно выдвинуть следующую гипотезу: электромагнитные волны, излучающиеся черной дырой в центре галактики, оказывают влияние на траекторию движения Солнца.



Траектория движения Солнца вокруг центра галактики

Данная гипотеза расходится с положением ОТО на основании того, что на объекты больших по размеру, чем атомы и заряженные частицы, действует электромагнитное поле. Тем не менее с учетом размеров галактики и солнечной системы, можно считать Солнце магнитоактивной частицей бесконечно малых размеров, в соответствии с этим предположением.

Доказательство гипотезы требует нахождения зависимости колебаний траектории Солнца от колебаний электромагнитной волны исходящей от черной дыры в центре галактики. Если они будут зависеть друг от друга, то будет доказано влияние электромагнитных волн на сверхтяжелые тела, что приводит к противоречиям ОТО и вероятному решению проблемы объединения ОТО и квантовой механики.

Библиографические ссылки

1. В чем противоречие между теорией относительности и квантовой механикой? [Электронный ресурс]. URL: https://zen.yandex.ru/media/deep_cosmos/v-chem-protivorechie-mejdu-teoriei-otnositelnosti-i-kvantovoi-mehanikai-5c4f8925f6778500aeece7e5 (дата обращения: 05.09.2020).

2. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 9. Квантовая механика. М. : Мир, 1967.

3. Разрешенная структура и изменчивость магнитного поля вблизи горизонта событий Стрельца А* / Майкл Д. Джонсон, Винсент Л. Фиш, Шеперд С. Доулеман и др. // Сайнс. 2015. № 6265.

4. Как движется Солнечная система [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/post/410291/> (дата обращения: 05.09.2020).

5. В чем конфликт ОТО и квантовой механики? [Электронный ресурс]. URL: [https://hi-news-ru.turbopages.org/hi-news.ru/s/science/chtivo-v-chem-konf-](https://hi-news-ru.turbopages.org/hi-news.ru/s/science/chtivo-v-chem-konflikt-oto-i-kvantovoj-mexaniki.html)

[likt-oto-i-kvantovoj-mexaniki.html](#) (дата обращения: 05.09.2020).

References

1. What is the contradiction between the theory of relativity and quantum mechanics? [Electronic resource]. URL: https://zen.yandex.ru/media/deep_cosmos/v-chem-protivorechie-mejdu-teoriei-otnositelnosti-i-kvantovoi-mehanikai-5c4f8925f6778500aeece7e5 (access: 05.09.2020).

2. Feynman R., Leighton R., Sands M. The Feynman lectures on physics. Iss. 9. Quantum mechanics. M. : Mir, 1967.

3. Resolved magnetic-field structure and variability near the event horizon of Sagittarius A* / Michael D. Johnson, Vincent L. Fish, Sheperd S. Doeleman and others // Science. 2015. № 6265.

4. How the Solar system moves [Electronic resource]. URL: <https://habr.com/ru/post/410291/> (access: 05.09.2020).

5. What is the conflict of General relativity and quantum mechanics? [Electronic resource]. URL: <https://hi-news-ru.turbopages.org/hi-news.ru/s/science/chtivo-v-chem-konflikt-oto-i-kvantovoj-mexaniki.html> (access: 05.09.2020).

© Елпатов А. С., Харлашина С. В.,
Орешенко Т. Г., 2020

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ РАЗМЕЩЕНИЯ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ОТСЕКАХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

И. В. Железнов*, Ю. А. Рогачева, А. И. Шулепов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева
Российская Федерация, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34
*E-mail: zheleznov.ilia2016@yandex.ru

Разработан алгоритм размещения бортового оборудования в отсеках космических аппаратов. Применение данного алгоритма позволит ускорить процесс проектирования отсека КА, а также повысить качество отечественной космической техники.

Ключевые слова: бортовое оборудование, алгоритм размещения, программное обеспечение, летательный аппарат, массо-центровочные характеристики.

ON ONE METHOD OF PLACING ON-BOARD EQUIPMENT IN SPACECRAFT COMPARTMENTS

I. V. Zheleznov*, Yu. A. Rogacheva, A. I. Shulepov

Samara National Research University
34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation
*E-mail: zheleznov.ilia2016@yandex.ru

The proposed algorithm for the placement of an on-board equipment in the compartments of the spacecraft. Using this algorithm will speed up the process of designing the spacecraft compartment, as well as improve the quality of domestic space technology.

Keywords: on-board equipment, placement algorithm, software, aircraft, mass-centering characteristics.

В настоящее время операции по размещению бортового оборудования в отсеках космических аппаратов (КА) осуществляются непосредственно проектантом. Создание первоначального облика отсека КА занимает много времени и не всегда соответствует заданным требованиям проекта на данной стадии разработки. Поэтому возникает необходимость в разработке специальных алгоритмов размещения бортового оборудования и автоматизации данных операций. Это позволит существенно сократить время на компоновочные работы и ускорить процесс проектирования космического аппарата [1–3].

В задаче рассматривается грубая модель описания космического аппарата. В качестве зоны размещения в отсеке взят многогранник в виде прямоугольного параллелепипеда. Приборы и агрегаты описываются в виде прямоугольных параллелепипедов.

Процесс размещения бортового оборудования в отсеке космического аппарата осуществляется в программном обеспечении в два этапа. Блок-схемы основных циклов каждого этапа представлены на рисунке.

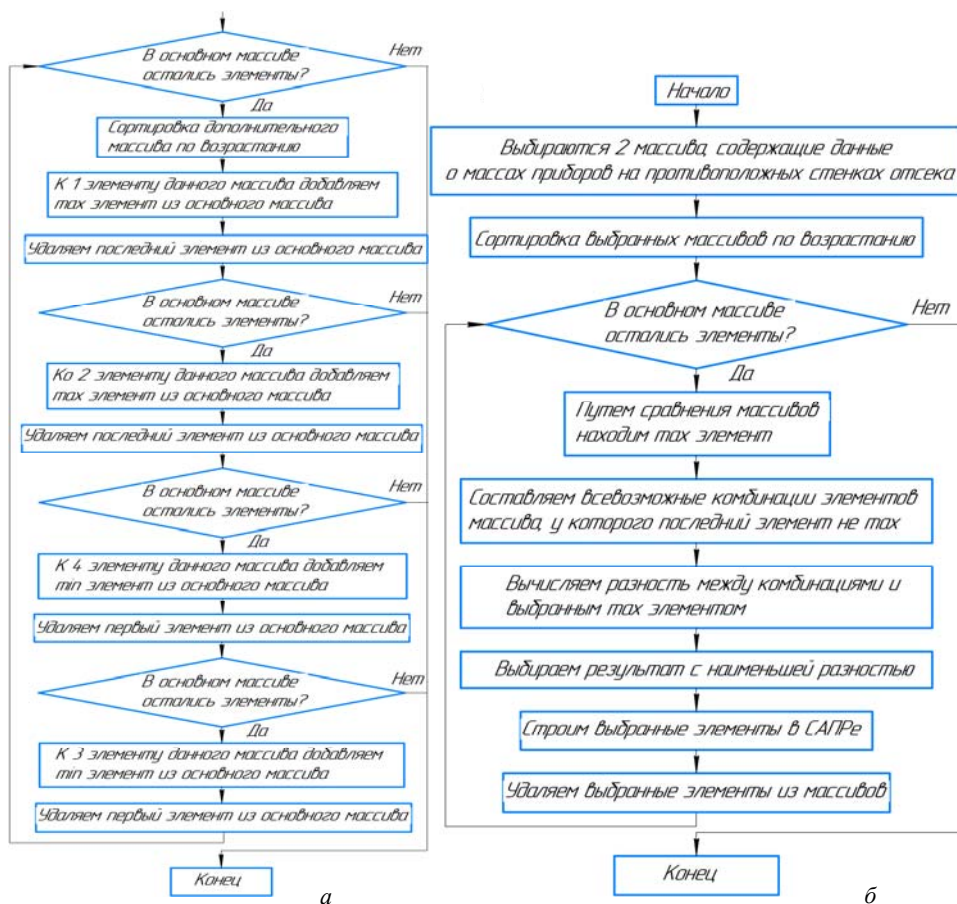
На первом этапе осуществляется размещение приборов по боковым стенкам отсека по массовому критерию. На следующем этапе происходит корректировка массо-центровочных характеристик путем комбинирования приборов на противоположных стенках.

Алгоритм размещения приборов по боковым стенкам отсека по массовому критерию осуществляется следующим образом: первоначально элементы основного массива данных, содержащие информацию о массе каждого прибора, сортируются в порядке воз-

растания, далее на боковые стенки размещаются четыре прибора, масса которых соответствует значениям последних элементов данного массива, и начинается работа основного цикла алгоритма. Создается дополнительный массив, содержащий информацию о суммарной массе размещенных на каждой стенке приборов. В основном цикле алгоритма происходит сортировка элементов дополнительного массива по возрастанию. Затем по массовому критерию к первым двум элементам добавляются максимальные из оставшихся основного массива, а к остальным – минимальные. На каждой итерации использованные элементы удаляются.

Цикл завершается удалением последнего элемента из основного массива данных.

Корректировка результата, полученного на первом этапе, осуществляется путем нахождения оптимальных по массовому критерию групп приборов на противоположных стенках. Основной цикл второго этапа работает по следующему принципу: элементы массивов, содержащие информацию о массе приборов на противоположных стенках, сортируются по возрастанию. Далее происходит выбор максимального по массовому критерию элемента среди этих массивов. Последний этап работы цикла осуществляется нахождением группы приборов на противоположной стенке, разность, по массе которой с выбранным элементом будет минимальной. На каждой итерации использованные элементы удаляются [4]. Цикл завершается удалением последнего элемента из основного массива данных.



Блок-схемы основных циклов первого (а) и второго (б) этапов алгоритма соответственно

Для получения облика отсека КА в первом приближении осуществляется связь разработанного программного обеспечения с САПР SolidWorks 2012 и Microsoft Access 2016, посредством OLE и COM, ADO технологий [5].

Входными данными являются массы и объемы приборов, полученные из базы данных, созданной в Microsoft Access 2016. Результатом работы программы являются 3D-модели приборов и отсека КА. Дальнейшую работу по созданию облика отсека КА проектант может продолжить непосредственно в САПР SolidWorks 2012.

Данное программное обеспечение является универсальной платформой для создания первоначального облика отсеков КА. Для получения более точных моделей возможна модернизация путем добавления дополнительных критериев, например, с учетом рабочих температур приборов.

Библиографические ссылки

1. Гаврилов В. Н. Автоматизированная компоновка приборных отсеков летательных аппаратов. М. : Машиностроение, 1988. 136 с.
2. Туманов А. В., Зеленцов В. В., Щеглов Г. А. Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов : учеб. пособие. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 344 с.
3. Гущин В. И. Основы устройства космических аппаратов : учебник для вузов. М. : Машиностроение, 2003. 272 с.

4. Архангельский А. Я. Программирование в Delphi 7. М. : Бинум-Пресс, 2003. 1152 с.

5. Салмин В. В., Четвериков А. С., Гоголев М. Ю. Расчет проектно-баллистических характеристик и формирование проектного облика межорбитальных транспортных аппаратов с электрореактивной двигательной установкой с использованием информационных технологий : учеб. пособие. Самара : Изд-во Самарского ун-та, 2019. 196 с.

References

1. Gavrilov V. N. Automated arrangement of instrument compartments of aircraft. M. : Engineering, 1988. 136 p.
2. Tumanov A. V., Zelentsov V. V., Shcheglov G. A. Basics of layout of on-board spacecraft equipment : text. manual. M. : Publishing House MSTU named after N. E. Bauman, 2010. 344 p.
3. Gushchin V. I. Fundamentals of spacecraft design: a textbook for universities. M. : Engineering, 2003. 272 p.
4. Arkhangelsk A. Ya. Programming in Delphi 7. M. : Binom-Press, 2003. 1152 p.
5. Salmin V. V., Chetverikov A. S., Gogolev M. Yu. Calculation of design and ballistic characteristics and the formation of the design appearance of interorbital vehicles with an electric reactive propulsion system using information technologies: textbook. Samara: Publishing House of Samara University, 2019. 196 p.

© Железнов И. В., Рогачева Ю. А., Шулепов А. И., 2020

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МАЧТЫ РЕФЛЕКТОРА

Д. А. Замятин, В. В. Кольга

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

Выбор оптимальной конструкции мачты и углов намотки композиционного материала на основании анализа прочностных характеристик изделия.

Ключевые слова: метод конечных элементов, космический аппарат, рефлектор антенны, полимерный композиционный материал.

MODELING OF REFLECTOR MAST CONSTRUCTION

D. A. Zamyatin, V. V. Kolga

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

Choosing the optimal design of the mast and the composite material winding angles based on the analysis of the strength characteristics of the product.

Keywords: finite element method, spacecraft, antenna reflector, polymer composite material.

Для подготовки к этапу силовых испытаний изделий ракетно-космической техники (РКТ) важно обеспечить должный уровень точности и адекватности расчёта конечно-элементной модели изделия в системах автоматизированного проектирования (САПР). Задание граничных условий математической модели нагружения силовых конструкций, применяемых в РКТ, может быть осложнено свойствами самой конструкции, если речь идёт о геометрически сложных изделиях, либо об изделиях, изготавливаемых из композиционных материалов.

Одной из ключевых особенностей проектирования изделий, изготавливаемых из полимерных композиционных материалов (ПКМ), является зависимость прочности в том или ином направлении от количества и взаимного расположения слоёв материала. С одной стороны это даёт широкие возможности задания механических свойств, позволяя получить нужные характеристики при минимальной массе; с другой стороны затрудняет обеспечение повторяемости мелкосерийных изделий. Некорректно заданные граничные условия могут стать потенциальной причиной значи-

тельного расхождения результатов расчёта механических свойств компьютерной модели с результатами испытаний опытных образцов изделия [1].

На примере мачты рефлектора антенны космического аппарата приводится описание конечно-элементной модели, соответствующей схеме испытательного образца реального изделия.

Целью испытаний мачты рефлектора антенны космического аппарата (КА) является получение фактических значений прогибов при статических испытаниях. Так, проводятся испытания на изгиб мачты, локальный прогиб (см. рисунок).

Задачи испытаний:

- анализ полученных данных для выбора наиболее подходящих вариантов конструкции мачты при использовании её в составе механизма выдвижения мачты (МВМ);
- оценка изделия на соответствие техническому заданию (ТЗ);
- определение технического уровня;
- определение возможности поставки продукции в производство [2].



Схема нагружения мачты рефлектора при испытании на локальный прогиб

Для построения математической модели процесса испытаний мачты рефлектора антенны космического аппарата необходим анализ существующих, применяющихся на сегодняшний день методик расчёта прочностных характеристик, после чего вносятся предложения по оптимизации расчётной схемы для повышения сходимости результатов теоретических и практических исследований характеристик изделия.

Для создания и анализа расчётной модели используется метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в системе моделирования и конечно-элементного анализа в программном комплексе ANSYS.

В конечно-элементной модели объект заменяется дискретной моделью, которая представляет собой совокупность узлов и связанных с ними конечных элементов с заданными свойствами. Мачта с фланцами, обечайка и корпус моделируются оболочечными конечными элементами типа SHELL181. Стык обечайки и корпуса реализован объединением контактирующих узлов. Интерфейс с мачтой обеспечивается введением соответствующих уравнений связи в зоне зачекочки мачты в рабочем положении (по всем степеням свободы) и в зоне опоры на ролики у основания (по нормали к поверхности мачты) [3].

В процессе моделирования на этапе геометрического построения поверхность мачты была разбита на поверхности, размеры и положение которых совпадают с размерами и положением узлов тепловой модели мачты. Полученные поверхности моделировались элементами многослойной оболочки с конечными деформациями.

Граничные условия соответствуют закреплению посадочной плоскости рефлектора по всем степеням свободы.

При моделировании материала мачты как многослойного углепластика схема армирования задаётся согласно конструкторской документации (КД):

$$[(-\alpha^0 / +\alpha^0) + 90^0] \cdot 5,$$

где $(-\alpha^0 / +\alpha^0)$ – углы намотки пары перекрестных слоёв жгута к оси трубы; (90^0) – слой стеклонити, пропитанной связующим.

В составе механизма выдвижения мачты (МВМ) цилиндрическая часть мачты подвергается одновременно сжимающей и изгибающей нагрузкам, что существенно осложняет задачу выбора оптимального углов намотки и количества слоёв угольного жгута, служащего наполнителем ПКМ мачты.

Выбором углов намотки определяется баланс между осевой и поперечной жёсткостью конструкции мачты, что влияет также на значение минимальной массы. При этом основным источником неравномерности распределения нагрузок является закреплённая вдоль корпуса мачты зубчатая рейка, служащая для приведения мачты в составе МВМ в рабочее положение. Наличие и расположение данного элемента существенно осложняет задачу расчёта, а также наводит на вопрос о целесообразности пересмотра конструк-

ции мачты в целом. Следующим этапом конструирования мачты в составе МВМ рефлектора КА является предложение альтернатив конструкции; в числе которых вызывает интерес вариант с двумя либо тремя осесимметрично расположенными вдоль корпуса мачты зубчатыми рейками, что потребует значительного облегчения конструкции цилиндрической части изделия. Предлагается к рассмотрению сетчатая структура цилиндрической части мачты.

Библиографические ссылки

1. Власенко А. В., Скрыбин В. В. Применения перспективных композиционных материалов для проектов ракетно-космической техники [Электронный ресурс] // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. № 12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniya-perspektivnyh-kompozitsionnyh-materialov-dlya-proektov-raketno-kosmicheskoy-tehniki> (дата обращения: 09.02.2020).

2. Малышенко А. М., Майков С. А. Методика определения относительных энергозатрат привода раскрытия рефлектора антенны зонтичного типа при наземных его испытаниях на стенде с активной системой обезвешивания [Электронный ресурс] // Доклады ТУСУР. 2018. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-opredeleniya-otnositelnyh-energozatratt-privoda-raskrytiya-reflektora-antenny-zontichnogo-tipa-pri-nazemnyh-ego-ispytaniyah-na> (дата обращения: 09.02.2020).

3. Скворцов Ю. В., Глушков С. В. Использование МКЭ-пакета ANSYS для решения задач механики деформируемого твёрдого тела : интерактивное мультимедийное пособие / Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (Нац. исслед. ун-т). Самара, 2011.

References

1. Vlasenko A. V., Scriabin V. V. Applications of advanced composite materials for rocket and space technology projects [Electronic resource] // Current problems of aviation and cosmonautics. 2016. № 12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniya-perspektivnyh-kompozitsionnyh-materialov-dlya-proektov-raketno-kosmicheskoy-tehniki> (access: 09.02.2020).

2. Malysheko A. M., Maykov S. A.. Method for determining the relative energy consumption of the umbrella type antenna reflector opening drive during ground tests on a stand with an active dewatering system [Electronic resource]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-opredeleniya-otnositelnyh-energozatratt-privoda-raskrytiya-reflektora-antenny-zontichnogo-tipa-pri-nazemnyh-ego-ispytaniyah-na> (access: 09.02.2020).

3. Skvortsov Yu. V., Glushkov S. V. Using the ANSYS FEM package for solving problems of deformable solid mechanics : interactive multimedia guide / Samar. gos. aerokosm. un-t im. S. P. Koroleva (Nats. issled. un-t). Samara, 2011.

© Замятин Д. А., Кольга В. В., 2020

УДК 629.78

ТРАНСФОРМИРУЕМЫЙ ПАРАБОЛИЧЕСКИЙ РЕФЛЕКТОР ДЛЯ ПЛАТФОРМЫ CUBESAT

З. А. Казанцев^{1,2}, А. М. Ерошенко^{1,2}, И. В. Уваев^{2,3*}, А. В. Лопатин^{2,3}

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

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

³ Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий
Российская Федерация, 660049 г. Красноярск, просп. Мира, 53

*E-mail: uvaev@sibsau.ru

В работе приводится описание технологии изготовления трансформируемого параболического антенного рефлектора для малых космических аппаратов (CubeSAT).

Ключевые слова: трансформируемые антенны, гибкое шарнирное соединение, сверхлегкие космические аппараты, механический анализ.

TRANSFORMABLE PARABOLIC REFLECTOR FOR CUBESAT PLATFORM

Z. A. Kazantsev^{1,2}, A. M. Eroshenko^{1,2}, I. V. Uvaev^{2,3*}, A. V. Lopatin^{2,3}

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

² Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

³ Federal Research Center of Information and Computing Technologies
Russian Federation, 660049 Krasnoyarsk, prospect Mira, 53

*E-mail: uvaev@sibsau.ru

The paper describes the technology of manufacturing a transformable parabolic antenna reflector for small spacecraft (CubeSAT).

Keywords: transformable antennas, flexible joint, ultralight spacecraft, structural analysis.

На текущий момент создано большое количество трансформируемых антенных рефлекторов для космических аппаратов на платформе CubeSAT.[1-4]

В настоящей работе приведен ряд этапов процесса изготовления макета параболического трансформируемого рефлектора космического назначения [5], в основе которого используется силовой трансформируемый обод с закреплённой на нем радиоотражающей мембраной. Обод представляет торовую оболочку с толщиной стенки до 1мм. В оболочке выполнены сквозные отверстия, позволяющие сгибать обод в транспортное положение.

Для изготовления формообразующей структуры мембраны рефлектора использовалась лента на основе волокна IMS65 24K и силикона RT601, (рис. 1.).

Дальнейший технологический процесс связан с натягиванием сотканной углепластиковой ткани, предварительно смазанной антиадгезивом, на изготовленную оснастку рис. 2.

Затем ткань пропитывается эпоксидной смолой и фиксируется до полной полимеризации. На рис. 3 представлена готовая мембрана из углепластиковых лент.

Для изготовления обода рефлектора, выполненного в виде труб со сквозными отверстиями, использо-

валась углеродная ткань УТ-3К-Сатин4Н-185-30 ТУ 23.99.14-032-75969440-2017 совместно с связующим ЭНФБ ТУ 1-596-36-2005. Трубчатые элементы изготавливаются намоткой предварительно пропитанного углеродного ровинга на подготовленную форму. Затем связующее полимеризуется в нагревательной печи. Изготовленный трубчатый элемент представлен на рис. 4.



Рис. 1. Углепластиковые ленты

Кронштейны крепления мембраны рефлектора к ободу изготавливались методом формования прессованием, рис. 5.



Рис. 2. Изготовленная оснастка для формования мембраны рефлектора

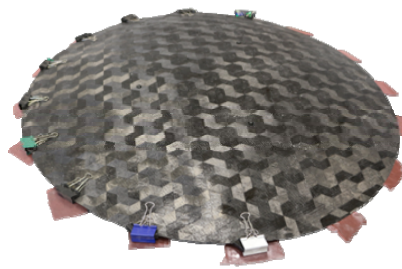


Рис. 3. Готовая мембрана из углепластиковых лент



Рис. 4. Трубчатый элемент обода



Рис. 5. Кронштейны обода

Непосредственное изготовление рефлектора выполнено в Ресурсный центр коллективного пользования «Космические аппараты и системы» СибГУ им. М. Ф. Решетнева в рамках выполнения проекта по соглашению с Минобрм РФ за №14.575.21.0144

Библиографические ссылки

1. RainCube, a Ka-band precipitation radar in a 6U CubeSat / E. Peral et al. // in Proc. 31st Annu. AIAA/USU Conf. Small Satellites (SSC), Logan, UT, USA, Aug. 2017.
2. OrigamiSat-1 (FO 98, Fuji-OSCAR 98) ORIGAMI (Organization of research Group on Advanced deployable Membrane structures for Innovative space science) PROJECT.
3. ISARA—Integrated solar array and reflectarray mission overview / R. Hodges, B. Shah, D. Muthulingham, and T. Freeman // in Proc. 27th Annu. AIAA/USU Conf. Small Satellites, Logan, UT, USA, Aug. 2013.
4. The deep-space network telecommunication CubeSat antenna: Using the deployable Ka-band mesh reflector antenna / N. Chahat, J. Sauder, R. E. Hodges, M. Thomson, and Y. Rahmat-Samii // IEEE Antennas Propag. Mag. 2017. Vol. 59, № 2. P. 31–38.
5. Масловская А. М., Казанцев З. А. Проектирование конструкции параболического трансформируемого рефлектора с гибкими элементами // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф. В 3 т. / СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2019. С. 325–327.

References

1. RainCube, a Ka-band precipitation radar in a 6U CubeSat / E. Peral et al. // in Proc. 31st Annu. AIAA/USU Conf. Small Satellites (SSC), Logan, UT, USA, Aug. 2017.
2. OrigamiSat-1 (FO 98, Fuji-OSCAR 98). ORIGAMI (Organization of research Group on Advanced deployable Membrane structures for Innovative space science) PROJECT.
3. ISARA—Integrated solar array and reflectarray mission overview / R. Hodges, B. Shah, D. Muthulingham, and T. Freeman // in Proc. 27th Annu. AIAA/USU Conf. Small Satellites, Logan, UT, USA, Aug. 2013.
4. The deep-space network telecommunication CubeSat antenna: Using the deployable Ka-band mesh reflector antenna / N. Chahat, J. Sauder, R. E. Hodges, M. Thomson, and Y. Rahmat-Samii // IEEE Antennas Propag. Mag. 2017. Vol. 59, № 2. P. 31–38.
5. Maslovskaya A. M., Kazantsev Z. A. Designing the structure of a parabolic transformable reflector with flexible elements // Actual problems of aviation and cosmonautics : collection of articles. materials V Int. scientific-practical conf., dedicated. Cosmonautics Day (April 08-12, 2019, Krasnoyarsk) in 3 volumes / Reshetnev University. 2019. P. 325–327.

© Казанцев З. А., Ерошенко А. М., Уваев И. В., Лопатин А. В., 2020

МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Б. Д. Кашфутдинов

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
Российская Федерация, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1
E-mail: bkashfutdinov@bmsu.ru

Преимущества модельно-ориентированного проектирования, воплощенные в интеграционно-программном комплексе Аэросервоупругость, позволяют проводить оценку влияния проектных параметров на аэросервоупругую устойчивость летательного аппарата.

Ключевые слова: аэросервоупругость, аэроупругость, система стабилизации, модельно-ориентированное проектирование.

MODEL BASED DESIGN APPROACH TO DESIGN STABILISATION SYSTEM FOR AN AIRCRAFT

B. D. Kashfutdinov

Bauman Moscow State Technical University
5, Baumanskaya 2-ya Str., Moscow, 105005, Russian Federation
E-mail: bkashfutdinov@bmsu.ru

The benefits of model-based design approach like automation of all analysis procedures and simplification of certification, embodied in the IPK Aeroservoelasticity, make it possible to value the influence of design parameters on the aeroservoelastic stability of an aircraft.

Keywords: aeroservoelasticity, aeroelasticity, stability system, model-based design.

Введение. Проектирование современных летательных аппаратов связано с решением разнообразных задач по снижению массы, увеличению дальности полета. При этом внесение изменений во внешний облик или в программно-аппаратную часть значительно возрастает в процессе проектирования (от 5 до 50 %) [1].

Использование надежных инструментов оценки принятых конструкторских решений при этом является неотъемлемой частью современной проектной работы.

Концепция использования модельно-ориентированного проектирования в ракетно-космической технике. Одним из самых перспективных в настоящее время является подход, связанный с применением модельно-ориентированного проектирования (МОП), который основан на совместном использовании спецификации проектируемого объекта и его модели [2]. Такой подход позволяет значительно увеличить скорость разработки за счет быстрой оценки конструкторских решений и проведения необходимого количества численных экспериментов.

Применение МОП также позволяет значительно упростить процесс сертификации готового изделия в будущем, за счет возможности автоматизации подготовки необходимого набора тестов в рамках работы с моделью (MIL – model in the loop), готовым программным обеспечением (SIL – software in the loop) и

его реализацией в «железе» (HIL – hardware in the loop) [3–4].

Практической реализацией МОП для изделий ракетно-космической техники является интеграционно-программный комплекс «Аэросервоупругость», разработанный автором, который позволяет объединить модель упругого летательного аппарата, созданной в MSC.Nastran, набегающий поток и систему автоматического управления, созданную в Scilab, как показано на рисунке.

Важной задачей на этапе проектирования является влияние различного типа нелинейностей в системе управления на запас по устойчивости. Например, система автоматического управления воздействует на привод актуаторов рулей стабилизации, которые обычно имеют сложную геометрию. Работа приводов на летательном аппарате связана с наличием нелинейностей типа «насыщение» и «зона нечувствительности» [5]. В работе [6] на примере неконсервативной системы перевернутый маятник, которая аналогична аэросервоупругой задаче с летательным аппаратом, показано, что наличие нелинейности типа «зоны нечувствительности» не влияет на параметры колебаний, но, в то же время, наличие гистерезиса может изменять характер автоколебательного процесса.

Нелинейность типа «насыщение» может значительно уменьшить запас по устойчивости для летательного аппарата, а поэтому требует моделирования на ранних стадиях разработки.



Системная модель аэросервоупругого летательного аппарата

После подбора параметров работы системы управления, выбора необходимой системы приводов и режимов их работы в рамках модельно-ориентированного подхода к проектированию необходимо актуализировать модель и провести полный набор необходимых тестов, что позволит оценить эффективность работы системы автоматического управления на каждой проектной итерации.

Заключение. Таким образом, использование модельно-ориентированного подхода к проектированию изделий ракетно-космической техники позволяет значительно повысить эффективность работы за счет выявления потенциальных проблем еще до проведения дорогостоящих натуральных испытаний.

Библиографические ссылки

1. Tan J., Otto K., Wood K., A comparison of design decisions made early and late in development // Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17), Vol. 2: Design Processes | Design Organisation and Management, Vancouver, Canada, 21. 25.08.2017.
2. Применение модельно-ориентированного проектирования к созданию АСУ ТП опасных промышленных объектов / С. С. Журавлев, С. В. Рудометов, В. В. Окольников, С. Р. Шакиров // Вестн. НГУ. Серия: Информационные технологии. 2018. Т. 16, № 4. С. 56–67.
3. Saad Motahhir, Abdelaziz El Ghzizal, Souad Sebti, Aziz Derouich. MIL and SIL and PIL tests for MPPT algorithm. Cogent Engineering, Cogent OA, 2017. 4 (1).
4. Санджавадмат В., Суреш Р. Модельная проверка и валидация производительности цифрового контроллера разрабатываемого газотурбинного двигателя // Вторая Междунар. конф. по электротехнике, компьютерным и коммуникационным технологиям (ICECCT), Коимбаторе, 2017. С. 1–6.
5. Парафес С. Г., Иванов Д. Н., Опарин А. С. Модель исследования устойчивости системы «Руль –

привод» маневренного беспилотного летательного аппарата // Научный вестник МГТУ ГА. 2016. № 225 (3).

6. Сажин А. И., Саблина Г. В. Исследование реального скользящего режима в модельной системе «перевернутый маятник» // Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1(11).

References

1. Tan J., Otto K., Wood K., A comparison of design decisions made early and late in development. In: Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17), Vol. 2: Design Processes | Design Organisation and Management, Vancouver, Canada, 21. 25.08.2017.
2. Model-Based Design Approach for Development Process Control Systems of Hazardous Industrial Facilities / S. S. Zhuravlev, S. V. Rudometov, V. V. Okolnishnikov, S. R. Shakirov // Vestnik NSU. Series: Information Technologies. 2018. Vol. 16, № 4. P. 56–67 (in Russ.).
3. Saad Motahhir, Abdelaziz El Ghzizal, Souad Sebti, Aziz Derouich. MIL and SIL and PIL tests for MPPT algorithm. Cogent Engineering, Cogent OA, 2017. 4 (1).
4. Sanjawadmath V., Suresh R. Model based verification and validation of digital controller performance of a developmental aero gas turbine engine // 2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), Coimbatore, 2017. P. 1–6.
5. Parafes' S. G., Ivanov D. N., Oparin A. S. Model of stability study of rudder actuator system of maneuverable unmanned aerial vehicle // Civil Aviation High Technologies. 2016. № (225). P. 143–150 (In Russ.).
6. Sazhin A., Sablina G., Research of the Real Sliding Mode in "Inverted Pendulum" Model System // Automatics & Software Engineering. 2015. № 1 (11).

© Кашфутдинов Б. Д., 2020

УДК 52-323.8

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ NORAD ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ПЕРИОД ОБРАЩЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА НИЗКОЙ КРУГОВОЙ ОРБИТЕ

И. К. Коловский*, Д. Н. Шмаков

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

Рассмотрена возможность применения баллистических данных NORAD в формате TLE для космических аппаратов на низкой круговой орбите. Приводится анализ данных NORAD для оценки влияния солнечной активности на период обращения космических аппаратов на низкой круговой орбите.

Ключевые слова: баллистика, солнечная активность, низкая круговая орбита, период обращения, NORAD, обработка данных.

ASSESSMENT OF THE USE THE DATABASES NORAD FOR ASSESSING THE IMPACT OF SOLAR ACTIVITY ON NODAL PERIOD OF SATELLITES INTO A LOW CIRCULAR ORBIT

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

Joint-Stock Company “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 for assessing the impact of solar activity on nodal period of satellites into a low circular orbit.

Keywords: ballistics, solar activity, low circular orbit, nodal period, TLE, NORAD, information processing.

Для анализа влияния солнечной активности на период обращения и частоту проведения коррекций были рассмотрены космические аппараты (КА) с высотой орбиты 950–1000 км, которые совершают пассивное движение по круговой орбите.

При движении КА на орбите на него постоянно воздействуют факторы космического пространства. При проведении прогнозирования параметров движения КА на длительный срок необходимо учитывать влияния Солнца, Луны и сопротивления атмосферы.

На орбитах существования КА с высотой более 150 км параметры атмосферы существенно изменяются в зависимости от активности Солнца, на это важно обращать внимание при расчете параметров возмущенного движения КА.

Солнечная активность изменяет характеристики атмосферы, что приводит к сложному закону изменения периода обращения КА в течение 11-летних циклов солнечной активности.

В работе [1] говорится, что анализируя значение периода обращения по данным NORAD, можно сделать вывод о том, как именно изменилась орбита КА в течение времени и как часто потребуется проводить коррекцию орбиты.

Используем баллистические данные, формируемые службой NORAD (США) [2], представляемые в формате TLE (Two-Line Element Set Format).

По каталогу NORAD выберем КА, которые схожи по параметрам пассивного движения и падению периода обращения. В таблице приведены выбранные КА и их параметры.

Из данных NORAD рассмотрим среднее движение. Этот параметр определяет период обращения КА. Анализируя изменение периода обращения во времени можно судить об изменении солнечной активности. В качестве показателя солнечной активности и её влияние на движение КА возьмем падение периода обращения за виток, обозначив его как dTdr. Далее рассмотрим изменение солнечной активности за несколько лет.

На рис. 1 показано изменение dTdr с 1985 по 2020 г. по данным NORAD для выбранных пяти КА. Рассматриваемый период затрагивает три 11-летних циклов солнечной активности.

Из рис. 1 видно, что показатель dTdr на длительном временном интервале для выбранных пяти КА практически совпадает. Рис. 1 позволяет определить, когда начинаются и заканчиваются 11-летние циклы солнечной активности. Значение dTdr в период минимума солнечной активности равно 0,04 с во всех циклах. В период максимума солнечной активности dTdr принимает разные значения: 0,85 с, 0,65 с, 0,24 с.

Для анализа цикла солнечной активности обратимся к материалам обзора и прогноза службы Солн-

ца Боулдер NOAA (США) [3]. На рис. 2 приведено изменение циклов солнечной активности в зависимости от числа солнечных пятен.

Исходя из рис. 2, можно сделать выводы о том, что на момент 2020 г. цикл солнечной активности находится на низком уровне.

Параметры орбиты КА по данным NORAD

Номер NORAD	Дата запуска КА, г-мес-день	Среднее движение, виток/сут	Наклонение, °	Апогей, км	Перигей, км	Эксцентриситет
4799	1970-12-12	13,76778	74,02	979	972	0,00034
5238	1971-05-22	13,71884	74,02	1002	982	0,00145
6019	1972-05-06	13,75937	74,02	997	960	0,00251
6148	1972-08-16	13,81800	82,97	965	950	0,00090
7736	1975-04-11	13,78219	83,00	990	951	0,00273

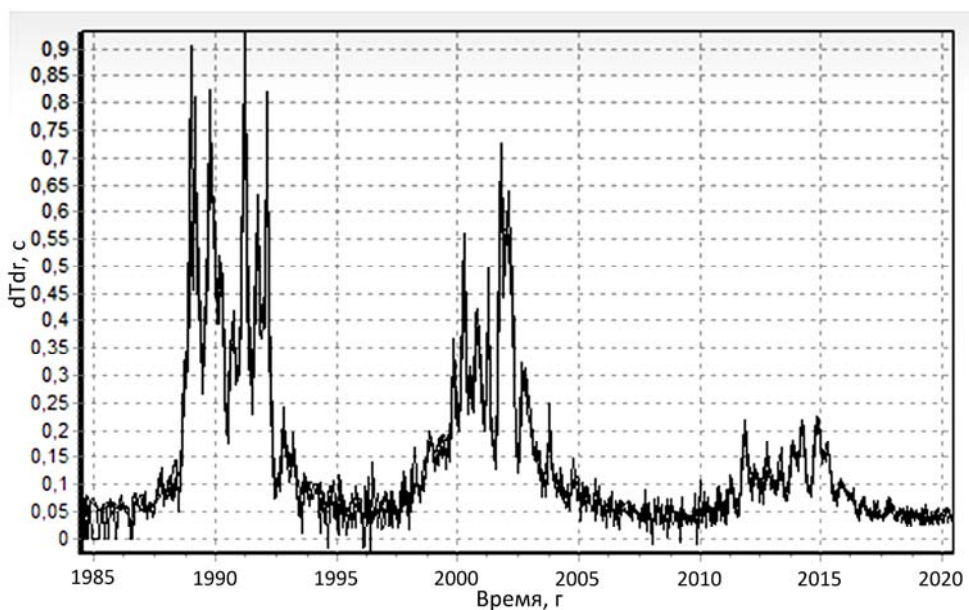


Рис. 1. Изменение параметра dTdr с 1985 по 2020 г.

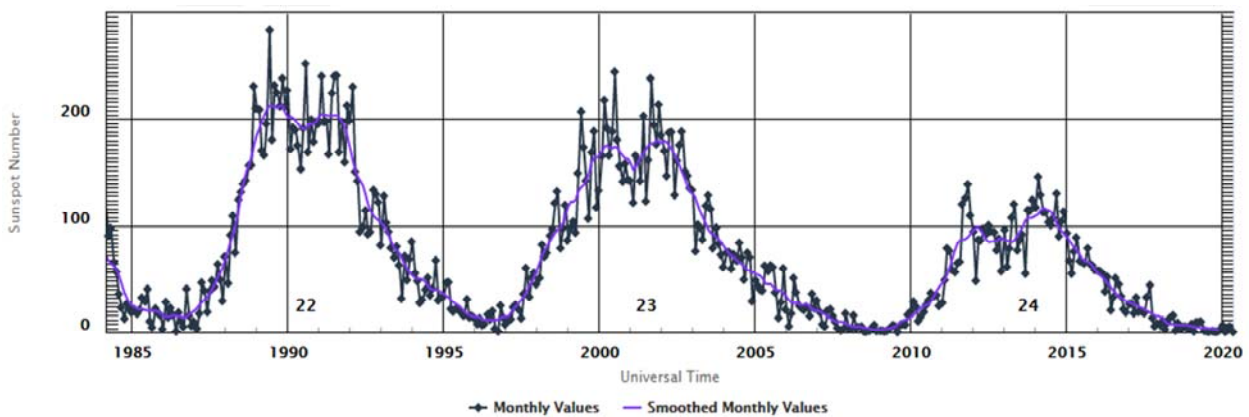


Рис. 2. Изменение циклов солнечной активности с 1985 по 2020 гг.:
 «Sunspot Number» – число солнечных пятен; «Universal Time» – всемирное время;
 «Smoothed Monthly Values» – сглаженные месячные значения; «Monthly Values» – месячные значения;
 «24» – порядковый номер текущего цикла солнечной активности

Сравнивая данные на интервале с 1985 по 2020 гг. по рис. 1 и 2, получаем соответствия между минимальными значениями изменения периода обращения КА и минимальному уровню солнечной активности в 1987, 1996, 2009 и 2020 г., а также максимальными соответствующими значениями в 1989, 2000, 2012 и 2014 г. В целом данные рис. 1 и 2 хорошо согласуются между собой.

В результате получаем, что в первом приближении для оценки влияния циклов солнечной активности на параметры движения КА на низкой круговой орбите можно использовать величину изменения периода обращения, вычисленную по данным NORAD. Таким образом, можно делать выводы о том, как быстро будет происходить падение периода обращения и как часто проводить коррекцию параметров движения КА.

Библиографические ссылки

1. Коловский И. К., Подолякин В. Н., Шмаков Д. Н. Оценка использования баллистических данных NORAD для космических аппаратов «Гонец-М» на низкой круговой орбите // Решетневские чтения : материалы XXII Междунар. науч. конф. (12–16 ноября 2018, г. Красноярск) : в 2 ч. / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2018. Ч. 1. С. 32–33.

2. Электронная база данных командования воздушно-космической обороны Северной Америки

(NORAD) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.space-track.org> (дата обращения: 25.06.2020).

3. Электронный ресурс федерального ведомства США «Национальное управление океанических и атмосферных исследований» (NOAA) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression> (дата обращения: 25.06.2020).

References

1. Kolovsky I. K., Podolyakin V. N., Shmakov D. N. Assessment of the use of the ballistic databases NORAD for satellite «Gonets-M» into a low circular orbit // Reshetnevskie chteniya : materialy XXII Mezhdunar. nauch. konf. "" [Materials XXII Intern. Scientific. Conf. "Reshetnev reading"] / Reshetnev University. Krasnoyarsk, 2018. Vol. 1. P. 32–33.

2. The electronic database of North American Aerospace Defense Command (NORAD) [Electronic resource]. URL: <https://www.space-track.org> (access: 25.06.2020).

3. The electronic database of National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) [Electronic resource]. URL: <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression> (access: 25.06.2020).

© Коловский И. К., Шмаков Д. Н., 2020

УДК 629.78

СОЗДАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ КА С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ И АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Т. Ш. Комбаев¹, М. Е. Артемов², Ю. П. Борщев²

¹Филиал АО «НПО Лавочкина»

Российская Федерация, 248000, г. Калуга, ул. Октябрьская, 17

²АО «НПО Лавочкина»

Российская Федерация, 141402, г. Химки, ул. Ленинградская, 24

E-mail: kombaew@ya.ru

Для составных частей космических аппаратов, не обладающих необходимой радиационной стойкостью к ионизирующим излучениям космического пространства в части дозового эффекта, необходимо создание радиационной защиты минимальной массы. Рассматривается создание такой защиты с помощью специального программного модуля для системы 3D-моделирования и аддитивных технологий.

Ключевые слова: космический аппарат, радиационная стойкость, радиационная защита, аддитивные технологии.

THE SPACECRAFT RADIATION SHIELDING CREATING USING THE SOFTWARE FOR 3D-MODELING AND ADDITIVE TECHNOLOGIES

T. S. Kombaev¹, M. E. Artemov², Yu. P. Borshchev²

¹Affiliate of Lavochkin Association

Russian Federation, 248000, Kaluga, 17 Oktyabrskaya str.

²Lavochkin Association

Russian Federation, 141002, Moscow region, Khimki, 24 Leningradskaya str.

E-mail: kombaew@ya.ru

The spacecraft components that do not have the necessary radiation tolerance to space ionizing radiation in terms of the dose effect, it is necessary to create a minimum mass radiation shielding. The report considers a radiation shielding creating using special software for a 3D-modeling system and additive technologies.

Keywords: spacecraft, radiation tolerance, radiation shielding, additive technologies.

В процессе эксплуатации космические аппараты (КА) подвергается разрушающему воздействию ионизирующих излучений космического пространства. Для составных частей КА, не обладающих необходимой радиационной стойкостью в части дозового эффекта, необходимо создание дополнительной радиационной защиты [1].

Для проектирования радиационной защиты приборов или электрорадиоизделий для системы 3D-моделирования Siemens NX создан дополнительный программный модуль [2; 3]. Для расчета локальных поглощенных доз в модуле применяется метод секторирования [4]. Построение радиационной защиты проводится последовательным, в ходе расчета, увеличением массы защиты для наиболее критичных направлений лучей сферы интегрирования в расчетных точках защищаемого прибора или электрорадиоизделия, что позволяет учитывать существующую массу конструкции и других составных частей КА, и проектировать радиационную защиту минимальной массы. Результатом работы программного модуля является созданная в среде трехмерного моделирования радиационная защита в виде сложных трехмерных объектов. Такие сложные трехмерные объекты предлагает-

ся изготавливать с применением технологии селективного лазерного сплавления (СЛС). Технология СЛС позволяет создавать радиационную защиту в виде сложного трехмерного объекта без дополнительных технологических деталей.

Применение 3D-печати при изготовлении конструкции защиты обеспечивает снижение массы конструкции до 30 %, трудоемкости изготовления до 40 % и повышение качества за счет исключения ряда воздействующих ручных операций и отказа от сборочной технологической оснастки [5]. Проектирование радиационной защиты КА с помощью программного модуля в системе 3D-моделирования и дальнейшее её создание с помощью аддитивных технологий позволяет создавать радиационную защиту минимальной массы за счет:

– автоматизированного построения в системе 3D-моделирования с учетом существующей массы конструкции и других составных частей КА;

– изготовления радиационной защиты с помощью аддитивных технологий в виде сложного трехмерного объекта без дополнительных технологических деталей.

Библиографические ссылки

1. Комбаев Т. Ш., Артемов М. Е., Зефилов И. В. Проектирование радиационной защиты комплекса научной аппаратуры космического аппарата дистанционного зондирования Земли [Электронный ресурс] // Инженерный журнал: Наука и инновации. 2019. № 5(89). URL: <http://engjournal.ru/articles/1878/1878.pdf> (дата обращения: 09.09.2020).
2. Siemens NX software [Электронный ресурс]. URL: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/> (дата обращения: 09.09.2020).
3. NX Open Programmer's Guide [Электронный ресурс]. URL: https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/10/nx_api#uid:index (дата обращения: 09.09.2020).
4. ОСТ 134-1044–2007. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы расчета радиационных условий на борту космических аппаратов и установления требований по стойкости радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию заряженных частиц космического пространства естественного происхождения. М., 2007. 182 с.
5. Борщев Ю. П. Опыт применения технологии селективного лазерного сплавления при изготовлении элементов антенно-фидерных устройств космических аппаратов [Электронный ресурс] // Аддитивные технологии: настоящее и будущее : V Междунар. конф. М., 2019. С. 29–38. URL: <http://www.spsl.nsc.ru/FullText/konfe/%D0%90%D0%B4%D0%B4%D0%B8%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%A2%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BBV.pdf> (дата обращения: 09.09.2020).

References

1. Kombaev T. Sh., Artemov M. E., Zefirov I. V. [Designing radiation protection for the scientific equipment

complex of the Earth's remote sensing spacecraft] [Electronic resource] // *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2019. № 5(89) (In Russ.). URL: <http://engjournal.ru/articles/1878/1878.pdf> (access: 09.09.2020).

2. Siemens NX software [Electronic resource]. URL: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/> (access: 09.09.2020).

3. NX Open Programmer's Guide [Electronic resource]. URL: https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/10/nx_api#uid:index (access: 09.09.2020).

4. OST 134-1044–2007. Apparatura, pribory, ustroystva i oborudovanie kosmicheskikh apparatov. Metody rascheta radiatsionnykh usloviy na bortu kosmicheskikh apparatov i ustanovleniya trebovaniy po stoykosti radioelektronnoy apparatury kosmicheskikh apparatov k vozdeystviyu zaryazhennykh chastits kosmicheskogo prostranstva estestvennogo proiskhozhdeniya [Industry Standard 134-1044-2007. Spacecraft equipment, devices and facilities. Methods for calculating radiation environment on board spacecraft and establishing requirements for the tolerance of radio electronic equipment of spacecraft to the impact of space charged particles]. М., 2007. 182 p.

5. Borshchev Yu. P. [Experience in the use of selective laser fusion technology in the manufacture of spacecraft antenna-feeder devices elements] [Electronic resource] // *Additivnye tekhnologii: nastoyashchee i budushchee : V Mezhdunar. konf. [V International Conference «Additive Technologies: Present and Future»]*, Moscow, 2019. P. 29–38. URL: <http://www.spsl.nsc.ru/FullText/konfe/%D0%90%D0%B4%D0%B4%D0%B8%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%A2%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BBV.pdf> (access: 09.09.2020).

© Комбаев Т. Ш., Артемов М. Е., Борщев Ю. П., 2020

УДК 621

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Ю. А. Кремзуков¹, Н. Н. Цебенко¹, К. С. Луковников², А. Р. Сайданов²

¹Обособленное подразделение «Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники»
Российская Федерация, 634034, г. Томск, ул. Белинского, 53
E-mail: Kremzukov@niiuem.tomsk.ru

²Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: lukovnikovks@iss-reshetnev.ru

Для оценки функциональности характеристик СЭП и увеличения возможности мониторинга предлагается использование многоканального энергонезависимого устройства мониторинга электрических параметров системы электропитания.

Ключевые слова: многоканальное энергонезависимое устройство мониторинга электрических параметров.

DEVELOPMENT OF A DEVICE FOR MONITORING THE PARAMETERS OF THE POWER SUPPLY SYSTEM

Yu. A. Kremzukov, N. N. Tsebenko, K. S. Lukovnikov, A. R. Saidanov

¹Separate division "Research Institute of automation and electromechanics of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics"
53, Belinsky Str., Tomsk, 634034, Russian Federation
E-mail: Kremzukov@niiuem.tomsk.ru

²Joint-Stock Company "Academician M. F. Reshetnev" Information Satellite Systems"
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
E-mail: lukovnikovks@iss-reshetnev.ru

To evaluate the functionality of the BOT characteristics and increase the monitoring capability, it is proposed to use a multi-channel non-volatile device for monitoring the electrical.

Keywords: multichannel non-volatile device for monitoring electrical parameters.

Надежность систем электропитания космических аппаратов ставит целый ряд задач, решение которых имеет важное значение. Одна из задач, это получение информации о параметрах электрических характеристик системы.

В настоящее время контроль параметров системы электропитания, как при наземной эксплуатации и испытаниях, так и при штатной эксплуатации, производится с частотой порядка от 0,25 до 1 Гц. Вместе с тем, в ряде нештатных случаев, появление которых не может быть спрогнозировано, переходные процессы в системе занимают временной диапазон порядка 0,5 сек, и в связи с этим, происходит потеря части контролируемой параметрами информации, необходимой для последующего детального анализа. Целью анализа является оценка влияния скачкообразного изменения значения амплитуд параметров на систему электропитания и бортовую аппаратуру.

Фиксация параметров переходных процессов бортовой сети с высокой дискретностью позволит сократить длительность работ по определению источника воздействия на систему и оценки последствий для системы электропитания и бортовой аппаратуры аппарата в целом.

Исходя из этого разработки устройства мониторинга является актуальной проблемой.

Для решения этой задачи предполагается разработать устройство мониторинга параметров СЭП, позволяющее регистрировать информацию о параметрах электрических характеристик и передавать ее, по средствам внутренней системы информационного обмена космического аппарата, наземному автоматизированному комплексу управления при наземной или при штатной эксплуатации.

Ввиду отсутствия прямых аналогов этого устройства мониторинга, предлагается прибор который будет регистрировать показания 10 каналов тока и 10 каналов напряжения. Прибор будет включён в состав системы электропитания космического аппарата и эксплуатироваться в условиях вакуума при установке на термоповерхность, снабженной тепловыми трубами пассивной системы терморегулирования, для организации температурного режима прибора устройства мониторинга.

Устройства мониторинга будет обеспечивать:

- а) прием (передачу) данных, сигналов и команд из
- б) БЦВМ в (из) УМ по каналу МКО;
- в) синхронизацию со временем БЦВМ;
- г) при пропадании напряжения питания УМ обеспечивает автономное функционирование в течение 40 сек. для передачи в БЦВМ данных текущего состояния шин, сигналов срабатывания порогового кон-

троля и дамба данных порогового контроля состояния шин;

Примечание. Для автономного функционирования УМ возможно использование дополнительного аккумулятора.

- г) дискретность измерений 10 мс;
- д) постоянную запись по «кольцу»;

е) представление результатов измерений в виде двоичного кода результата измерения в диапазоне от 0 до 255.

ж) формирование дампа данных порогового контроля состояния шин. Дамп данных должен содержать результаты измерений всех каналов по пороговому контролю за время 10 с до события и 10 с после. Формирование новых дампов данных порогового контроля только после передачи в БЦВМ уже зафиксированных дампов;

з) постоянный и пороговый контроль напряжения шины 27 В:

- количество каналов – 5;
- контроль напряжения в диапазоне от 5,0 до 27 В с приведённой погрешностью измерения $\pm 5\%$;
- входное сопротивление канала измерения напряжения не менее 100 кОм.

ж) постоянный и пороговый контроль напряжения шины 150 В:

- количество каналов – 5;
- контроль напряжения в диапазоне от 10,0 до 150 В с приведённой погрешностью измерения $\pm 5\%$;
- входное сопротивление канала измерения напряжения не менее 100 кОм.

к) постоянный и пороговый контроль токов:

- количество каналов – 10;
- контроль тока в диапазоне от 1,0 до 15,0 А с погрешностью измерения $\pm 5\%$;
- входное сопротивление канала измерения тока не менее 100 кОм;

л) в исходном состоянии сигналы срабатывания порогового контроля сброшены;

м) в режиме автономной наземной эксплуатации УМ поддерживает передачу данных на ПЭВМ по каналу МКО.

Построение устройства мониторинга модульное, с функционально законченными узлами, включающее в свой состав (см. рисунок):

- источник питания собственных нужд (ИП);
- модуль управления (МУ);
- модуль измерения напряжения (МИН);
- модуль измерения тока (МИТ).

Основным является модуль управления (МУ) в функции которого должно входить:

- информационно-логическое взаимодействие с внешней управляющей системой по МКО;
- управление, синхронизация по времени и сбор данных модулей измерения напряжения (МИН) и модулей измерения токов (МИТ).

В рамках дальнейшего исследования планируется осуществить работы по эскизному проектированию устройства.

Разработка устройства мониторинга будет осуществляться с применением технологии разработки и производства приборов предназначенных для эксплуатации в составе космического аппарата. Такой подход позволяет осуществлять контроль параметров СЭП при наземных испытаниях КА внутри термокамеры, а так же дает возможность использования устройства мониторинга в составе КА при штатной эксплуатации на орбите.

Применение устройства мониторинга параметров СЭП в летной эксплуатации КА позволит выявлять закономерности поведения показаний измерений с каналов тока и каналов напряжения, от режима работы оборудования КА, а также от орбитального положения КА и влияния на них геофизических факторов, которые определяют свойства окружающего пространства.

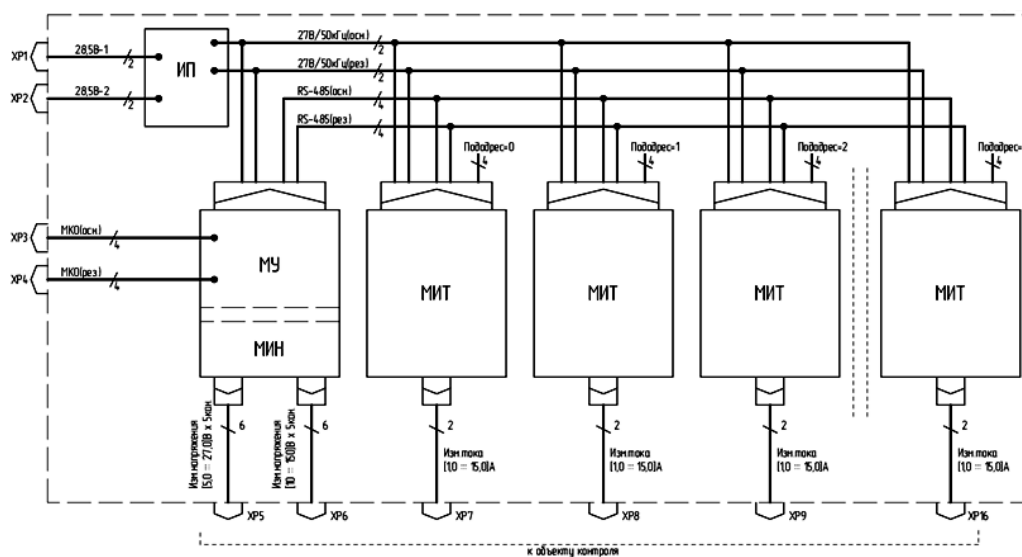


Схема устройства мониторинга

© Кремзуков Ю. А., Цебенко Н. Н.
Луковников К. С., Сайданов А. Р., 2020

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАРТОВЫХ ПАРАМЕТРОВ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ
ПРИ ВОЗДУШНОМ ЗАПУСКЕ**

И. О. Надеин*, В. В. Кольга

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

*E-mail: ilnadein@yandex.ru

Воздушный старт ракеты из пускового контейнера самолета-носителя осуществляется в условиях искусственной невесомости за короткий промежуток времени. При этом перегрузки, испытываемые ракетой-носителем, должны обеспечивать быстрый старт и соответствовать требованиям к несущей способности ракеты. Устройство отделения ракеты-носителя от пускового контейнера должно обеспечивать их надежное разделение.

Ключевые слова: ракета-носитель, воздушный старт, пусковой контейнер, перегрузка, время разделения, скорость разделения.

**DETERMINATION OF CARRIER-ROCKET LAUNCH PARAMETS
DURING AIR LAUNCH**

I. O. Nadein*, V. V. Kolga

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: ilnadein@yandex.ru

Air launch from the carrier-aircraft container-launcher is performed under conditions of artificial weightlessness in a short time period. In this case, the overloads experienced by the carrier-rocket should be optimal and meet the requirements for the missile's carrying capacity. The device for carrier-rocket separation from the container-launcher should ensure their reliable separation.

Keywords: carrier-rocket, air launch, container-launcher, overload, separation time, separation velocity.

При воздушном старте можно выделить две схемы десантирования с расположением ракеты-носителя (РН) внутри самолета носителя (СН). Данные способы размещения исключают комплекс механических и аэродинамических воздействий на РН, который возникает при размещении ракеты вне грузового отсека СН. Однако, такой способ требует проектирования специальных устройств для вывода ракеты-носителя из самолета-носителя.

Первый способ заключается в использовании вытяжных парашютов. Ракета устанавливается в грузовом отсеке самолета на специальной пусковой платформе, оснащенной рольгангами. Ее вывод из грузового отсека происходит с помощью вытяжных парашютов. Такой способ десантирования традиционен, он отработан для большинства габаритных грузов. Недостаток этих устройств в том, что они являются одноразовыми.

Вторая схема десантирования заключается в использовании технологии минометного старта. При таком виде запуска ракета-носитель устанавливается в многоразовом пусковом контейнере, ее выброс происходит за счет создания избыточного давления по заднему торцу ракеты. Вполне возможно и безопасно при определенном режиме полета (маневр «Горка»)

десантировать в зоне пуска ракету-носитель массой 100 тонн и более в пределах грузоподъемности самолета-носителя. Далее РН принимает вертикальное положение с помощью парашютов, и производится запуск двигателей первой ступени [1].

В данной схеме запуска РН помещается в пусковой контейнер на борту СН, в котором находится до момента старта. Такой вид размещения ракеты-носителя исключает воздействие механических и аэродинамических нагрузок от внешних сил. Десантирование ракеты-носителя происходит головным отсеком вперед. В данном случае выброс производится с помощью порохового аккумулятора давления при 1 кгс/см^2 . Сопло маршевого двигателя при этом защищено специальным поддоном для защиты от воздействия пороховых газов. При таком виде десантирования центр давления ракеты-носителя находится позади центра масс, что обеспечивает её статическую устойчивость [2].

При выполнении маневра «Горка» возникают условия искусственной невесомости на короткий промежуток времени с нормальной перегрузкой $0,2 \dots 0,1$ [3]. Следовательно, промежуток времени, за который ракета-носитель покидает пусковой контейнер, должен быть сильно ограничен.

Порядок воздушного старта ракеты-носителя:

1. Срабатывание аккумулятора давления (0,1...0,2 с).
2. Выход ракеты-носителя из пускового контейнера (2...3 с).
3. Принятие вертикального положения с помощью парашютов (10...15 с).
4. Запуск маршевого двигателя (3...5 с).

В таких условиях на РН будет действовать только выталкивающая сила порохового аккумулятора давления F , силами веса и трения в первом приближении можно пренебречь. Выталкивающая сила вызывает перегрузку $n_{РН}$. Определим время, за которое РН покинет пусковой контейнер.

Найдем перегрузку, действующую на самолет-носитель [2]:

$$F = g \cdot n_{РН} \cdot m_{РН} = g \cdot n_{СН} \cdot m_{СН},$$

где $n_{РН}$ – перегрузка, действующая на ракету-носитель; $n_{СН}$ – перегрузка, действующая на самолет-носитель; $m_{РН}$ – масса ракеты-носителя; $m_{СН}$ – масса самолета-носителя; g – ускорение свободного падения.

Выразим:

$$n_{СН} = n_{РН} \cdot \frac{m_{РН}}{m_{СН}},$$

где суммарная перегрузка, действующая на ракету-носитель относительно пускового контейнера будет $n_C = n_{РН} + n_{СН}$.

Движение РН внутри СН будет равноускоренным, поэтому путь, который пройдет ракета-носитель до выхода из контейнера будет равен примерно ее длине $L_{РН}$:

$$L_{РН} = \frac{g \cdot n_C \cdot t^2}{2},$$

где n_C – суммарная перегрузка; t – время разделения, за которое РН покидает контейнер; $L_{РН}$ – путь РН.

Выразим из формулы время t [2]:

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot L_{РН}}{g \cdot n_C}}.$$

Определим время t и усилие F на опоре, при желаемой осевой перегрузке РН $n_{РН} = 1$, массе РН $m_{РН} = 102$ т, массе СН $m_{СН} = 300$ т и длине РН $L_{РН} = 35,6$ м:

$$F = 1000,620 \text{ кН}, \quad \text{кН}, \quad t = 2,33 \text{ с}.$$

Время t и усилие F зависит только от требуемой осевой перегрузки на РН $n_{РН}$ (см. рисунок).

Также определим скорость движения ракеты-носителя внутри пускового контейнера и скорость, сообщаемую самолету-носителю при разделении $V_{СН}$ [2]:

$$V_{РН} = g \cdot n_C \cdot t, \quad V_{СН} = \frac{F \cdot t}{m_{СН}}.$$

Находим параметры при $F = 1000,620$ кН, $t = 2,33$ с:

$$V_{РН} = 30,59 \text{ м/с}, \quad V_{СН} = 8,7 \text{ м/с}.$$

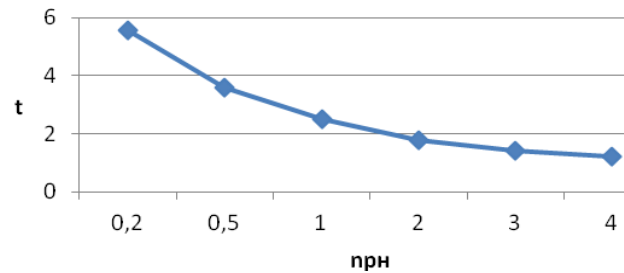


График зависимости времени выхода РН от осевой перегрузки

Полученное значение скорости РН при выходе из СН по направлению оси пускового контейнера относительно Земли равно 21,89 м/с. Данное значение характеризует потерю скорости при разделении в воздухе, так как ракета-носитель сбрасывается против движения самолета-носителя, что необходимо учесть в баллистических расчетах траектории.

Библиографические ссылки

1. Информационный портал МирТесен [Электронный ресурс]. URL: https://s30886958561.mirtesen.ru/blog/43652378456/Ispytaniya-vozdushnogo-starta-vozmozhnyi-cherez-tri-goda?utm_referrer=mirtesen.ru (дата обращения: 25.08.2020).
2. Сихарулидзе Ю. Г. Баллистика и наведение летательных аппаратов : научное электронное издание. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. 400 с.
3. Концепция воздушного старта ракеты-носителя / И. О. Надеин, В. В. Кольга, А. В. Быков и др. // Решетневские чтения : материалы XXIII Междунар. науч. конф. (10–15 ноября 2019, г. Красноярск) : в 2 ч. / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2019. С. 51–52.

References

1. Information portal MirTesen [Electronic resource]. URL: https://s30886958561.mirtesen.ru/blog/43652378456/Ispytaniya-vozdushnogo-starta-vozmozhnyi-cherez-tri-goda?utm_referrer=mirtesen.ru (access: 25.08.2020).
2. Siharulidze U. G. *Ballistika i navedenie letatel'nyh apparatov : Nauchnoe elektronnoe izdanie*. [Aircraft Ballistics and Guidance]. M. : BINOM. Laboratoriya znaniy, 2015. 400 p.
3. *Koncepciya vozdušnogo starta rakety-nositelya*. [Air launch carrier-rocket concept] / I. O. Nadein, V. V. Kol'ga, A. V. Bykov et al // *Reshetnevskie chteniya : materialy XXIII Mezhdunar. nauch. konf.* [Materials XXIII Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]; Reshetnev University. Krasnoyarsk, 2019. P. 51–52 (In Russ).

© Надеин И. О., Кольга В. В., 2020

УДК 629.764.7

РАЗРАБОТКА ФЕРМЫ ПЕРЕХОДНОГО ОТСЕКА МЕЖДУ ПЕРВОЙ И ВТОРОЙ СТУПЕНЯМИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А. В. Нестерова, П. А. Воложанин, В. В. Кольга, А. В. Мушенко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: anya.nesterova.98@list.ru

Проведено конечно-элементное моделирование ферменной конструкции переходного отсека ракеты-носителя из сплава АМГ-6 и композитного материала на основе углеродного волокна и эпоксидной смолы. По результатам моделирования проведен анализ массовых и прочностных характеристик рассматриваемого отсека. Результаты расчетов представлены в сравнительной таблице.

Ключевые слова: летательный аппарат, ферма переходного отсека, анализ расчетов, метод конечных элементов.

DEVELOPMENT OF THE TRUSS OF THE TRANSITION COMPARTMENT BETWEEN THE FIRST AND SECOND STAGES OF THE AIRCRAFT

A. V. Nesterova, P. A. Volozhanin, V. V. Kolga, A. V. Mushenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
E-mail: anya.nesterova.98@list.ru

A finite element simulation of the truss structure of the transition compartment of the launch vehicle made of an AMG-6 alloy and a composite material based on carbon fiber and epoxy resin was performed. Based on the simulation results, the analysis of the mass and strength characteristics of the compartment under consideration is carried out. The results of calculations are presented in the comparative table.

Keywords: aircraft, transition compartment truss, calculation analysis, finite element method.

Переходный отсек многоступенчатой ракеты в первую очередь предназначен для восприятия осевых нагрузок, передающихся от предыдущей ступени к последующей и обеспечения отводов газов от ДУ верхней ступени во время «горячего» разделения.

В момент разделения ступеней, переходный отсек отделяется от второй ступени и остается с первой ступенью [1; 2].

При создании общего вида 3D модели открытой ферменной конструкции (рис.1) и ее чертежа, применяется система автоматизированного проектирования (САПР) SolidWorks 2019x64 Edition, позволяющая построить геометрическую модель с высокой степенью достоверности. В качестве исследуемых материалов для моделирования переходного отсека были выбраны сплав АМГ-6 и композитный материал на основе углеродного волокна и эпоксидной смолы с физико-механическими свойствами, приведенными в (табл. 1).

Изменяя размеры поперечного сечения наклонных стержней, торцевых и внутренних шпангоутов, нами были подобраны варианты равнопрочных конструкций для выбранных материалов, которые по результа-

там расчетов приводят к одинаковым коэффициентам запаса прочности и устойчивости. Для расчетов ферменной конструкции на прочность и устойчивость нами был использован метод конечных элементов в комбинации с SolidWorks Simulation.

На (рис. 2) показаны результаты расчета на устойчивость и форма потери устойчивости фермы переходного отсека из композиционного материала. Коэффициент запаса устойчивости составил $3,258 > 1$, что обеспечивает значительный запас несущей способности переходного отсека [3].

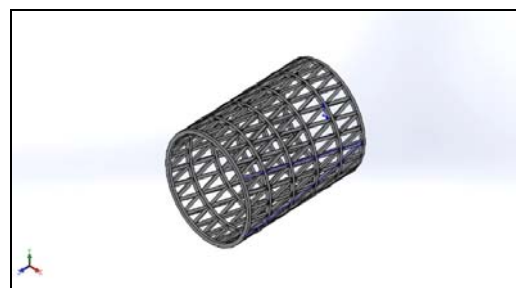


Рис. 1. Ферменная конструкция

Таблица 1

Физико-механические свойства материалов

Параметр	АМг-6	Углепластик
Модуль упругости	$6,8 \cdot 10^{10}$	$1,4 \cdot 10^{11}$ Н/м ²
Коэффициент Пуассона	0,32	0,33
Модуль сдвига	$2,78 \cdot 10^{10}$ Н/м ²	$5,2 \cdot 10^9$ Н/м ²
Массовая плотность	2640 кг/м ³	1550 кг/м ³
Предел прочности при растяжении	$3,2 \cdot 10^8$ Н/м ²	$1,5 \cdot 10^9$ Н/м ²
Предел прочности при сжатии		$1,2 \cdot 10^9$ Н/м ²
Предел текучести	$1,75 \cdot 10^8$ Н/м ²	
Коэффициент теплового расширения		5e+6 1/К
Теплопроводность	112 Вт/(м·К)	0,86 Вт/(м·К)

Таблица 2

Результаты моделирования переходного отсека

Параметр	АМг-6	Углепластик
Масса конструкции	3167,45 кг	968,245 кг
Запас прочности конструкции	6,36	6,18
Коэффициент потери устойчивости с перегрузкой n=5	3,117	3,258
Мах напряжение	$2,75 \cdot 10^7$ Н/м ²	$1,942 \cdot 10^8$ Н/м ²
Мах перемещение	1,171 мм	5,638 мм
Мах деформация	$2,617 \cdot 10^{-4}$	$9,704 \cdot 10^{-4}$

Анализ напряженно-деформированного состояния переходного отсека показал максимальные напряжения, равные 19 ГПа. Что соответствует коэффициенту запаса, равному 6,18 (рис. 3) и также обеспечивает необходимый запас прочности.

По результатам расчетов можно сделать вывод, что при одинаковом запасе прочности и устойчивости, переходный отсек из композиционного материала имеет массу 970 кг, что на 2200 кг легче, чем отсек из АМг-сплава (табл. 2).

Таким образом, применение композиционных материалов для переходных отсеков РН является обоснованным.

Библиографические ссылки

1. Конструкции переходных отсеков [Электронный курс]. URL: <https://megapredmet.su/1-73332.html> (дата обращения: 01.09.2020).
2. Переходный отсек ракеты-носителя и ферма [Электронный ресурс] / В. А. Асюшкин, С. В. Ишин, В. П. Вукуленков и др. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2697493C1_20190814 (дата обращения: 01.09.2020).
3. Горячев О. А. Расчёт на прочность ферменных конструкций : учеб. пособие. Самара : СГАУ, 1984.

References

1. Konstrukcii perehodnyh otsekov [Electronic resource]. URL: <https://megapredmet.su/1-73332.html> (access: 01.09.2020).
2. Perehodnyj otsek rakety-nositelja i ferma [Electronic resource] / V. A. Asjushkin, S. V. Ishin, V. P. Vukulenkov et al. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2697493C1_20190814 (access: 01.09.2020).
3. Gorjachev O. A. Raschjot na prochnost' fermennyh konstrukcij // Uchebnoe posobie. Samara : SGAU, 1984.

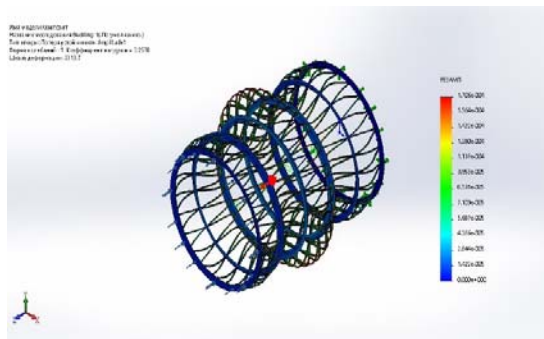


Рис. 2. Расчет устойчивости

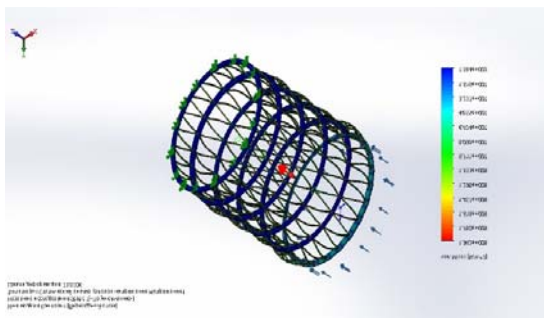


Рис. 3. Анализ напряженно-деформированного состояния

© Нестерова А. В., Воложанин П. А., Кольга В. В., Мушенко А. В., 2020

УДК 621.793.1: 629.7

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ВАКУУМНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Д. Р. Попов

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

Описана роль специальных покрытий для летательных и космических аппаратов. Рассмотрен процесс осаждения покрытия вакуумным ионно-плазменным электродуговым методом. Разработан генератор-сепаратор плазменного потока.

Ключевые слова: ионно-плазменное напыление; вакуум; электродуговой метод; плазменный поток; ионы; микрокапельная фаза.

IMPROVEMENT OF ELECTRIC ARC TECHNOLOGY FOR OBTAINING VACUUM COATINGS IN THE AIRCRAFT PRODUCTION

D. R. Popov

Samara National Research University named after academician S. P. Korolev
34, Moscow highway, Samara, 443086, Russian Federation,
E-mail: ruslanppv@rambler.ru

The role of special coatings for aircraft and spacecraft is described. The process of coating deposition by the vacuum ion-plasma electric arc method is considered. A plasma flow generator-separator has been developed.

Keywords: physical vapor deposition; vacuum; electric arc method; plasma flow; ions; micro-drop phase.

Применение специальных покрытий в производстве летательных и космических аппаратов обусловлено необходимостью в повышении надежности изделий, а также изготовления надежных специальных комплектов, которые изготовить другими технологическими методами невозможно или весьма трудно [1; 2]. В настоящее время известно большое количество методов нанесения покрытий, кроме того, продолжают исследования по модернизации существующих и разработке новых методов. Благодаря большому количеству преимуществ широкое распространение получили вакуумные методы осаждения покрытий [1–7]. Осаждение покрытия в вакуумной камере основывается на физических процессах испарения или распыления материалов в вакууме с последующей конденсацией продуктов на поверхности детали. Возникающие при этом удорожание и усложнение технологического процесса во многих случаях оправданы высоким качеством и стабильностью свойств покрытий, а также возможностями получения покрытий из уникальных по физико-механическим свойствам материалов.

Вакуумная ионно-плазменная электродуговая технология позволяет получать покрытия близкие по составу к электропроводящему материалу катода и за счёт использования реакционных газов получать нитриды или карбиды металлов в материале катода. Материал катода с помощью вакуумной дуги катодной

переводится в плазменное состояние и в виде плазменных квазинейтральных потоков направляется на поверхность изделия, за счёт протекания плазмохимических гетерогенных реакций образует покрытие.

В вакуумном ионно-плазменном электродуговом методе металлическую плазму получают при помощи электродуговых испарителей. После чего поток ускоряется в электрическом и магнитном полях за счет использования специальных электродуговых ускорителей и направляется к поверхности изделия. Генерируется плазменный поток не является однородным с точки зрения присутствующих в нем фаз и состоит в основном из ионной фазы (от 30 до 95 %), а также паровой фазы (от 5 до 65 %) и микрокапельной фазы (от 0,5 до 20 %). Кинетическая энергия ионов в плазменном потоке достигает сотни эВ. Такие параметры плазменных потоков создают предпосылки для получения мелкоструктурных покрытий высокой сплошности и высокой адгезионной прочности на изделиях из металлов, сплавов, полимеров и композиционных материалов. Недостатком получаемых покрытий является наличие в их составе фрагментов микрокапельной фазы, которые ухудшают ряд свойств покрытий из нитридов и карбидов. Таким образом, возникает необходимость в снижении микрокапельной фазы и увеличении ионной фазы. Подобное стремление является следствием из закона Больцмана и объясняется тем, что величина кинетической энергии нейтраль-

ных атомов не поддаётся регулировке, в то время как величина кинетической энергии ионов может легко регулироваться практически в любых пределах [2; 3]. Увеличение энергии частиц, из которых получают покрытия, приводит к существенному снижению температуры детали, необходимой для создания покрытий с высокой адгезионной и когезионной прочностью и получения высокотемпературных соединений металлов (оксидов, карбидов, нитридов, боридов и т. д.).

В качестве решения данной проблемы предложен новый генератор-сепаратор плазменного потока, существенно снижающий содержание микрокапельной фазы при выращивании покрытий вакуумным ионно-плазменным электродуговым методом. Дано детальное описание процессов распыления, очистки поверхности и осаждения покрытия с использованием предложенного генератора-сепаратора плазменного потока.

Библиографические ссылки

1. Современные технологии в авиа- и ракетостроении: учебник для студентов высших учебных заведений / В. А. Барвинок, В. И. Богданович, С. Г. Дементьев и др. М. : Машиностроение, 2014. 402 с.
2. Барвинок В. А. Плазма в технологии, надежность, ресурс. М. : Наука и технологии, 2005. 456 с.
3. Барвинок В. А., Богданович В. И. Физические основы и математические методы моделирования процессов нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий. М. : Машиностроение, 1999. 305 с.
4. Богданович В. И. Разработка методологических принципов проектирования технологий формирования поверхностного слоя изделий плазменным напылением // Проблемы машиностроения и автоматизации. 1999. № 2. С. 87–94.
5. Богданович В. И. Кинетика гетерогенного плазмохимического синтеза нитридных покрытий из плазменных потоков // Проблемы машиностроения и автоматизации. 1999. № 1. С. 65–71.
6. Bogdanovich V. I., Giorbelidze M. G. Mathematical modelling of thin-film polymer heating during obtaining of nanostructured ion-plasma coatings // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 201. P. 630–638.
7. Bogdanovich V. I., Giorbelidze M. G. Main problems of mathematical modeling high energies plasma technologies // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 795, iss. 1.

References

1. Modern technologies in aviation and rocket engineering: a textbook for students of higher educational institutions / V. A. Barvinok, V. I. Bogdanovich, S. G. Dementiev et al. M. : Mashinostroenie Publisher, 2014. 402 p.
2. Barvinok V. A. Plasma in technology, reliability, resource. M. : Science and technology Publisher, 2005. 456 p.
3. Barvinok V. A., Bogdanovich V. I. Physical foundations and mathematical methods for modeling the processes of applying vacuum ion-plasma coatings. M. : Mechanical Engineering Publisher, 1999. 305 p.
4. Bogdanovich V. I. Development of methodological principles for the design of technologies for the formation of the surface layer of products by plasma spraying // *Problems of mechanical engineering and automation*. 1999. № 2. P. 87–94.
5. Bogdanovich V. I. Kinetics of heterogeneous plasma-chemical synthesis of nitride coatings from plasma flows // *Problems of mechanical engineering and automation*. 1999. № 1. P. 65–71.
6. Bogdanovich V. I., Giorbelidze M. G. Mathematical modeling of thin-film polymer heating during obtaining of nanostructured ion-plasma coatings // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 201. P. 630–638.
7. Bogdanovich V. I., Giorbelidze M. G. Main problems of mathematical modeling high energies plasma technologies // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 795, iss. 1.

© Попов Д. П., 2020

УДК 629.7

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАКЕТ ДЛЯ ЗАПУСКА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Л. С. Соловьев

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
Приволжский ФО, Удмуртская Республика, 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7
E-mail: solovev-lenya@mail.ru, телефон: 89043138310

Приведен пример использования устаревших метеорологических ракет, путем модернизации в ракетоносители сверхлегкого класса. Рассмотрены проблемы запусков малых космических аппаратов. Проведена классификация малых космических аппаратов (МКА). Рассмотрены отечественные и зарубежные прототипы и аналоги систем выведения МКА на орбиту Земли. Предложена система запуска МКА на базе метеорологической ракеты ММР-06. Проведены расчёты внутренней и внешней баллистики метеорологической ракеты и твердотопливного ускорителя в сборе.

Ключевые слова: ракетоноситель, малый космический аппарат, разгонный блок, спутник, орбита Земли, приборостроение, грузоподъёмность.

APPLICATION OF METEOROLOGICAL ROCKETS FOR LAUNCHING SMALL SPACECRAFT

L. S. Solovev

Izhevsk state technical University named after M. T. Kalashnikov
7, Studentskaya Str., Izhevsk, 426069, Privolzhsky FO, Udmurt Republic
E-mail: solovev-lenya@mail.ru, phone number: 89043138310

The article provides an example of using outdated meteorological rockets, by upgrading to ultralight class launch vehicles. The problems of launching small spacecraft are considered. Classification of small space vehicles (MCAS) is carried out. Domestic and foreign prototypes and analogs of systems for launching ICA into Earth orbit are considered. A system for launching an ICA based on the MMR-06 meteorological rocket is proposed. Calculations of the internal and external ballistics of a meteorological rocket and a solid-fuel accelerator Assembly were performed.

Keywords: launch vehicle, small spacecraft, upper stage, satellite, Earth orbit, instrumentation, payload.

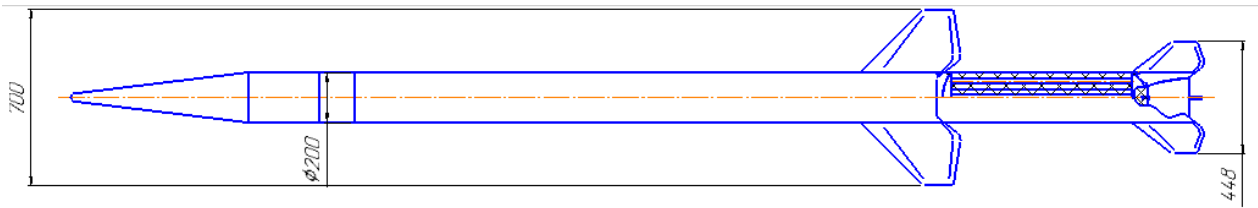
Введение. В современном мире, когда идет стремительное развитие техники, остро стоит вопрос о своевременном выводе на орбиту Земли микро-спутников. Так же немаловажное значение имеет своевременное предупреждение погодных явлений. Для всех выше перечисленных нужд идеально подходит геофизические ракеты, которые способны проводить метеорологические замеры, так и выводить микро-спутники на низкую опорную орбиту Земли. Геофизические ракеты совершающая суборбитальный полёт верхних слоев атмосферы и близлежащего космоса. Высота апогея может составлять от 100 до 1500 км. Таким образом они идеально подходят для запуска малых космических аппаратов (МКА), а именно микро-спутников весом 1–10 кг. Преимуществом которых является малый вес, благодаря чему стоимость запуска весьма мала по сравнению с обычными спутниками.

Проблемы запуска малых космических аппаратов [1]. Создание экономически эффективных средств выведения космических аппаратов – область, которой уделяется особое внимание в мировой ракетно-космической технике (РКТ). В связи с этим в настоящее время в космической технике наметилось направ-

ление, которое обеспечивает оперативный и эффективный запуск космических аппаратов. Группировки малых космических аппаратов (МКА) получили название «рой малых спутников». Разработки в этом направлении осуществляют ведущие космические державы – США, Западная Европа, Россия, также это направление является одним из приоритетных в КНР.

В настоящее время системы на основе МКА запускаются известными ракетами-носителями (РН) в качестве попутного груза к основной полезной нагрузке, работающей по своему временному циклу, в основном не совпадающему с циклом МКА.

В настоящее время используются два способа вывода МКА – на носителе средней грузоподъемности типа Ariane попутным запуском либо на РН типа «Днепр», предназначенной для группового запуска такого типа аппаратов. Основным недостатком обоих способов – ожидание подходящего по срокам пуска и планируемой орбиты вывода носителя. Появились даже фирмы, специализирующиеся на посредничестве в поиске и отслеживании нужных по срокам и орбитам носителей. В США для запуска МКА используются средства собственной разработки, например, ракета «Delta» в разных модификациях.



ММР-06 со стартовым ускорителем

К недостаткам такого подхода можно отнести ограниченные возможности выбора типа орбиты (определяется основной миссией РН), малое количество и низкую регулярность полетов.

На первых этапах работ по созданию МКА предпочтительными средствами запуска являлись российские конверсионные ракеты (МБР РС-18-РН «Стрела» и «Рокот»; МБР РС-19-РН «Днепр» и др.), стоимость запуска составила 8–14 млн долларов.

Зависимость удельной стоимости запуска C от грузоподъемности M средства выведения представлена на рисунке. Но при оценке стоимости выведения килограмма полезной нагрузки следует учитывать фактор времени, основная суть которого состоит в том, что при определении реальной стоимости проектов появляются соответствующие поправочные множители для пересчета приводимых сумм к единому денежному курсу. В связи с этим стоимость средств выведения при пересчете на данный момент времени возрастает.

Расчет внутренней баллистики [2]. Методы и последовательность баллистического проектирования аппарата с РДТТ принципиально такие же, как и для аппаратов с ЖРД. Имеются отличия лишь в методике выбора проектных параметров и анализа масс аппарата. В частности, тяговооруженности ступеней аппарата с РДТТ не являются проектными параметрами и определяются в зависимости от типа топлива, давлений в камерах сгорания и на срезах сопел РДТТ и относительных длин зарядов.

Приближенное баллистическое проектирование аппарата с РДТТ ведется в такой последовательности:

- выбирают конструктивно-компоновочную схему;
- определяют основные характеристики топлива;
- выбирают проектные параметры аппарата;
- выбирают программу движения аппарата на активном участке траектории;
- определяют удельные импульсы аппарата;
- проводят приближенное определение относительных масс топлива;
- определяют стартовые массы ступеней аппарата;
- определяют тяговые и габаритные характеристики всего аппарата.

Моделирование движения летательного аппарата. Одним из основных этапов исследования динамики движения летательных аппаратов является установление математической модели движения летательных аппаратов [2].

Под моделью понимают схематизацию реального процесса движения в форме, позволяющей произво-

дить различные теоретические исследования в зависимости от поставленной задачи и принимаемых допущений. В математической модели движения конкретизируется схема ЛА, устанавливается модель среды, в которой движется ЛА, определяются силы и моменты, действующие на ЛА. Конкретный вид математической модели зависит от допущений, положенных в основу составления модели, выбранной системы координат и системы действующих сил. Ниже приводятся основные сведения об условиях полета и особенностях летательного аппарата, которые учитывались при составлении математической модели в задаче динамики полета.

Земля совершает сложное движение, состоящее из многих составляющих [3]. При исследовании полета летательных аппаратов учитывается только суточное вращение Земли, так как влияние остальных составляющих чрезвычайно мало. Считается, что центр масс Земли движется прямолинейно и равномерно и Земля вращается равномерно вокруг оси, направление которой не изменяется. Вследствие своего вращения Земля представляет собой сплюснутый сфероид, у которого расстояние между полюсами меньше диаметра экватора. Это обстоятельство вместе с другими отклонениями формы Земли от сферической и неравномерное распределение масс внутри затрудняют определение по величине и направлению силы земного притяжения, действующей на ракету. Для этого можно предположить, что Земля – правильный эллипсоид вращения с равномерным распределением масс вокруг оси вращения.

Аэродинамические силы, действующие на летательный аппарат, существенно зависят от параметров атмосферы – плотности, давления и температуры воздуха. Эти параметры в свою очередь зависят от высоты полета, географической широты места, времени года и суток и ряда других факторов. Для расчета траектории и других исследований, проводимых при проектировании летательного аппарата, используют таблицы стандартной атмосферы [4], которые дают некоторые средние значения параметров спокойной атмосферы в зависимости от высоты. Зависимости параметров воздуха от высоты подобраны таким образом, что стандартная атмосфера ближе всего подходит к условиям в средних широтах северного полушария в летнее время года. Отклонение параметров атмосферы от стандартных значений, а также ветер представляют собой атмосферные возмущения, которые могут повлиять на полет ракеты, но они не учитываются при составлении математической модели.

Если принять во внимание, что ракета – осесимметричный летательный аппарат, то таким образом, тяга не будет создавать момента относительно центра масс и будет направлена по продольной оси ракеты.

Секундный массовый расход топлива и скорость истечения через срез сопла приняты постоянными.

При работающем двигателе моменты инерции ЛА будут величинами переменными вследствие изменения массы ракеты из-за расхода топлива. Работа по расчетному определению моментов инерции и их изменению очень трудоемка. Поэтому при баллистических расчетах можно брать их постоянными.

Аэродинамическая сила задается в скоростной системе координат, и учитывается только силу лобового сопротивления. Коэффициент лобового сопротивления зависит только от величины числа Маха.

В качестве примера летательного аппарата в математической модели рассматривается модернизированная малая метеорологическая ракета ММР-06 с установленным ракетным ускорителем.

Малая метеорологическая ракета ММР-06 представляет собой одноступенчатую твёрдотопливную ракету. Её назначение – оперативное определение параметров атмосферы по высоте. Научные приборы, установленные на ней, позволяют измерять температуру и давление воздуха, определять направление и скорость ветра. Во время проведения исследования корпус головной части ракеты раскрывается. Передача информации на Землю осуществляется системами телеметрии.

Модернизация заключается в увеличении размера заряда твердого топлива, и добавлении стартового ускорителя на твердом топливе.

По результатам расчета в программе внешней баллистики ММР-06 со стартовым ускорителем были получены искомые параметры движения ракетносителя, высота полета составила – 381 км.

Заключение. По результатам проведенных исследований было показана эффективность применение

модернизированных метеорологических ракет в качестве ракетносителей сверхлегкого класса. После проведенного анализа математических моделей внешней баллистики ракетносителя была получена максимальная высота полета, которая составила – 381 км.

Библиографические ссылки

1. Система запуска малых космических аппаратов / Ю. В. Костев, О. В. Мезенова, А. А. Позин, В. М. Шершаков // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 6. С. 482–488.
2. Павлюк Ю. С. Баллистическое проектирование ракет : учеб. пособие для вузов. Челябинск : Изд. ЧГТУ, 1996. 92 с.
3. Правдин В. М., Шанин А. П. Баллистика неуправляемых аппаратов. Снежинск : Изд-во РФЯВ–ВНИИТФ, 1999. 496с.
4. Идентификация проектных параметров баллистических ракет : учеб. пособие / В. Н. Гринберг, В. Г. Толмачев, С. Н. Храмов, Б. А. Якимович. Ижевск : Изд-во ИЖГТУ, 2002. 180 с.

References

1. System for launching small spacecraft / Yu. V. Kostev, O. V. mezenova, A. A. Pozin, V. M. Shershakov // Izv.vuzov. Instrument Engineering. 2016. Vol. 59, № 6. P. 482–488.
2. Pavlyuk Yu. S. Ballistic missile design : textbook for universities. Chelyabinsk : Ed. Cstu, 1996. 92 p.
3. Pravdin V. M., Shanin A. P. Ballistics of unguided vehicles. Snezhinsk : Publisher RFNC–VNIITF, 1999. 496 с.
4. Identification of ballistic missile design parameters : studies. benefit / V. N. Grinberg, V. G. Tolmachev, S. N. Khramov, B. A. Yakimovich. Izhevsk : publishing house of ISTU, 2002, 180 p.

Соловьев Л. С., 2020

ТРАНСПОРТНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ – ОСНОВА РАЗВИТИЯ КОСМОНАВТИКИ

М. А. Уланов, Е. П. Олейников

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

В исследовании рассматриваются перспективные и менее затратные способы вывода космических аппаратов и их полезной нагрузки как за пределы Земли, так и за пределы Солнечной системы.

Ключевые слова: космонавтика, транспортные космические системы, ракетно-космическая техника.

SPACE TRANSPORT SYSTEMS AS THE BASIS FOR THE DEVELOPMENT OF ASTRONAUTICS

M. A. Ulanov, E. P. Oleynikov

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

This research represents the promising and cost-effective ways of spacecraft launch with payload from Earth to the borders of the solar system and beyond.

Keywords: astronautics, transport space systems, rocket and space technology.

Введение. На сегодняшний день человечество заселяет практически всю Землю. Если в начале нашей эры на Земле насчитывалось около 230 млн. человек, то по состоянию на 2020 год общее число людей, живущих на Земле достигает 7,8 млрд, а по прогнозу на 2050 год население планеты будет составлять около 9 млрд человек.

В процессе своего развития человечество распространялось на все большие и большие территории нашей планеты, вместе с этим приобретая все новые и новые ресурсы для своих нужд. Проблематика ограниченности Земных ресурсов актуальна и по сей день, исходя из этого, возникает понимание, что освоение космоса – один из закономерных этапов в развитии человечества, и первое, что должен совершить человек – покорить родную Солнечную систему. Земляне смогут рассчитывать на безграничное будущее, если совершат массовый выход в космическое пространство. Об этом ещё в своё время говорил наш отечественный учёный-автодидакт К. Э. Циолковский, разрабатывавший теоретические вопросы космонавтики.

Одним из самых значительных препятствий на пути покорения землянами Солнечной системы и космического пространства за ее пределами является топливо. Чем больше полезной нагрузки требуется вывести за пределы атмосферы, тем больше нужно затратить энергии, что влечет за собой увеличение количества топлива, что в свою очередь влечет за собой утяжеление ракеты, превращая все выше описанное в замкнутый круг.

В связи с этим целью работы является поиск и изучение новых перспективных и экономически-выгодных способов вывода космических аппаратов как на орбиту Земли, так и за ее пределы. Также на

основе полученных данных прогнозируются возможные пути развития космической транспортной сети в нашей Солнечной системе.

Доставка космических аппаратов и их полезной нагрузки как на орбиту Земли, так и за ее пределы

В первой части исследовательской работы рассмотрению подвергаются несколько проектов развития космической транспортной системы. Некоторые из них носят утопический характер, другие вполне реализуемы в ближайшем будущем, и каждый из проектов имеет свои преимущества и недостатки. Рассматривались следующие проекты:

1. Межпланетная транспортная система. Проект аэрокосмической компании Space X, предполагающий создание многоразового космического транспорта для доставки людей на Марс с целью создания там в будущем самоподдерживающейся колонии [1]. Межпланетная транспортная система под кодовым названием «BFR» включает в себя такие компоненты как: возвращаемая ракета носитель, межпланетный транспортный корабль BFR и танкерную модификацию этого корабля, полезной нагрузкой которого является топливо для дозаправки BFR на орбите Земли для дальнейшей возможности экспедиций на Луну, Марс и др.

2. Многоразовый корабль «Арго». Российская частная компания «Международные транспортные космические системы» (МТКС), организованная выходцами из S7 Space планирует разработать дешевый транспортный корабль для снабжения грузами Международной космической станции [2].

Многоразовый грузовой корабль будет создаваться в тесной кооперации с предприятиями госкорпораций Роскосмос, Росатом и Ростех. Корабль назовут

«Арго» в честь судна древнегреческих аргонавтов, которые искали золотое руно.

За десять лет эксплуатации МТКС рассчитывает заработать на использовании многоцветного транспортно-корпуса 500 млн долларов

3. Startram. Идея данного проекта была разработана профессорами Джорджем Маисом и Джеймсом Паувеллом – одним из создателей сверхпроводимой магнитной левитации.

Их проект предполагает создание космического аппарата на магнитной подушке, который будет совершать движение без участия сил трения, как и обычные современные поезда на магнитной подушке, но с одним исключением – скорость должна быть на порядок выше, приблизительно в 50 раз большая. Startram планируется “выстреливать” на орбиту планеты с помощью огромной магнитной трубы длиной около 1500 км [3].

4. Космический лифт. Еще один весьма амбициозный и масштабный проект безракетной доставки больших объемов грузов на орбиту Земли и за ее пределы – космический лифт.

Впервые идею космического лифта высказал основоположник теоретической космонавтики – К. Э. Циолковский. К сегодняшнему дню концепция космического лифта была значительно доработана и видоизменена, и представляет из себя конструкцию из четырех частей: основание, подъемный трос, противес, подъемник.

Трос удерживается одним концом на поверхности планеты, а другим – в неподвижной относительно планеты точке выше геостационарной орбиты за счёт центробежной силы. По тросу поднимается подъёмник, несущий полезный груз. При подъёме груз будет ускоряться за счёт вращения Земли, что позволит на достаточно большой высоте отправлять его за пределы тяготения Земли [4].

Межпланетная транспортная сеть. Во второй части исследовательской работы рассматривается такое понятие, как межпланетная транспортная сеть – система гравитационно-определённых сложных орбит в Солнечной системе, которые требуют небольшого количества топлива [5].

Межпланетная транспортная сеть использует точки Лагранжа в качестве точек, в которых возможны низко-затратные переходы между различными орбитами в космическом пространстве.

Из-за слишком большого времени ожидания благоприятных совмещения точек Лагранжа мы не можем рассматривать данный метод как единственный и исключительный способ при освоении и дальнейшей связи между далекими объектами Солнечной системы и Землей. Но все же точки либрации могут послужить основой для заложения будущей транспортной сети и, к примеру, колонизации спутников Юпитера или Сатурна. Мы можем выводить полностью оснащенные специальным грузом космические корабли в точки

Лагранжа и отправлять их в долгий путь для роботизированной колонизации далеких объектов Солнечной системы, исходя из того, что это вполне возможно сделать без больших затрат энергии и топлива, и с дальнейшей перспективой на то, что человечество со временем изобретет кардинально другие ракетные двигатели, способные на межпланетные перелеты.

Таким образом, рассмотренные проекты космических транспортных сетей и способы путешествия между объектами Солнечной системы указывают предположительные пути развития, по которым будет двигаться человечество при освоении космического пространства

Библиографические ссылки

1. Межпланетная транспортная система (SpaceX) [Электронный ресурс]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Межпланетная_транспортная_система_\(SpaceX\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Межпланетная_транспортная_система_(SpaceX)) (дата обращения: 07.09.2019).
2. Многоцветный «Арго» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rbc.ru/newspaper/2019/09/30/5d6e4c399a794779cf182161> (дата обращения: 18.10.2019).
3. Startram – поезд в космос [Электронный ресурс]. URL: <https://xakep.ru/2012/03/21/58450/> (дата обращения: 07.09.2019).
4. Космический лифт [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Космический_лифт#Строительство (дата обращения: 08.09.2019).
5. Межпланетная транспортная сеть [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Межпланетная_транспортная_сеть (дата обращения: 09.09.2019).

References

1. *Mezhplanetnaya transportnaya sistema (SpaceX)* [Interplanetary Transport System (SpaceX)] (In Rus.). [Electronic resource]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Межпланетная_транспортная_система_\(SpaceX\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Межпланетная_транспортная_система_(SpaceX)) (access: 07.09.2019).
2. *Mnogorazovyy «Argo»* [Reusable "Argo"] (In Rus.). [Electronic resource]. URL: <https://www.rbc.ru/newspaper/2019/09/30/5d6e4c399a794779cf182161> (access: 18.10.2019).
3. *Startram – poezd v kosmos* [Startram – train into space] (In Rus.). [Electronic resource]. URL: <https://xakep.ru/2012/03/21/58450/> (access: 07.09.2019).
4. *Kosmicheskiy lift* [Space elevator] (In Rus.). [Electronic resource]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Космический_лифт#Строительство (access: 08.09.2019).
5. *Mezhplanetnaya transportnaya set'* [Interplanetary transport network] (In Rus.). [Electronic resource]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Межпланетная_транспортная_сеть (access: 09.09.2019).

ДИНАМИКА СФЕРИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ТРЕНАЖЕРА

М. Р. Фаизов¹, А. П. Мудров², Ф. Ф. Хабибуллин³

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, Республика Татарстан, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10
E-mail: faizovmarat92@gmail.com

Спроектирована 3D-модель тренажера вестибулярного аппарата для космонавтов и летчиков. Математическая модель динамики составлена на основе уравнения Лагранжа второго рода. Основным результатом является нелинейное уравнение второго порядка относительно ведущего рабочего органа кривошипа 2.

Ключевые слова: сферический кривошипно-коромысловый механизм, динамический анализ сферического механизма, кинетическая энергия.

DYNAMICS OF THE SPHERICAL MECHANISM OF THE SPATIAL SIMULATOR

M. R. Faizov, A. P. Mudrov, F. F. Khabibullin

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev-KAI
10, K. Marksa Str., c. Kazan, Republic of Tatarstan, 420111, Russian Federation
E-mail: faizovmarat92@gmail.com

A 3D-model of a vestibular apparatus simulator for cosmonauts and pilots has been designed. The mathematical model of the dynamics is based on the Lagrange equation of the second kind. The main result is a nonlinear second-order equation with respect to the leading working member of the crank 2.

Keywords: spherical crank-yoke mechanism, dynamic analysis of the spherical mechanism, kinetic energy.

Введение. В моих предыдущих статьях был выполнен анализ кинематики четырехзвенного сферического кривошипно-коромыслового механизма [1; 2]. В этой статье представлен сферический кривошипно-коромысловый механизм с одной степенью свободы, с учетом, режима работы одного ведущего звена. Подобный сферическому механизму, есть механизм Беннет где используются другие методы расчетов взаимозаменяемые сферическому механизму. Похожим способом разрабатывается альтернативный тренажер на базе механизма Беннета [3–5].

На рис. 1 представлена структурная схема тренажера, где сферический кривошипно-коромысловый механизм ABCD взят в основу рабочего органа. У механизма противоположно лежащие звенья $\alpha_1 = \alpha_3 = 90^\circ$, $\alpha_2 = \alpha_4 = 80^\circ$

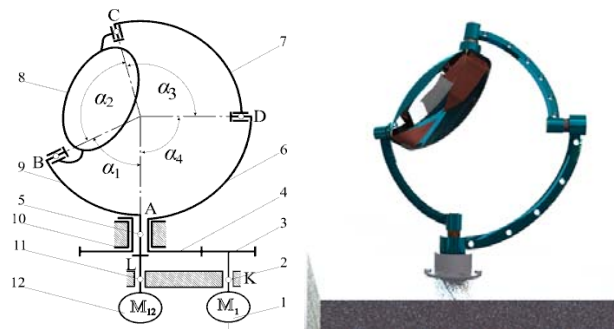


Рис. 1. Пространственный сферический тренажер

Динамический анализ сферического четырехзвенного механизма с одной степенью свободы ABCD начинается с построение математической модели представленной на рис. 2.

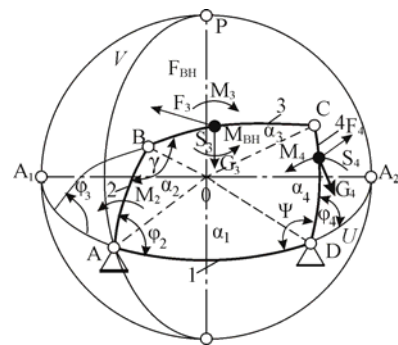


Рис. 2. Структурная модель механизма

Подвергается действию разных сил. На кривошип АВ действует движущий момент $M_D = M_2$. На шатун ВС в точке S_3 действует внешняя сила $F_{вн}$, внешний момент $M_{вн}$, силы инерции F_3 и сила тяжести шатуна G_3 . Кроме того, на коромысло CD действует момент внешней силы M_4 , сила инерции F_4 и сила тяжести коромысла G_4 .

Составим уравнение движения сферического кривошипно-коромыслового механизма с помощью уравнения Лагранжа второго рода:

$$P = M_D \omega_2 + M_{вн} \omega_3 + (G_3 + F_{вн}) V_{S_3} + G_4 V_{S_4} = MPP_2 \omega_2. \quad (1)$$

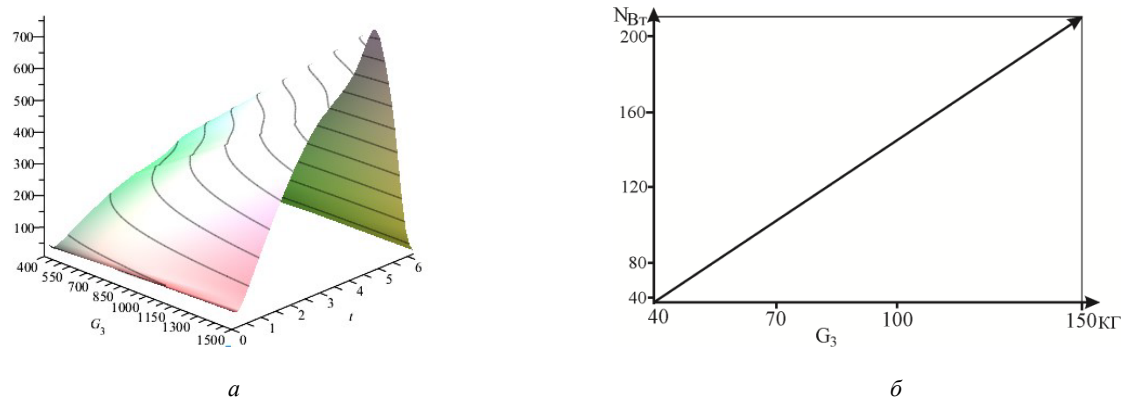


Рис. 3. Представлены графики динамики механизма

Кинетическая энергия механизма имеет вид

$$T = \frac{1}{2} \left(I_2^K + I_P^K u_{32}^2 + I_{S_4}^K u_{42}^2 \right) \dot{\varphi}_2^2. \quad (2)$$

Частные и полные производные кинетической энергии:

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi_2} = \frac{1}{2} \dot{\varphi}_2^2 \left(\frac{\partial I_P^K}{\partial \varphi_2} u_{32}^2 + 2I_P^K u_{32} u_{32}' + 2I_{S_4}^K u_{42} u_{42}' \right); \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} \right) &= \ddot{\varphi}_2 \left(I_2^K + I_P^K u_{32}^2 + I_{S_4}^K u_{42}^2 \right) + \\ &+ \left(\frac{\partial I_P^K}{\partial \varphi_2} u_{32}^2 + 2I_P^K u_{32} u_{32}' + 2I_{S_4}^K u_{42} u_{42}' \right) \dot{\varphi}_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставляя значения в уравнение после некоторых преобразований получим:

$$\begin{aligned} &\ddot{\varphi}_2 \left(I_2^K + I_P^K u_{32}^2 + I_{S_4}^K u_{42}^2 \right) + \\ &+ \frac{1}{2} \dot{\varphi}_2^2 \left(\frac{\partial I_P^K}{\partial \varphi_2} u_{32}^2 + 2I_P^K u_{32} u_{32}' + 2I_{S_4}^K u_{42} u_{42}' \right) = M_D + M_{np_2}^{(ab)}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\ddot{\varphi}_2^* = \frac{M_D + M_{np_2}^{(ab)}}{N_{11}} - \frac{M_{11}}{N_{11}} \dot{\varphi}_2^2; \quad (6)$$

$$M_{11} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial I_P^K}{\partial \varphi_2} u_{32}^2 + 2I_P^K u_{32} u_{32}' + 2I_{S_4}^K u_{42} u_{42}' \right); \quad (7)$$

$$N_{11} = \left(I_2^K + I_P^K u_{32}^2 + I_{S_4}^K u_{42}^2 \right). \quad (8)$$

Для анализа графика (рис. 3, а) выбран полный оборот (360 градусов) ведущего кривошипа 2, также задана масса капсулы от 40 до 150 кг. По уравнению динамики (уравнения движения) лагранжа второго рода мощность математической модели сферического кривошипно-коромыслового механизма при 150 кг достигает максимального значения равная 720 Вт в точке экстремума, а значит следует учесть при создание тренажера. На графике (рис. 3, б) представлена зависимость массы капсулы от мощности момента при постоянной скорости. Здесь угловая скорость ведущего кривошипа 2 постоянна и максимальная мощность при 150 кг равна 220 Вт.

Библиографические ссылки

1. Фаизов М. Р., Хабибуллин Ф. Ф. Анализ расчетов четырехзвенного сферического механизма для пространственного тренажера // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27, № 2. С. 196–206.
2. Фаизов М. Р., Мудров А. П. Исследование движения сферического тренажера // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 1. С. 182–191.
3. Пат. на полезную модель RU 177554 U1, 28.02.2018. Устройство для тренировки вестибулярного аппарата / Исянов И. Р., Яруллин М. Г., Фаизов М. Р., Хабибуллин Ф. Ф.; заявка № 2017100167 от 09.01.2017.
4. Yarullin M. G., Isynov I. R., Mudrov A. P. Kinematics of the connecting rod of a two-mobility five-link space mechanism with a double crank // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2019. P. 201–209.
5. Исянов И. Р., Мудров А. П., Определение матриц перехода между шарнирами двухподвижного пятизвенного пространственного механизма. 2018.

References

1. Faizov M. R., Khabibullin F. F. Analysis of calculations of a four-link spherical mechanism for a spatial simulator // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2020. Vol. 27, № 2. P. 196–206.
2. Faizov M. R., Mudrov A. P. Investigation of the motion of a spherical simulator // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2019. Vol. 26, № 1. P. 182–191.
3. Isyanov I. R., Yarullin M. G., Faizov M. R., Khabibullin F. F. Device for training the vestibular apparatus // Patent for utility model RU 177554 U1, 28.02.2018 Application № 2017100167 dated 09.01.2017.
4. Yarullin M. G., Isynov I. R., Mudrov A. P. Kinematics of the connecting rod of a two-mobility five-link space mechanism with a double crank // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2019. P. 201–209.
5. Isyanov I. R., Mudrov A. P., Determination of transition matrices between the hinges of a two-movable five-link spatial mechanism. 2018.

© Фаизов М. Р., Мудров А. П., Хабибуллин Ф. Ф., 2020

УПРОЩЕНИЕ МОДЕЛЕЙ

А. В. Фищенко, А. А. Хвалько, Е. Г. Сорокина

ФГУП «Горно-химический комбинат»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск, ул. Ленина, 53
Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: fishenko94@mail.ru

Рассмотрена проблема интегрирования систем автоматизированного проектирования и технологической подготовки производства.

Ключевые слова: интеграция, система, автоматизированное проектирование, CAD/CAE, метод конечных элементов, моделирование.

SIMPLIFICATION OF MODELS

A. V. Fischenko, A. A. Hvalko, E. G. Sorokina

FGUP «Minind and Chemical Combine»
53, Lenin Str., Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation
Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
E-mail: fishenko94@mail.ru

This article is devoted to the problem of integrating computer-aided design systems and technological preparation of production.

Keywords: integration, system, computer-aided design, CAD / CAE, finite element method, modeling.

Основными факторами успеха в современном промышленном производстве являются срока выхода продукции на рынок, снижение ее себестоимости и повышение качества. Сейчас общепризнанным фактом является невозможность изготовления сложной наукоемкой продукции (кораблей, самолетов, различных видов промышленного оборудования и др.) без применения современных систем автоматизации [1]. К числу наиболее эффективных технологий, позволяющих выполнить эти требования, принадлежат так называемые CAD/CAM/CAE-системы (системы автоматизированного проектирования, технологической подготовки производства и инженерного анализа). Несмотря на широкое распространение систем CAD для проектирования и систем CAE для анализа, эти системы не так уж хорошо интегрируются. Модели CAD и CAE используют разные типы геометрических моделей, и в настоящее время не существует общей унифицированной модели, которая бы содержала в себе как информацию для проектирования, так и для анализа [2].

Данный метод называется CAD/CAE-интегрированным подходом, который обеспечивает унифицированное моделирование для «бесшовной» интеграции CAD/CAE. На рисунке показан поток данных при этом подходе. В основе его лежат следующие технологии: проектирование с использованием фичеров, NMT, многомасштабные представления.

При данном подходе, одновременно создаются различные типы геометрических моделей проектирования и анализа для каждой операции моделирования фичера. Все модели интегрируются в одну общую модель. Твердотельные модели с различными LOD легко получаются из интегрированной модели. Более того, для каждого LOD можно получить абстрактную NMT модель с различным LOA и передать её в CAE-систему [3].

В случае CAD/CAE-интегрированного подхода CAD и CAE модели создаются одновременно и объединяются в единую NMT модель.

В процессе конечноэлементного моделирования одним из важных этапов является создание сетки конечных элементов. Рассмотрим основные типы конечных элементов и их свойства, называемые атрибутами элементов.

Собственная размерность. Положения конечных элементов могут описываться одной, двумя или тремя пространственными координатами в зависимости от размерности задачи. Соответствующее число внутренних или локальных координат называется собственной размерностью элемента.

Узловые точки. Узловые точки, или узлы предназначены для описания геометрии элемента и задания физических степеней свободы (числа неизвестных функций). Как правило, узлы находятся в угловых или крайних точках элемента. Иногда вводят дополнительные узлы, расположенные внутри элемента.

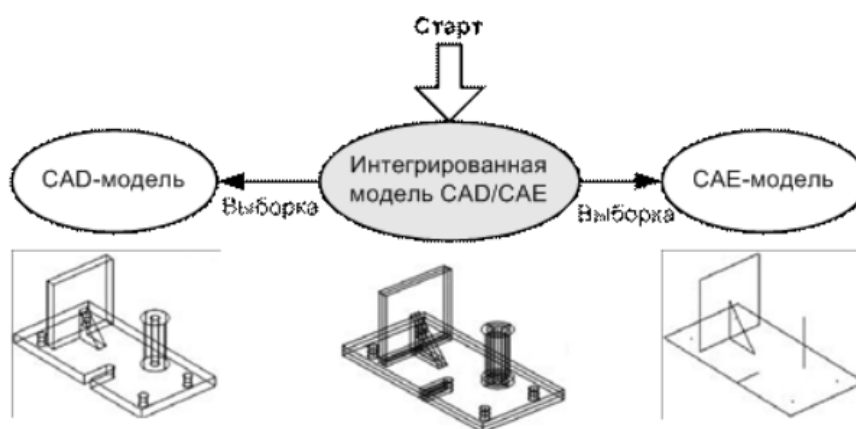


Рис. 1. Интегрированный подход CAD/CAE

Геометрия элемента. Геометрия элемента определяется расположением узловых точек. Большинство элементов, используемых в расчетах, имеют простую геометрическую форму. Например, в одномерном случае элементы обычно представляют собой прямолинейные отрезки или сегменты кривых линий; в двумерном случае элементы имеют трех- или четырехстороннюю форму.

Степени свободы. В качестве степеней свободы могут фигурировать как узловые значения неизвестной функции, так и ее производные по пространственным координатам в узлах.

Необходимо помнить, что точность расчета с помощью МКЭ зависит от правильного выбора типов и размеров конечных элементов. Практика расчетов с применением МКЭ позволяет дать следующие рекомендации:

- линейные элементы требуют более мелкой сетки, чем элементы более высокого порядка (с промежуточными узлами);
- упорядоченная сетка предпочтительнее произвольной;
- прямоугольная сетка с четырьмя узлами, более выгодна, чем сетка с треугольными элементами;
- сетка треугольных элементов с промежуточными узлами, имеет точность, близкую к сетке прямоугольных элементов с четырьмя узлами;
- прямоугольная сетка с восемью узлами, предпочтительнее сетке треугольных элементов с промежуточными узлами, несмотря на большую площадь прямоугольных элементов
- аппроксимация смещений кубическим полиномом (элемент третьего порядка) не требует мелкой сетки.

Форма конечных элементов также влияет на точность вычислений. Следует избегать слишком вытянутых элементов, так как элементы с примерно одинаковыми размерами сторон дают меньшую ошибку. Запрещается использовать четырехугольные элементы с углами, превышающими 180° [4].

В данной работе рассмотрены методы конечных элементов. С их помощью будет осуществлена интеграция CAD/CAE моделей. Планируется на CAD-модели реальной конструкции бортовой РЭА исследовать этапы упрощения модели и определить допустимый предел данного упрощения.

Библиографические ссылки

1. Усюкин В. И. Строительная механика конструкции космических техники : учебник. М. : Машиностроение, 1988. 392 с.
2. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы : пер. с англ. М. : Мир, 1984. 428 с.
3. Клованич С. Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики. Запорожье : Изд-во журнала «Світгеотехніки», 2009. 400 с.
4. Шимановский А. О., Путятю А. В. Применение метода конечных элементов в решении задач прикладной механики : учебно-метод. пособие. Гомель : БелГУТ, 2008. 61 с.

References

1. Usyukin V. I. Stroitel'naya mekhanika konstruktzii kosmicheskikh tekhniki : uchebnik dlya studentov vtuzov. M. : Mashinostroyeniye, 1988. 392 p.
2. Gallager R. Metod konechnykh elementov. Osnovy : per. s angl. M : Mir, 1984. 428 p.
3. Klovanych S. F. Metod konechnykh elementov v nelineynykh zadachakh inzhenernoy mekhaniki. Zaporozh'ye : Izdatel'stvo zhurnala «Svitgeotekhniki», 2009. 400 p.
4. Shimanovskiy A. O., Putyato A.V. Primeneniye metoda konechnykh elementov v reshenii zadach prikladnoy mekhaniki: uchebno-metod. posobiye. Gomel' : BelGUT, 2008. 61 p

© Фищенко А. В., Хвалько А. А.,
Сорокина Е. Г., 2020

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕНЕВЫХ ЗОН НА ОКОЛОЛУННЫХ ОРБИТАХ
И ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ
И ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ ОКОЛОЛУННОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

В. Е. Чеботарев^{1,2,3}, Е. О. Воронцова^{1,3*}, Е. А. Сидорова²

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

²Сибирский федеральный университет

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

³Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: jenvoroncova@gmail.com

Проведено моделирование условий освещенности на окололунных орбитах и определены максимальные длительности полутеневых и теневых участков от Земли и Луны. Осуществлен расчет энергобаланса и теплового режима окололунного космического аппарата различного типоразмера при прохождении теневых зон большой длительности от Земли и Луны.

Ключевые слова: окололунный космический аппарат, орбита, теневой участок орбиты от Луны, теневой участок орбиты от Земли, энергоемкость, аккумуляторная батарея, жалюзи.

**MODELING OF SHADOW ZONES IN LONG ORBITS AND FEATURES OF CALCULATION
OF PARAMETERS OF POWER SUPPLY AND THERMAL CONTROL SYSTEMS
OF A SPACECRAFT**

V. E. Chebotarev^{1,2,3}, E. O. Vorontsova^{1,3}, E. A. Sidorova²

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

²Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

³Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

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

The modeling of illumination conditions in circumlunar orbits and the maximum duration of penumbra and shadow areas from the Earth and the Moon has been carried out. The calculation of the energy balance and thermal regime of a circumlunar spacecraft of various types during the passage of long shadow zones from the Earth and the Moon has been carried out.

Keywords: circumlunar spacecraft, orbit, shadow section of the orbit from the Moon, shadow section of the orbit from the Earth, energy intensity, storage battery, blinds.

Вследствие движения Луны вокруг Земли и Земли вокруг Солнца положение Солнца относительно плоскости орбиты искусственного спутника Луны (ИСЛ) в течение года меняется, что приводит к периодическому появлению теневых орбит, содержащих теневые полутеневые участки от Земли (ТУЗ, ПТУЗ) и Луны (ТУЛ, ПТУЛ) [1; 3]. Проведено моделирование условий освещенности на окололунных орбитах и определены максимальные длительности ТУЗ и ТУЛ для круговых орбит ИСЛ с радиус-вектором 4500 км, которые необходимо использовать при расчете энергобаланса и теплового режима КА [2–4].

Предложено в этих расчетах использовать параметр – эквивалентная длительность ТУЗ (ЭТУЗ), учитывающая парциальный вклад ПТУЗ в ТУЗ.

Рассмотрены два предельных варианта реализации теневых зон в районе орбит ИСЛ в зависимости от положения восходящего узла орбиты ИСЛ относительно линии «Солнце–Земля–Луна».

Вариант 1 – на цикл, содержащий теневые участки орбиты от Луны (55 суток) накладываются теневые участки орбиты от Земли с эквивалентной длительностью 4,00 час.

Вариант 2 – между циклами, содержащими теневые участки орбиты от Луны (185 суток) появляются теневые участки орбиты от Земли с эквивалентной длительностью 6,2 час.

При расчетах энергобаланса и теплового режима КА использовался вариант 2 как более энергонапряженный.

Энерго-массовые характеристики

Тип КА	МКА	СКА	БКА
Потребление КА (среднее), Вт	900	1350	2000
Потребление КА (дежурное), Вт	500	720	780
Потребление КА (хранение), Вт	260	380	380
Мощность БС (на конец САС), Вт	1287	1930	2860
Энергоемкость АБ для ТУЛ, Вт·ч	1112	1667	2470
Энергоемкость АБ для ТУЗ, Вт·ч			
– вариант 1	6157	9236	13682
– вариант 2	4784	6889	7463
– вариант 3	2737	4000	4000
Масса АБ, кг,			
– вариант 1	88	132	195
– вариант 2	68	98	107
– вариант 3	40	57	57
Площадь радиатора, м ²			
– штатный режим	3,0	4,5	6,7
– дежурный режим	2,3	3,3	3,6
– под жалюзи дежурный/хранение	1,4/6,0	2,4/9,0	6,2/13,4
Масса жалюзи, кг			
– вариант 1	0	0	0
– вариант 2	4,2	7,2	18,6
– вариант 3	18,0	27,0	40,2
Итоговая масса, кг			
– вариант 1	88,0 (100 %)	132,0 (100 %)	195,0 (100 %)
– вариант 2	72,0 (82 %)	105,0 (80 %)	125,6 (64 %)
– вариант 3	58,0 (66 %)	84,0 (64 %)	95,2 (49 %)

В результате увеличивается требуемая энергоемкость аккумуляторных батарей (АБ) и затраты энергии на поддержание теплового режима КА на период прохождения ЭТУЗ (в сравнении с ТУЛ) [5; 6].

Рассмотрены три типоразмера КА ЛНСС, мало-размерный КА (МКА), среднеразмерный КА (СКА), большеразмерный КА (БКА) [4].

Для каждого типоразмера проведена оценка характеристик СЭП и СТР для следующих вариантов прохождения теневых зон от Земли большой длительности:

1) поддержание мощности нагрузки на уровне штатной, жалюзи не используются, штатная ориентация;

2) поддержание мощности нагрузки на уровне дежурной, штатная ориентация, жалюзи используются для частичного экранирования поверхности излучательного радиатора;

3) поддержание мощности нагрузки на уровне хранения, нештатная ориентация (требуется дополнительный интервал времени на восстановление ориентации, жалюзи используются для полного экранирования поверхности излучательного радиатора.

Для снижения затрат массы КА рекомендуется переводить КА в режим хранения, при котором уменьшается энергопотребление в сравнении с дежурным режимом, однако увеличивается время восстановления штатного функционирования КА.

Расчетные значения характеристик для различных типоразмеров КА и вариантов прохождения теневых зон приведены в таблице.

Эффективность предлагаемой схемы прохождения теневых зон КА ЛНСС оценена для трех типоразмеров КА по критерию – минимум суммарных затрат массы на обеспечение прохождения ТУЗ и составляет экономию до 51 %.

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. Чеботарев В. Е. Теневые зоны орбит искусственного спутника Луны // Исследования Наукограда : науч. журнал. Железногорск, 2014. № 1(7). С. 12–18.
3. Астрономический календарь. Постоянная часть. 7-е изд. М. : Наука, 1981. 728 с.
4. Косенко В. Е., Звонарь В. Д., Чеботарев В. Е. Лунная информационно-навигационная обеспечивающая система // Актуальные вопросы проектирования АКА для фундаментальных и прикладных научных исследований (ч. 3, п. 3.9, с. 323-329) / сост. В. В. Ефанов. Химки : ФГУП «НПО имени С. А. Лавочкина», 2015. 252 с.
5. Системы электропитания космических аппаратов / Б. П. Соустин, В. И. Иванчура, А. И. Чернышев и др. Новосибирск : Всерос. образование «Наука», 1994. 318 с.
6. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике : учебник / под ред. В. К. Кошкина. М : Машиностроение, 1975. 624 с.

References

1. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proyektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [Basics of designing information support spacecraft]. Krasnoyarsk, SibGAU, 2011, 488 p.
2. Chebotarev V. E. [Shadow zones of the artificial moon orbits] // *Issledovaniya Naukograda*. 2014. № 1(7). P. 12–18 (In Russ).
3. Abalakin V. K. *Astronomicheskiy kalendar'. Postoyannaya chast'*. [Astronomical calendar. Permanent part]. M. : Nauka, 1981. 748 p.
4. Kosenko V. E., Zvonar V. D., Chebotarev V. E. *Lunnaya informatsionno-navigatsionnaya obespechivayushchaya sistema* [Lunar information and navigation support system]. Himki : FGUP «NPO im. S. A. Lavochkina», 2015. 252 p.
5. Soustin B. P., Ivanchura V. I., Chernishev A. I. *Sistemy elektropitaniya kosmicheskikh apparatov* [Power supply systems for spacecraft]. Novosibirsk : Nauka, 1994. 318p.
6. Koshkin V. K. *Osnovy teploperedachi v aviatsionnoy i raketno-kosmicheskoy tekhnike* [Fundamentals of heat transfer in aviation and rocket and space technology]. M. : Mashinostroenie, 1975. 624 p.

© Чеботарев В. Е., Воронцова Е. О.,
Сидорова Е. А., 2020



Секция

**«КРУПНОГАБАРИТНЫЕ
ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ»**

УДК 62-238.9

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ, ОБЕСПЕЧИВАЕМЫХ УСТРОЙСТВОМ ОТДЕЛЕНИЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В. Е. Ануфриенко¹, И. О. Надеин², А. А. Герус¹, А. А. Байбородов¹

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

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: Uthec_piroteh@mail.ru

Описан способ проведения бросковых испытаний систем отделения для малых космических аппаратов. Представлена схема испытаний, исключая внешнее механическое воздействие на макет малого космического аппарата со стороны вспомогательных систем испытательной установки. Описан разработанный и изготовленный электронный блок на основе микроэлектромеханического инерциального датчика и микроконтроллера, обеспечивающий регистрацию параметров отделения и иницирование процесса разделения в наиболее подходящий момент.

Ключевые слова: система отделения, малый космический аппарат, бросковые испытания, микроэлектромеханический прибор, микроконтроллер.

METHOD FOR PARAMETERS DETERMINATION PROVIDED BY THE SMALL SPACECRAFT SEPARATION DEVICE

V. E. Anufrienko¹, I. O. Nadein², A. A. Gerus¹, A. A. Bayborodov¹

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

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: Uthec_piroteh@mail.ru

The method of conducting separation systems pop-up tests for small spacecraft is described. The test scheme is presented which excludes external mechanical impact on the layout of a small spacecraft from the auxiliary systems of the test facility. The electronic unit based on microelectromechanical inertial sensor and microcontroller is described, which ensures separation parameters are recorded and the separation process initiated at the most appropriate moment.

Keywords: separation system, small spacecraft, pop-up tests, delivery system simulation, electronic unit.

Устройство отделения малых космических аппаратов (далее – МКА) должно обеспечивать отделение МКА от средства доставки в заданный момент времени. При этом устройство отделения должно обеспечить заданные параметры движения МКА, а именно линейные и угловые скорости.

МКА, в частности спутники классов «Нано» (от 1 до 10 кг), «Пико» (до 1 кг) по классификации Ariospace [1], обладают исчезающе малыми инерциальными характеристиками по сравнению с классическими космическими аппаратами. Это затрудняет определение параметров отделения при испытаниях с использованием классических систем обезвешивания объекта испытаний, поскольку элементы системы обезвешивания оказывают значительное и трудно прогнозируемое влияние на параметры движения столь малых объектов. Достичь требуемой точности измерения возможно лишь при проведении бросковых испытаний.

Для проведения бросковых испытаний выбрана схема, представленная на рисунке, а. Имитатор средства доставки (далее – ИСД) 1 в исходном положении подвешивается на тросе 5. Для торможения ИСД 1 предусмотрены канаты 4. Макет МКА 2 и система

отделения (далее – СО) 6 закреплены на ИСД 1 таким образом, чтобы направление отделения совпадало с направлением силы тяжести. Таким образом, СО 6 не будет испытывать боковых нагрузок, резкое уменьшение которых в момент начала броска может привести к высвобождению энергии, запасённой в элементах конструкции СО в результате их изгиба. Для зачековки СО в исходном положении используется электромагнит. При разрезании троса 5 объект испытаний начинает свободное падение, во время которого происходит срабатывание СО и отделение макета МКА 2 (см. рисунок, б). После пролёта расстояния, требуемого для измерения параметров отделения, макет МКА 2 тормозится батутом 3, а ИСД 1 тормозится канатами 4 (см. рисунок, в).

Срабатывание СО и измерение параметров отделения обеспечивается специально разработанным и изготовленным электронным блоком (далее – ЭБ). Причём, в испытательной установке используются 2 электронных блока, один из которых устанавливается на макет МКА, второй – на ИСД.

Благодаря этому имеется возможность учитывать влияние инерциальных характеристик ИСД на параметры отделения.

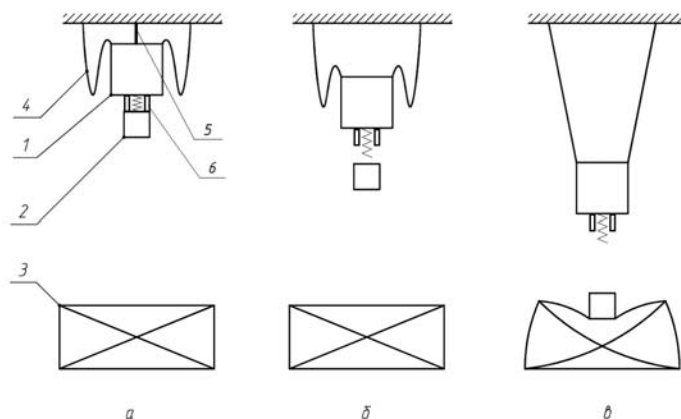


Схема бросковых испытаний:
 а – исходное положение: 1 – ИСС; 2 – имитатор МКА; 3 – аккумулятор; 4 – канаты торможения;
 5 – трос; 6 – СО; б – свободное падение; в – торможение

В ЭБ использованы следующие компоненты:

- инерциальный микроэлектромеханический датчик MPU-9250;
- 8-битный микроконтроллер ATmega328;
- адаптер карты памяти microSD;
- силовой транзистор.

Датчик MPU9250 обеспечивает измерение:

- угловых скоростей по трём взаимно перпендикулярным осям с разрешением до $0,004 \text{ }^\circ/\text{с}$ при шуме измерений до $0,1 \text{ }^\circ/\text{с}$, частота измерений до 8000 Гц;
- линейных ускорений по трём взаимно перпендикулярным осям с разрешением до $0,0006 \text{ м/с}^2$ при шуме измерений до $0,08 \text{ м/с}^2$, частота измерений до 4000 Гц [2].

Микроконтроллер ATmega328 обеспечивает запись показаний датчика MPU9250 на карту памяти с частотой измерений 50 Гц. За счёт возможности усреднения результата измерения по нескольким выборкам удалось достигнуть шума измерений угловой скорости $0,046 \text{ }^\circ/\text{с}$.

Также, программа микроконтроллера по данным об ускорении определяет начало броска и автоматически инициирует срабатывание СО путём отключения питания электромагнита. Для питания ЭБ используется литий-ионная аккумуляторная батарея, ёмкости которой достаточно для работы ЭБ со включенным электромагнитом в течение 1,5 часов.

Использование перечисленных компонентов позволило достичь габаритных размеров электронного блока $92 \times 42 \times 18 \text{ мм}$ и массы $0,04 \text{ кг}$, что позволяет его размещать в макетах МКА вплоть до класса «Пико». Размеры и масса аккумуляторной батареи могут варьироваться в зависимости от способа инициирования процесса разделения. В бросковых испытаниях, проводимых в АО ИСС, использовалась аккумуляторная батарея размерами $87 \times 42 \times 23 \text{ мм}$ и массой $0,075 \text{ кг}$.

На момент написания статьи в АО «ИСС» проведено свыше 30 бросков по описанному способу.

Библиографические ссылки

1. Овчинников М. Ю. «Малыши» завоевывают мир // Компьютера. 2007. № 15. С. 37–43.

2. MPU-9250 Product Specification Rev. 1.1 [Электронный ресурс]. URL: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf> (дата обращения: 17.09.2020).

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. Ануриев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 т. Т. 3. 8-е изд., перераб. и доп. / под ред. И. Н. Жестоковой. М. : Машиностроение, 2001. 859 с.

5. Ануриев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 т. Т. 2. 8-е изд., перераб. и доп. / под ред. И. Н. Жестоковой. М. : Машиностроение, 2001. 901 с.

References

1. Ovchinnikov M. U. «Malyshi» zavoeyvayut mir «Malyshi» conquering the world // Komp'yuterra. 2007. № 15. P. 37–43 (In Russ.).

2. MPU-9250 Product Specification Rev. 1.1. [Electronic resource]. URL: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf> (access: 17.09.2020).

3. Chebotarev V. E., Kosenko V. E., *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya: ucheb. Posobie* [Fundamentals of spacecraft design information support] / Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2011. 488 p.

4. Anuryev V. I. *Spravochnik konstruktora-mashinostroitelia* [Handbook of mechanical engineer] : v 3 t. T. 3. 8-e izd., pererab. i dop. / pod red. I. N. Zhestokovoi. M. : Mashinostroenie, 2001. 859 p.

5. Anuryev V.I. *Spravochnik konstruktora-mashinostroitelia* [Handbook of mechanical engineer] : v 3 t. T. 2. 8-e izd., pererab. i dop. / pod red. I. N. Zhestokovoi. M. : Mashinostroenie, 2001. 859 p.

© Ануфриенко В. Е., Надеин И. О., Герус А. А., Байбородов А. А., 2020

2D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ КРУПНОГАБАРИТНОГО ОБЪЕКТА КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА В НЕВЕСОМОСТИ

С. В. Аринчев

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)
Российская Федерация, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская улица, 5/1
E-mail: arinchev@inbox.ru

Цель космического мусоросборщика – не весь крупногабаритный объект целиком, а только два его встроенных фрагмента. Объект мусора защищает себя вращением. Целевые фрагменты вырезаются лазером. Разлет фрагментов исследуется методом частиц.

Ключевые слова: лазерная резка, космический мусоросборщик, метод частиц.

2D-SIMULATION OF THE GRAVITY-FREE LASER-CUTTING DYNAMIC PROCESS APPLIED TO THE LARGE SPACE-DEBRIS OBJECT

S. V. Arinchev

Bauman Moscow State Technical University (National Research University)
5/1, 2-ya Baumanskaya Str., Moscow, 105005, Russian Federation
E-mail: arinchev@inbox.ru

The target of the space-debris collector is not the entire large space-debris object, but its two built-in blocks only. The object defends itself by its orientation change. The two blocks are cut out using a laser. The target-block velocity 2D-estimates are obtained using the particle approach.

Keywords: laser cutting, space-debris collector, particle approach.

Постановка задачи. Мусоросборщик выбирает и захватывает (уносит с собой) только небольшие фрагменты космического мусора [1]. Рассмотрена ситуация, когда целевые фрагменты мусора – это встроенные блоки крупногабаритной упругой конструкции космического объекта. Начальные положение и скорости мусоросборщика относительно объекта мусора на орбите заданы [2]. Целевые блоки вырезаются из объекта лазером. Объект защищает себя включением двигателей ориентации. На мусоросборщике работают двигатели ориентации, интенсивно движется лазерная головка. Возникают сильные колебания упругой конструкции объекта и упругой конструкции мусоросборщика. Исследуется процесс разлета целевых фрагментов мусора. Процесс захвата данных фрагментов не рассматривается.

Методика 2D-моделирования. Крупногабаритный объект мусора и мусоросборщик в невесомости произвольно вращаются. Пространственное представление поверхности лазерной резки и использование понятия твердого тела затруднительно [3; 4]. Поэтому использован метод частиц [5; 6]. Вместо понятия «режущий луч» на плоскости введено понятие «режущая точка». 2D-модель рассматриваемой системы представлена на рис. 1.

Сформулирована задача Коши с начальными условиями. Задача геометрически нелинейна.

Процесс разлета и интенсивные колебания частиц вырезаемых фрагментов космического мусора, показан на рис. 2.

В ходе выступления докладчик представляет электронный учебник нового поколения [7].

Выводы:

1. В невесомости объект космического мусора и мусоросборщик произвольно вращаются. Представление поверхности резания затруднительно. Поэтому в данной задаче предложено отказаться от понятия твердого тела, предложено использовать метод частиц.

2. Задача лазерной резки сведена к задаче деактивации связей между частицами 2D-модели. Сформулированы математические условия деактивации данных связей.

3. Показано, что в условиях невесомости прицеливание невозможно. Движение режущей точки имеет хаотический характер. Сохранность вырезаемых фрагментов и требуемая полнота резки обеспечивается своевременным включением и отключением лазера.

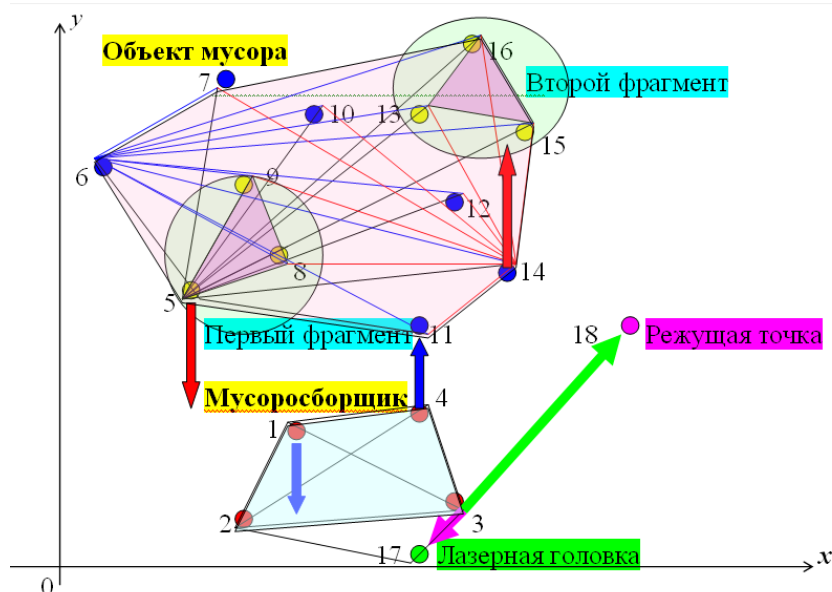


Рис. 1. Рассматриваемые 2D-модели крупногабаритного объекта мусора и мусоросборщика

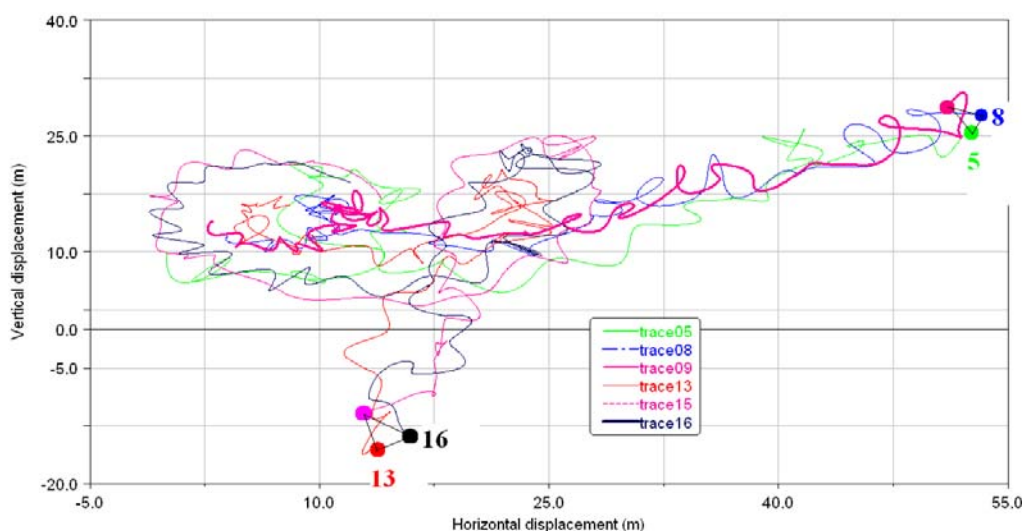


Рис. 2. Траектории движения частиц двух вырезанных фрагментов в процессе лазерной резки

Библиографические ссылки

1. Сомов Е. И., Бутырин С. А., Сомов С. Е. Управление космическим роботом-манипулятором при встрече и механическом захвате пассивного спутника // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2018. Т. 20, № 6. С. 202–209.
2. Аринчев С. В. Анализ динамики перелета космического мусоросборщика из плоскости своей орбиты в плоскость орбиты фрагмента мусора // Известия высших учебных заведений. М. : Машиностроение, 2020. № 1 (718). С. 63-71
3. Ахрамович С. А., Малышев В. В., Старков А. В. Математическая модель движения беспилотного летательного аппарата в бикватернионной форме // Полет. Общероссийский научно-технический журнал (Московский авиационный институт), 2018. № 4. С. 9–20.
4. Finger J., Weinand M., Wortmann D. Ablation and cutting of carbon-fiber reinforced plastics using picosecond pulsed laser radiation with high average power // Journal of Laser Applications, 2013. Vol. 25. 042007.
5. Аринчев С. В. Двойная гирочастица как инструмент решения задач аэроупругости в сверхзвуковом потоке // Известия высших учебных заведений. М. : Машиностроение, 2020. № 5 (722). С. 62–73.
6. Аринчев С. В. 3-й закон Ньютона – это не догма. Это расчетная гипотеза // Известия высших учебных заведений. М. : Машиностроение, 2020. № 6 (726). С. 36–50.
7. Аринчев С. В. Проектирование космического мусоросборщика (электронный учебник на флешкарте 64 Гб). М. : САМИЗДАТ, 2020. Объем информации 31.3 Гб.

References

1. Somov E. I., Butyrin S. A., Somov S. E. *Upravleniye kosmicheskim robotom-manipulatorom pri vstreche i mekhanicheskom zakhvate passivnogo sputnika* [Mechanical capture of a passive satellite using a space manipulator] // *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Centra Rossiyskoy Akademii Nauk*. 2018. Vol. 20, № 6 P. 202–209 (In Russ.).
2. Arinchev S. V. *Analiz dinamiki pereleta kosmicheskogo musorosborshchika iz ploskosti svoey orbity v ploskost orbity fragmenta musora* [Dynamics of the space-debris-collector orbital transfer from out its own orbit into the orbit of the debris fragment] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. M. : Mashinostroyeniye*, 2020. № 1 (718). P. 63–71 (In Russ.).
3. Akhramovich S. A., Malyshev V. V., Starkov A. V. *Matematicheskaya model dvizheniya bespilotnogo letatel'nogo apparata v bikvaternionnoy forme* [Biquaternion modelling of the air-drone motion] // *Polyot. Obshcherossiyskiy nauchno-technicheskiy zhurnal (Moskovskiy Aviat-sionniy Institute)*, 2018. № 4. P. 9–20 (In Russ.).
4. Finger J., Weinand M., Wortmann D. Ablation and cutting of carbon-fiber reinforced plastics using picosecond pulsed laser radiation with high average power // *Journal of Laser Applications*, 2013. Vol. 25. 042007.
5. Arinchev S. V. *Dvoynaya gyrochastitsa kak instrument resheniya zadach aerouprugosti v sverkhzvukovom potoke* [The two-mass gyro-particle as the tool for supersonic aeroelasticity analysis] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. M. : Mashinostroyeniye*, 2020. № 5 (722). P. 62–73 (In Russ.).
6. Arinchev S. V. *Tretiy zakon Newtona – eto ne dogma. Eto raschetnaya gipoteza* [The 3-rd Newtons law is not the dogma. It is the computation hypothesis] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. M. : Mashinostroyeniye*, 2020. № 6 (726). P. 36–50 (In Russ.).
7. Arinchev S. V. *Proyektirovaniye kosmicheskogo musorosborshchika (electronniy uchebnik na flashkarte 64 GB)* [Space-debris-collector computer-aided design (the electronic manual arranged within the 64 GB flash-memory drive)]. M. : SAMIZDAT, 2020. 31.3 GB information content (In Russ.).

© Аринчев С. В., 2020

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА В ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А. П. Белоглазов¹, В. В. Крестинин¹, А. Г. Еремин²

¹ООО «Ниагара»

Российская Федерация, 119049, г. Москва, ул. Донская, 6, стр. 2

²Московский авиационный институт

Российская Федерация, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4

E-mail: and.eremin0604@yandex.ru

Представлены результаты работ по изучению возможности использования для отвода тепла с теплонапряженных агрегатов летательных аппаратов углеродных материалов с высокой теплопроводностью.

Ключевые слова: космический аппарат, излучающая поверхность, теплопроводность, тепловые трубы, тепловые испытания, углеродное волокно.

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF USING CARBON MATERIAL IN HEAT TRANSFER DEVICES AIRCRAFT

A. P. Beloglazov¹, V. V. Krestinin¹, A. G. Eremin²

¹LLC "Niagara"

6/2, Donskaya Str., Moscow, 119049, Russian Federation

²Moscow Aviation Institute

4, Volokolamskoe highway, Moscow, 125993, Russian Federation

E-mail: and.eremin0604@yandex.ru

The report presents the results of work on the study of the possibility of using carbon materials with high thermal conductivity for heat removal from heat-stressed aircraft units.

Keywords: spacecraft, radiating surface, thermal conductivity, heat pipes, thermal tests, carbon fiber.

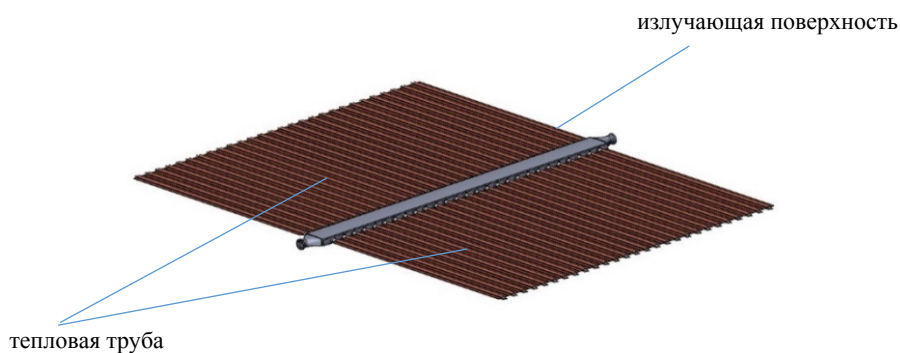
В современных летательных аппаратах с их требованиями по минимальным массогабаритным характеристикам присутствует задача отвода тепла от энергонапряженных агрегатов, в качестве которых могут выступать различные электронные устройства, агрегаты по своим функциональным характеристикам, требующие определенный уровень температур, а также в энергетические установки отвода в космическое пространство преобразованного в электроэнергию тепла. В настоящее время для этих целей применяются различные системы, к которым можно отнести охлаждение агрегата потоком газа, при его наличии, прокачивание охлаждающего теплоносителя, использование тепловых труб с последующим отводом от них тепла. Все эти методы требуют наличия специальных систем, представляющих, в большинстве своем, сложные конструкторские устройства.

В связи с этим в докладе представлены результаты работ по изучению возможности использования для отвода тепла с теплонапряженных агрегатов углеродных материалов с высокой теплопроводностью. Было рассмотрено два направления.

Первое касалось отвода тепла от агрегатов космического аппарата. С этой целью космический аппарат снабжен холодильником-излучателем (ХИ) (см. рисунок), обеспечивающий отвод тепла от функциони-

рующих на спутнике приборов, либо отвод не преобразованного тепла при наличии 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 ограниченное количество подводящих к ним тепло элементов, в качестве которых могут выступать трубки с прокачивающим через них теплоносителем, либо тепловые трубы.

В предлагаемой конструкции углеродный материал в виде полотна выступал в качестве излучающей поверхности. Выбор углеродного полотна мотивирован его возможностью компенсировать различие в коэффициентах термического расширения материала тепловой трубы и углерода, в случае жесткого крепления полотна к тепловой трубе, а также возможностью перемещения углеродного полотна относительно тепловой трубы при отсутствии жесткого крепления. Анализ возможных методов крепления углеродной ткани к стали, их которой, как правило, выполнены тепловые трубы показал, что паянное соединение является наиболее пригодным. Был разработан технологический процесс пайки углеродного полотна к нержавеющей стали.



Панель холодильника-излучателя

Тепловые испытания элемента макета холодильника излучателя свидетельствовали о возможности и эффективности применения углеродного теплопроводного полотна в качестве излучающей поверхности холодильника-излучателя [2]. В то же время выявлены технологические сложности в процессе пайки высокомодульного теплопроводного полотна к трубкам холодильника излучателя, которые при его штатных габаритах, десятки метров, могут стать трудно разрешимыми. Поэтому был рассмотрен вариант, в котором полотно было заменено на углеродное волокно, располагаемое между трубками, как уток между основой. Технологически процесс получения углеродной поверхности оказался существенно проще. На выполненном таким образом элементе макета холодильника излучателя были также проведены тепловые испытания. Они подтвердили возможность реализации в конструкции холодильника-излучателя реализации такой углеродной поверхности излучения.

Другим направлением работ являлось создание из теплопроводного углеродного материала конструктивных элементов. В качестве углеродного материала в этом случае использован терморасширенный графит. По своим свойствам он не имеет конструктивной жесткости. Технологическими приемами удалось ее достичь и в результате была реализована теплоотводящая конструкция, позволившая отводить тепло от электронной аппаратуры, функционирующей в атмосферной среде. В ней были использовано как теплопроводное углеродное волокно, так и терморасширенный графит. В случае необходимости интенсификации отвода тепла от теплонапряженных агрегатов возможно использование тепловых труб, снабженных теплоприемниками, выполненными также из теплопроводного углеродного материала.

В тоже время, введение теплопроводных углеродных материалов в конструкцию летательных аппаратов потребует решения ряда конструкторско-технологических задач, связанных с их изготовлением и эксплуатацией.

Библиографические ссылки

1. Теория и расчет энергосиловых установок космических летательных аппаратов / Л. А. Квасников, Л. А. Латышев, Н. Н. Понамарев-Степнов и др. М. : Изд-во МАИ, 2001. 480 с.
2. Белоглазов А. П., Еремин А. Г., Ладько М. А. Исследование возможности использования углеродного материала в конструкции холодильника-излучателя космического аппарата // Решетневские чтения : материалы XXII Междунар. науч.-практ. конф. / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2018. Ч. 1. С. 80–81.

References

1. Theory and calculation of power plants of spacecraft / L. A. Kvasnikov, L. A. Latyshev, N. N. Ponamarev-Stepnov et al. M. : Publishing house of MAI, 2001. 480 p.
2. Beloglazov A. P., Eremin A. G., Ladyko M. A. Investigation of the possibility of using carbon material in the construction of a refrigerator-emitter of a spacecraft // Reshetnevskiy chteniya : materialy XXII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf / Reshetnev University. Krasnoyarsk, 2018. Ch. 1. P. 80–81.

© Белоглазов А. П., Крестинин В. В.,
Еремин А. Г., 2020

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ОПОРНОГО ОБЕЗВЕШИВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. С. Беляев, А. А. Филипас, А. В. Тырышкин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30
E-mail: belyaewas@mail.ru

Представлена разработанная имитационная модель солнечной панели и мобильной платформы, являющейся опорной системы обезвешивания. Синтезирован ПИД-регулятор по отклонению между положением центра солнечной панели и положением центра мобильной платформы, позволяющий обеспечивать максимальное отклонение в пределах габаритов мобильной платформы, тем самым обеспечивать обезвешивание солнечной панели.

Ключевые слова: обезвешивание, солнечная батарея, наземные испытания, автоматическое управление.

SIMULATION MODEL OF A REFERENCE WEIGHTING SYSTEM FOR SPACECRAFT ELEMENTS

A. S. Belyaev, A. A. Filipas, A. V. Tyryshkin

National Research Tomsk Polytechnic University
30, Lenina Av., Tomsk, 634050, Russian Federation
E-mail: belyaewas@mail.ru

This paper presents a developed simulation model of a solar panel and a mobile platform, which is a support system for weight removal. A PID controller has been synthesized for the deviation between the position of the center of the solar panel and the position of the center of the mobile platform, which makes it possible to provide the maximum deviation within the dimensions of the mobile platform, thereby ensuring the weighting of the solar panel.

Keywords: weightlessness, solar wing, ground tests, automatic control.

Бурное развитие космических технологий увеличивает необходимое количество устройств различного назначения, таких как искусственные спутники, планетоходы, станции и т.п. В своем большинстве данные устройства имеют складные конструкции, позволяющие уменьшить габариты во время транспортировки. При доставке устройств до места функционирования, например, на геостационарную орбиту или Луну, устройство должно обеспечивать развертывание данных конструкций в рабочее состояние. В качестве таких конструкций могут выступать солнечные батареи, рефлекторы антенн и многие другие. Чтобы проверить работоспособность раскрытия и рассчитать энергетический запас, необходимый для данной операции, проводят наземные испытания, для которых необходимо воссоздать условия невесомости. В работе [1] оценивается реализуемость активной опорной системы обезвешивания элементов солнечной панели, с точки зрения определения положения точек позиционирования опор, для минимизации моментов в шарнирах, однако процесс управления непосредственно мобильной платформой не был рассмотрен. Поэтому для синтеза системы управления опорой, была разработана имитационная модель обезвешиваемого элемента и мобильной платформы, с использованием пакета Simulink Multibody программного комплекса Matlab. За прототип мобильной платформы, размером 0,5 на 0,5 м, была взята робототехниче-

ская платформа Kuka YouBot, содержащая 4-месаnum колеса с углом поворота роликов под 45 градусов. Используя кинематические преобразования [2], получены уравнения прямой (1) и обратной кинематики (2) мобильной платформы в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ M_\omega \end{pmatrix} = \frac{R}{4} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ \frac{-1}{(L+l)} & \frac{1}{(L+l)} & \frac{-1}{(L+l)} & \frac{1}{(L+l)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \\ \dot{\phi}_4 \end{pmatrix} = \frac{1}{R} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & -(L+l) \\ -1 & 1 & (L+l) \\ -1 & 1 & -(L+l) \\ 1 & 1 & (L+l) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где F_x – сила движения мобильной платформы вдоль оси X; F_y – сила движения мобильной платформы вдоль оси Y; M_ω – момент вращения платформы; L – длина мобильной платформы; l – половина ширины мобильной платформы; M_i – момент вращения i -го колеса; $\dot{\phi}_i$ – скорость вращения i -го колеса;

R – радиус колеса; v_x – скорость мобильной платформы вдоль оси X; v_y – скорость мобильной платформы вдоль оси Y; ω – скорость вращения мобильной платформы.

Для создания моментов вращения колес в модель мобильной платформы были заложены математические модели двигателей постоянного тока [3–4] с параметрами привода фирмы *DunkenMotoren GR 80×80* в связке с редуктором той же фирмы *PLG 60* с соотношением 12:1. В качестве обезвешиваемого элемента была выбрана одна секция солнечной батареи весом 40 кг., одним концом закрепленная к опоре, имитирующей корпус космического корабля, через шарнирный элемент имеющий степень вращения во круг вертикальной оси.

Для отработки возможных режимов работы панели, регулирование скорости проводилось в шести режимах работы: равноускоренное, с постоянной положительной скоростью, равнозамедленное, движение

с отрицательной скоростью, реверс на 6 секунде и останов на 8 секунде. Имитационная модель системы обезвешивания представлена на рис. 1.

Для обеспечения обезвешивания в динамическом режиме, необходимо, чтобы центр обезвешиваемой солнечной панели находился в пределах опорной площадки мобильной платформы. Поэтому в качестве обратной связи выступала информация об отклонении центра солнечной панели от центра мобильной платформы. В результате для управления движением платформы по отклонению был синтезирован ПИД-регулятор. Для проверки работоспособности регулятора в качества начального смещения мобильной платформы относительно центра масс солнечной панели вдоль обеих осей движения было задано смещение 0,25 м, что соответствует предельному смещению по геометрическим размерам опорной площадки. В результате полученные переходные характеристики по обеим осям движения мобильной платформы представлена на рис. 2.

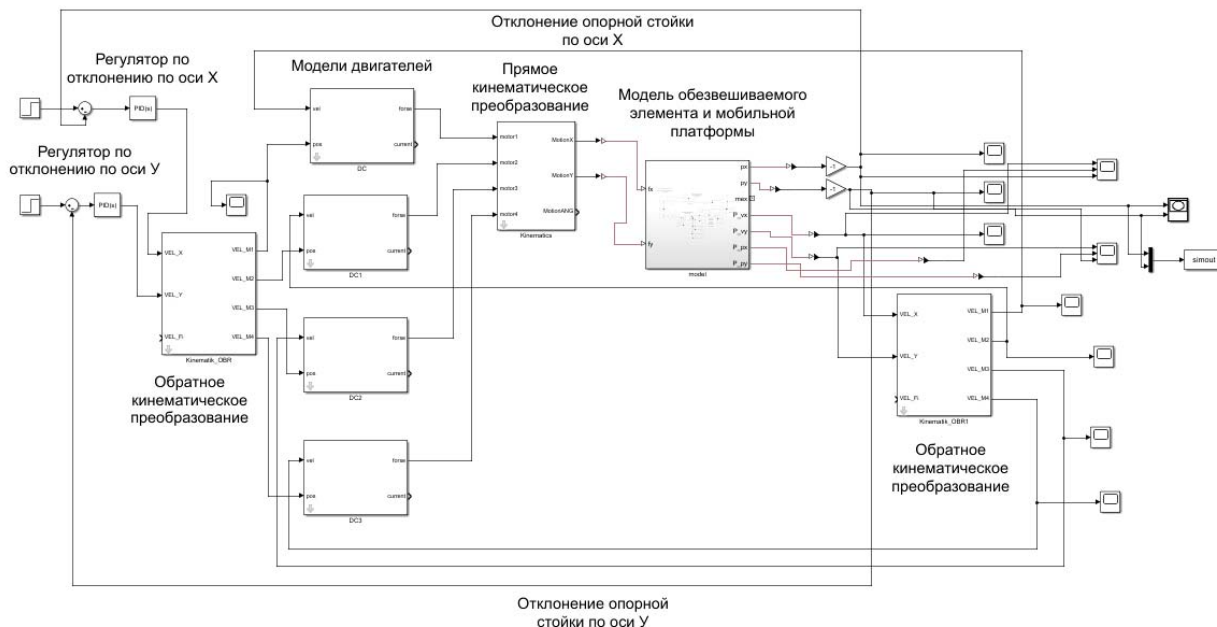


Рис. 1. Имитационная модель с системой управления

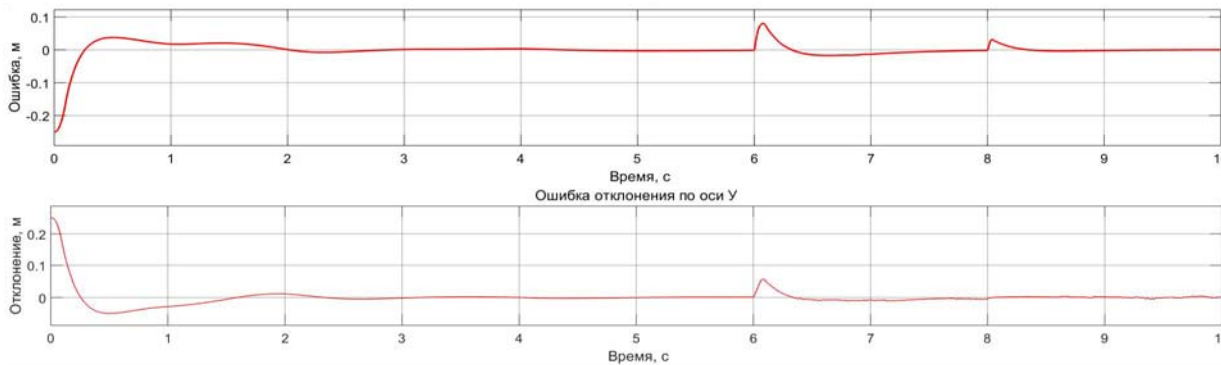


Рис. 2. Переходные характеристики по отклонению мобильной платформы по осям X и Y

По данным переходным характеристикам, видно, что максимальная динамическая ошибка не превышает 0,08 м, что говорит о не смещении панели за границы опорной площадки мобильного робота во всех режимах регулирования скорости солнечной панели и как следствие о работоспособности системы управления.

Библиографические ссылки

1. Малышенко А. М., Беляев А. С. Оценка реализуемости обезвешивания крыльев солнечных батарей при их наземных испытаниях с помощью робокаров // Решетневские чтения : материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф. / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2019. С. 383–385.
2. Gferrer A. Geometry and kinematics of the Mecanum wheel // Computer Aided Geometric Design. 2008. Vol. 25, iss. 9. P. 784–791.
3. Чиликин М. Г., Сандлер А. С., Ключев В. И. Теория автоматизированного электропривода : учеб. пособие . М. : Энергия, 1979. 615 с.
4. Терехин В. Б., Дементьев Ю. Н. Компьютерное моделирование систем электропривода постоянного и

переменного тока в Simulink : учеб. пособие. Томск : Изд-во ТПУ, 2013.

References

1. Malysenko A. M., Belyayev A. S. Otsenka realizuyemosti obezveshivaniya kryl'yev solnechnykh batarey pri ikh nazemnykh ispytaniyakh s pomoshch'yu robokarov // Reshetnevskiye chteniya : materialy XXIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. / Reshetnev University. Krasnoyarsk, 2019. S. 383–385.
2. Gferrer A. Geometry and kinematics of the Mecanum wheel // Computer Aided Geometric Design. 2008. Vol. 25, iss. 9. P. 784–791.
3. Chilikin M. G., Sandler A. S., Klyuchev V. I. Teoriya avtomatizirovannogo elektroprivoda : ucheb. posobiye . M. : Energiya, 1979. 615 s.
4. Terëkhin V. B., Dement'yev YU. N. Komp'yuternoye modelirovaniye sistem elektroprivoda postoyannogo i peremennogo toka v Simulink : ucheb. posobiye. Tomsk : Izd-vo TPU, 2013.

© Беляев А. С., Филипас А. А.,
Тырышкин А. В., 2020

КИНЕМАТИКА РАСКРЫТИЯ НОВОГО ТОЧНОГО ЛЕПЕСТКОВОГО ЗЕРКАЛА

В. И. Буйкас, М. Д. Готов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева
Российской академии наук
Российская Федерация, 119991, ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, 53
E-mail: bujakas@yandex.ru.

Предлагаются новая конструкция и новая схема раскрытия лепесткового зеркала, которые позволят повысить точность отражающей поверхности антенны космического радиотелескопа на орбите и улучшить качество работы инструмента в коротковолновой области спектра.

Ключевые слова: космический рефлектор, кинематика раскрытия, ненатянутая структура, математическая модель, компьютерное и физическое моделирование.

DEPLOYMENT KINEMATICS OF NEW PRECISE PETAL-TYPE REFLECTOR

V. I. Bujakas, M. D. Glotov

P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences
53, Leninsky prospekt, Moscow, 119991, Russian Federation
E-mail: bujakas@yandex.ru

New design of petal - type mirror deployment is proposed. Mathematical model of deployment kinematics has been built and studied. Results of computer and physical simulation of proposed technical solution are presented.

Keywords: space reflector, deployment kinematics, computer and physical modeling.

Введение. Разработке и исследованию твердотельных лепестковых космических зеркальных антенн посвящено значительное количество работ [1–4]. Классическая схема раскрывающегося лепесткового зеркала была предложена корпорацией Дорнье в рамках работ по проекту FIRST (Far Infrared Space Telescope) [5; 6].

Схожая конструкция позднее использовалась в проекте Радиоастрон [7] для создания 10-метровой антенны космического телескопа, работавшего в сантиметровом диапазоне спектра.

Классическая конструкция лепесткового зеркала и ее недостатки. Классическая конструкция лепесткового зеркала представляет собой трансформируемую структуру, которая включает в себя центральное зеркало и набор лепестков. У основания каждого лепестка расположен цилиндрический шарнир, связывающий лепесток с центральным зеркалом. В транспортном положении лепестки находятся в вертикальном положении над центральным зеркалом. Раскрытие осуществляется синхронным вращением лепестков вокруг осей цилиндрических шарниров.

Классическая конструкция обладает, однако, двумя существенными недостатками. Во-первых, в рабочем состоянии длинные лепестки консольно закреплены на центральном зеркале. Во-вторых, цилиндрические шарниры и исполнительные механизмы находятся у основания длинных лепестков, и малые ошибки в установке осей шарниров и в работе исполнительных механизмов приводят к значительным отклонениям положения внешней кромки лепестка от расчет-

ного состояния. Требования к точности положения точек на внешней кромке очень высокие, при рабочей длине волны $\lambda = 1,35$ см вершины соседних лепестков необходимо совместить с точностью

$\Delta = \frac{\lambda}{16} = 0,084$ мм. Причем совмещение осуществляется без обратной связи.

В миллиметровом диапазоне спектра эта точность на порядок выше. При длине лепестков 3,5–5 метров возникает технически сложная задача. По этой причине КИП (коэффициент использования поверхности) антенны «Радиоастрона» на длине волны 1,35 см на орбите оказался равным 0,1 [1]. Это означает, что в коротковолновой области спектра 10-метровый рефлектор работал как точное 3-х метровое зеркало. Ранее нами были предложены [8; 9] технические решения, направленные на улучшение качества лепесткового зеркала в коротковолновой области спектра. Настоящая работа является продолжением этих исследований.

Новая конструкция лепесткового зеркала. Для того чтобы устранить названные недостатки предлагается изменить схему раскрытия зеркала – совместить левую вершину одного лепестка с верхней кромкой соседнего лепестка и осуществлять раскрытие синхронным перемещением вершин по кромкам (рис. 1, в; 3, а). Такой подход позволит обеспечить высокую точность совмещения вершин соседних лепестков в конечный момент раскрытия, а связи между лепестками по внешней контуре раскрытого зеркала повысят жесткость конструкции в рабочем состоянии.

Однако, прямо использовать эту идею не удастся – цилиндрические шарниры, связывающие лепестки с центральным зеркалом в классической схеме раскрытия, препятствуют требуемому взаимному перемещению лепестков. Для того чтобы такое перемещение оказалось возможным, в конструкцию вводятся следующие изменения. Каждый лепесток связывается с центральным зеркалом кронштейном (рис. 1, *а*). Один конец кронштейна жестко закреплен на лепестке, второй – с помощью сферического шарнира соединен с центральным зеркалом. Сферические шарниры расположены на обратной стороне центрального зеркала (рис. 1, *б*). Кроме этого в точке соединения вершины одного лепестка и кромки соседнего лепестка также устанавливается сферический шарнир (рис. 1, *в*), который перемещается по кромке лепестка в процессе раскрытия. Для осуществления этого технического решения предлагается использовать малогабаритные исполнительные механизмы и разместить их в точках совмещения вершин и кромок соседних лепестков.

В каждый момент раскрытия конструкция трансформируемого зеркала должна оставаться

- а) геометрически неизменяемой;
- б) ненапряженной (статически определимой).

Легко проверить, что необходимое условие геометрической неизменяемости и статической определимости в конструкции выполнено. Действительно, с одной стороны, каждый лепесток, связанный с центральным зеркалом сферическим шарниром, обладает относительно центрального зеркала тремя степенями свободы.

С другой стороны, каждый сферический шарнир, связывающий соседние лепестки вносит в конструкцию три кинематических ограничения. Таким образом, общее количество степеней свободы равно количеству кинематических ограничений и необходимое условие статической определимости и геометрической неизменяемости в каждый момент раскрытия в конструкции выполнено.

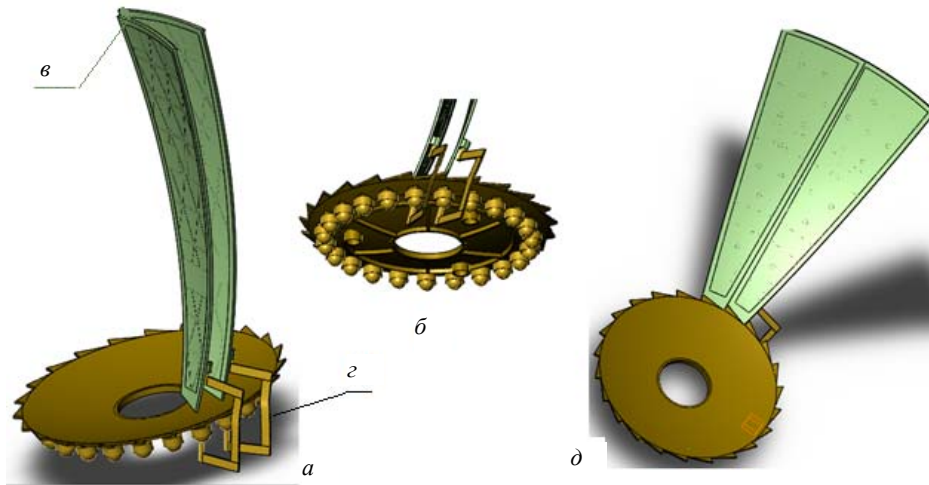


Рис. 1. Новая конструкция лепесткового зеркала. Центральное зеркало, лепестки, кронштейны и сферические шарниры:

а – лепестки в транспортном положении; *б* – сферические шарниры на обратной стороне центрального зеркала; *в* – сферический шарнир, связывающий вершину одного лепестка с кромкой соседнего лепестка; *з* – кронштейн, связывающий лепесток с центральным зеркалом, кронштейн жестко связан с лепестком; *д* – лепестки в рабочем (раскрытом) состоянии

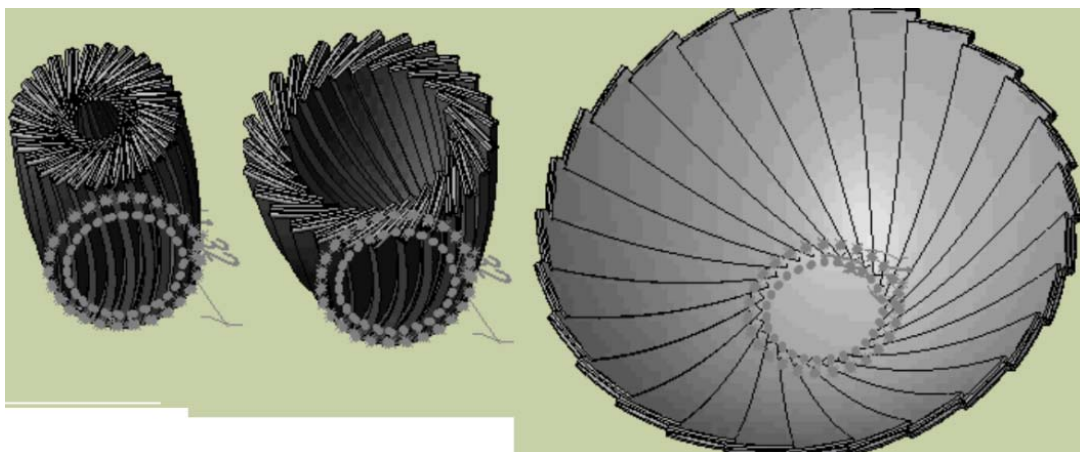


Рис. 2. Компьютерное моделирование раскрытия лепесткового зеркала

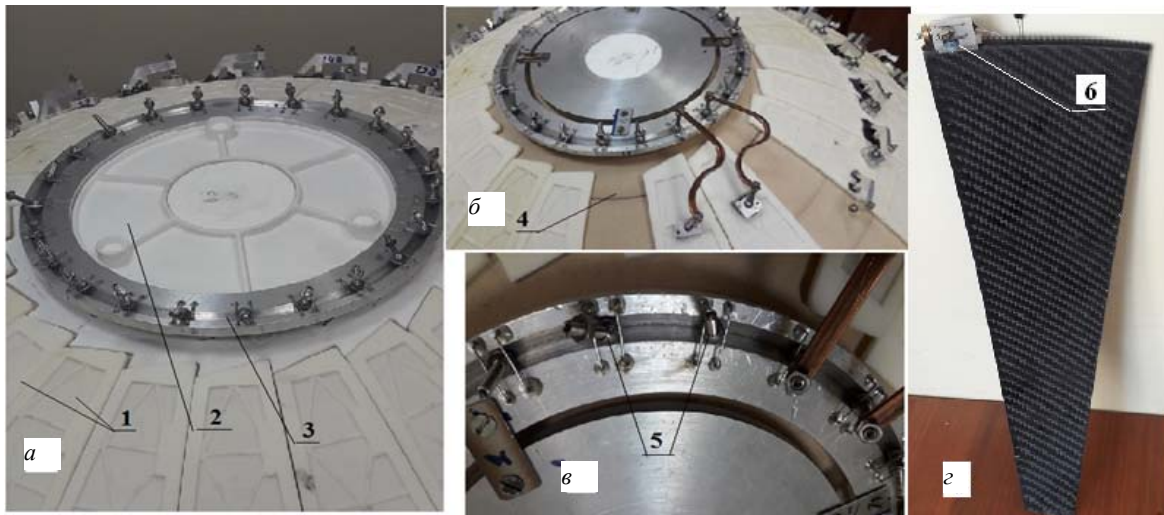


Рис. 3. Сборка составного зеркала на шаблоне:

а – лепестки (1), центральное зеркало (2), блок сферических шарниров центрального зеркала (3) на параболическом шаблоне (4); *б* – связи, соединяющие лепестки и центральное зеркало на шаблоне (4); *в* – сферические шарниры (5) на обратной стороне центрального зеркала; *г* – углепластиковый лепесток макета, (б) – линейный исполнительный механизм и сферический шарнир на кромке лепестка

Для проверки выполнения достаточного условия геометрической неизменяемости конструкции строится математическую модель, описывающую кинематику раскрытия, находится матрица совместности деформаций конструкции и показывается, что в каждый момент раскрытия определитель матрицы совместности деформаций отличен от нуля (достаточное условие геометрической неизменяемости). Тем самым доказывается возможность ненапряженного раскрытия новой конструкции трансформируемого зеркала.

Компьютерное и физическое моделирование новой системы раскрытия. Для проверки предложенного технического решения в пакете Solid Works была построена компьютерная модель новой конструкции трансформируемого зеркала. Моделирование подтвердило возможность ненапряженного раскрытия составного рефлектора. Фрагменты моделирования представлены на рис. 2.

Предварительные результаты физического моделирования представлены на рис. 3.

Физическая модель включает в себя центральное зеркало, набор лепестков, блок сферических шарниров, размещаемых на обратной стороне центрального зеркала (рис. 3, *а, б*), набор малогабаритных исполнительных механизмов, используемых для раскрытия зеркала (рис. 3, *г*).

Сферические шарниры центрального зеркала используются для присоединения лепестков к центральному зеркалу (рис. 3, *в*).

Физическое моделирование осуществляется в два этапа. Вначале лепестки и центральное зеркало размещаются на параболическом шаблоне (рис. 3, *а, б*). На обратной стороне центрального зеркала закрепляется блок сферических шарниров, и осуществляется точное вклеивание элементов, соединяющих лепестки и центральное зеркало. Затем, собранное на шаблоне раскрытое зеркало разбирается и вновь собирается в

транспортном состоянии. После этого проводится отладка системы раскрытия.

Заключение. Рассмотрены новая конструкция и новая схема раскрытия точного лепесткового зеркала. Предложенные технические решения позволят разработать зеркала, эффективно работающие в коротковолновой области спектра.

Библиографические ссылки

1. «РадиоАстрон» – телескоп размером 300000 км / Н. С. Кардашев и др. // *Астрономический журнал*. 2013. № 90 (3). С. 179–222.
2. Сайт [Электронный ресурс]. URL: <http://www.asc.rssi.ru/millimetron> (дата обращения: 12.05.2020).
3. Space very long baseline interferometry in China / Tao An et al. // *Advances in Space Research*. 2020. Vol. 65(2). P. 850–855.
4. Design and deploying study of a new petal-type deployable solid surface antenna / He Huang et al. // *Acta Astronautica*. 2018. № 148. P. 99–110.
5. Dornier FIRST Technology study. Multisurface control mechanism for a deployable antenna. Final report. RP-FA-D003. 1987.
6. Patent 4.899,167. Westphal M. United States, 1990.
7. Сайт [Электронный ресурс]. URL: <http://www.asc.rssi.ru/radioastron> (дата обращения: 12.05.2020).
8. Bujakas V. I. Computer and Physical Simulation of Space Mirror Deployment // *Multibody Mechatronic Systems, Proceedings of the MUSME Conference*. 2014. P. 69–74.
9. Буякас В. И. Кинематические связи для сборки и раскрытия составных космических зеркал и аналогии из классической оптики // *Журн. техн. физ.* 2018. № 88(11). P. 1698–1707.

References

1. "RadioAstron"-A telescope with a size of 300 000 km / N. S. Kardashev et al. // *Astronomy Reports*. 2013. № 57(3). P. 153–194.
2. Sayt [Electronic resource]. URL: <http://www.asc.rssi.ru/millimetron> (access: 12.05.2020).
3. Space very long baseline interferometry in China / Tao An et al. // *Advances in Space Research*. 2020. Vol. 65(2). P. 850–855.
4. Design and deploying study of a new petal-type deployable solid surface antenna / He Huang et al. // *Acta Astronautica*. 2018. № 148. P. 99–110.
5. Dornier FIRST Technology study. Multisurface control mechanism for a deployable antenna. Final report. RP-FA-D003. 1987.
6. Patent 4.899,167. Westphal M. United States, 1990.
7. Sayt [Electronic resource]. URL: <http://www.asc.rssi.ru/radioastron> (access: 12.05.2020).
8. Bujakas V. I. Computer and Physical Simulation of Space Mirror Deployment // *Multibody Mechatronic Systems, Proceedings of the MUSME Conference*. 2014. P. 69–74.
9. Bujakas V. I. Kinematic Couplings for Assemblage and Deployment of Multi-Mirror Space Reflectors and Analogies from the Classical Optics // *Technical Physics*. 2018. № 63 (11). P. 1646–1655.

© Бужакс В. И., Глотов М. Д., 2020

УДК 629.76/78.001.63

ОБОДНОЙ ДВУХКОЛЬЦЕВОЙ РЕФЛЕКТОР ДИАМЕТРОМ 22 М

А. И. Величко, Ю. А. Кисанов, В. И. Церихов, И. В. Матросова

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

Рассмотрена конструкция ободного рефлектора с каркасом, состоящим из стоек и двух колец, что увеличивает жёсткость рефлектора и снижает нагрузки на силовые элементы. Предлагаются варианты схем управления.

Ключевые слова: крупногабаритный космический рефлектор, кольцевой силовой складывающийся обод, опорные стойки, пружинный привод развёртывания, приводы управления развёртыванием.

TWO-RING HOOP REFLECTOR WITH A DIAMETER 22 M

A. I. Velichko, Yu. A. Kisanov, V. I. Tserikhov, I. V. Matrosova

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

Presented subsequent optimization of the design of the netting the rimmed reflector is considered due to the introduction of a second ring into the power frame, which increases the rigidity of the reflector and reduces the load on the power elements. Options for control schemes are offered.

Keywords: large-sized space reflector, circular power folding rim, increased stiffness struts, deploying spring gearing, the actuators control deployment.

В предлагаемом рефлекторе используется двухкольцевая схема каркаса, в которой концы стоек соединены гибкими связями (рис. 1), что снижает нагрузки на узловыe элементы по сравнению с однокольцевой схемой и увеличивает жёсткость каркаса и рефлектора в целом.

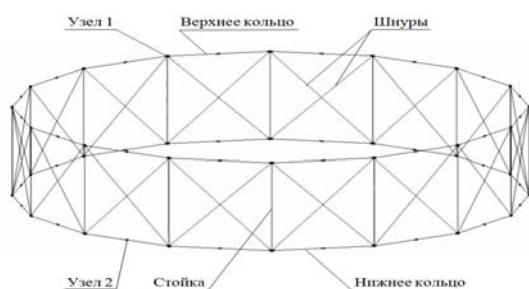


Рис. 1. Двухкольцевая схема каркаса рефлектора

Формообразующая структура (ФОС) крепится к концам стоек и состоит из шнуров и закреплённой на этой структуре сетчатой отражающей поверхности.

Анализ сил сопротивления для такого рефлектора показывает, что график изменения силы сопротивления, приведенной к концу стержня обода от угла наклона этого стержня, имеет типичную форму, показанную на рис. 2.

В графике учтены силы от сопротивления укладки ФОС, силы трения в механизмах, момент от выключенного двигателя привода управления, сила натяжения сетеполотна и шнуров.

Рис. 2. Сила сопротивления



Рис. 2. Сила сопротивления

На графике можно выделить две зоны:

От 90° (начало раскрытия) до 5° с плавно изменяющейся кривой (силы трения, начало натяжения сетеполотна).

От 5° до 0° (полное раскрытие) с резко изменяющейся кривой, соответствующей натяжению шнуров.

Оптимизация механизма раскрытия ободного космического рефлектора, как показано в [1], заключается:

а) в увеличении передаточного отношения по усилию от ползуна КПМ к стержню обода на участке от 5° до 3° за счёт введением в КПМ эксцентрика для связи ползуна и стержня,

б) введении дополнительных спиральных пружин в шарнирные узлы на концах стержней обода.

Кинематическая схема модифицированного привода с эксцентриковой осью и спиральными пружинами показана на рис. 3.

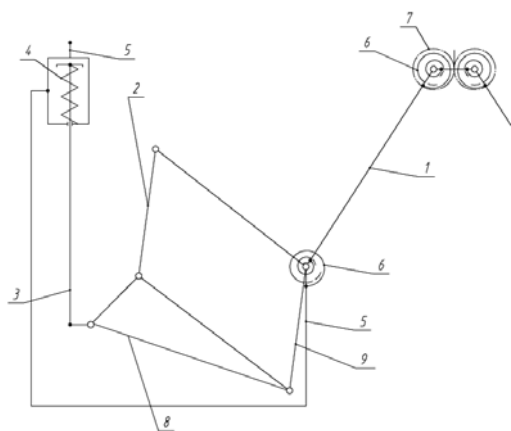


Рис. 3. Кинематическая схема КПМ с эксцентриковой осью и двумя пружинами:
1 – стержень обода; 2 – стержень; 3 – ползун; 4 – пружина;
5 – стойка с опорой; 6 – пружина спиральная; 7 – колесо зубчатое; 8 – эксцентриковая ось; 9 – стержень

Основным силовым элементом оптимизированного механизма раскрытия является пружина сжатия в узлах, расположенных около концов стоек, с оптимизированным кривошипно-ползунным механизмом (КПМ) и рычажно-стержневой механизм с спиральными пружинами на концах стержней. Контроль развёртывания в основном варианте осуществляется электромеханическим приводом с опоясывающей тросовой петлёй. Ранее аналогичные механизмы раскрытия рефлекторов были доложены на чтениях [1; 2].

В отличие от рефлекторов, разработанных и разрабатываемых в США и Европе с прямым приводом, в нашей концепции используется пружинный привод в сочетании с электромеханическим приводом, что обеспечивает более высокую надёжность раскрытия.

Оптимальное число граней многоугольника каркаса по критерию масса – габариты укладки составило 16. Характеристика требуемой пружины сжатия такого каркаса приведена на рис. 4.

Кроме основной системы управления развёртыванием с тросовой петлёй предлагаются для обсуждения другие варианты схем управления.

Предлагается также концепция оптимального привода.



Рис. 4. Требуемое усилие и характеристика пружины сжатия

Библиографические ссылки

1. Ободной крупногабаритный космический рефлектор / А. И. Величко, Ю. А. Кисанов, В. И. Церихов, И. В. Матросова // Решетневские чтения : материалы Междунар. науч.-практ. конф. ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2018.

2. Оптимизация механизма раскрытия ободного космического рефлектора / А. И. Величко, Ю. А. Кисанов, В. И. Церихов, И. В. Матросова // Решетневские чтения : материалы Междунар. науч.-практ. конф. ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2019.

References

1. Rimmed of Large-Sized Space Reflector / A. I. Velichko, Yu. A. Kisanov, V. I. Tserikhov, I. V. Matrosova // Reshetnevskie chteniya : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. ; Reshetnev University. Krasnoyarsk, 2018.

2. Optimization of the Deployment Mechanism of the Rimmed Space Reflector/ A. I. Velichko, Yu. A. Kisanov, V. I. Tserikhov, I. V. Matrosova// Reshetnevskie chteniya : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. ; Reshetnev University. Krasnoyarsk, 2019.

© Величко А. И., Кисанов Ю. А., Церихов В. И., Матросова И. В., 2020

УДК 62-238.9

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И МЕХАНИЗМА РАССТЫКОВКИ ОТРЫВНОГО СОЕДИНИТЕЛЯ

А. А. Герус¹, А. Д. Кузнецов¹, М. В. Волков¹, И. О. Надеин², У. И. Рыбина²¹Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Ленина, 52²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: Uthec_piroteh@mail.ru

Отрывной соединитель обеспечивает разрыв цепи. Конструкция механизма позволяет использовать его в космическом пространстве на протяжении всего срока эксплуатации.

Ключевые слова: отрывной соединитель, электрическая связь, разъединение, контакты, вакуум.

CONSTRUCTION AND DISCONNECTION MECHANISM DESCRIPTION OF TEAR-OFF CONNECTOR

A. A. Gerus¹, A. D. Kuznetsov¹, M. V. Volkov¹, I. O. Nadein², U. I. Rybina²¹Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: Uthec_piroteh@mail.ru

Tear-off connector breaks the circuit. Mechanism construction lets to use it in space throughout lifetime period.

Keywords: tear-off connector, electrical connection, disconnection, contacts, vacuum.

Отрывной соединитель (ОС) – устройство, предназначенное для обеспечения электрической связи между разделяемыми элементами конструкции и ее разделения. ОС обеспечивает прохождение максимальной силы тока для каждого контакта – 3 А, количество контактов – 62 штуки.

Применение стандартных электрических соединителей ограничивается тем, что электрическое соединение обеспечивается применением штыревых и цанговых контактов из материалов подверженных диффузионной сварке в условиях вакуума. Из-за возможности диффузионной сварки контактов и отсутствия данных об усилии, необходимом для расстыковки какого-либо из стандартных электрических соединителей после его пребывания в условиях космического вакуума, применение соединителей с контактами такого типа невозможно. Конструкция ОС обеспечивает запас по срабатыванию не менее 200 % для наихудшего случая. Она позволяет разъединять контакты после пребывания в условиях эксплуатации в течении не менее 5 лет при давлении от $1,33 \cdot 10^{-6}$ до $1,33 \cdot 10^{-8}$ Па и температурах от -100 °С до $+100$ °С.

ОС состоит из двух разделяемых частей А (рис. 1) и Б (рис. 2) и блоков контактов 1, установленных между ними. Пакет блоков контактов состоит из 8 уровней. Уровень имеет в своем составе две планки 2, блок контактов 1 и два слоя полиимидной пленки ПМ-А 30 ТУ6-19-121-85, предохраняющей контакты от замыкания после срабатывания. Часть А, в соответствии с рис. 1, состоит из блока планок из стеклотекстолита 2, на которых посредством паянного со-

единения закреплены контакты 1. Планки 2 жестко установлены между опорами 4 и подпружинены пружинами 5, которые в свою очередь установлены в корпусе 6. Ролики 7 и направляющие 8 жестко связаны с опорами 4.

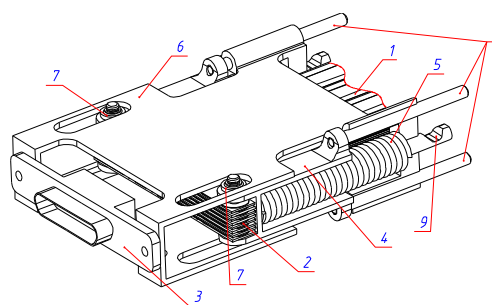


Рис. 1. Часть А ОС:

1 – контакты; 2 – планки; 3 – разъем; 4 – опора;
5 – пружина; 6 – корпус; 7 – ролик; 8 – направляющие
шток опоры; 9 – ось, удерживаемая качалкой

Часть Б, согласно рис. 2, состоит из блока планок из стеклотекстолита 2, на которых посредством паянного соединения закреплены контакты 1 и провода разъема типа micro-D (СП-397) 3. Планки 2 жестко установлены в корпусе 4. В корпусе 4 установлены два кулачка 5 соединенных осью 9, которые удерживаются от перемещения качалкой 6.

ОС во взведенном состоянии представлен на рис. 3, ОС в сработавшем состоянии на рис. 4. Срабатывание ОС происходит при перемещении тяги 1

в направлении Е, перемещаясь, тяга 1 отпускает качалку 2, тяга под действием пружины 3 перемещается в направлении Ж освобождает два кулачка поз. 13 соединенных осью 4. Кулачки и ось перемещаются в направлении И до освобождения штыря поз. 5 установленного в основании 6. Освобождаясь, штырь 5, ролики 7, направляющие 8 и блок контактов напаянных на пластины 9, закрепленные на основании 6, перемещаются под действием пружины 10 в направлении К. Ролики 7 и направляющие 8 перемещаются в корпусе 11 в соответствии с рис. 4.

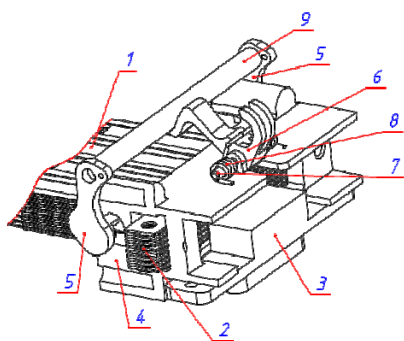


Рис. 2. Часть Б ОС:

1 – контакты; 2 – планки; 3 – разъем; 4 – корпус;
5 – кулачки; 6 – качалка; 7 – ось; 8 – пружина кручения; 9 – ось

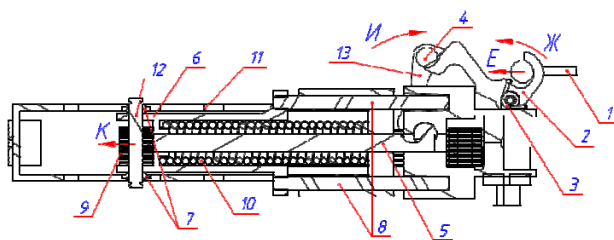


Рис. 3. ОС во взведенном состоянии:

1 – тяга; 2 – качалка; 3 – пружина; 4 – ось;
5 – штырь; 6 – основание; 7 – ролик; 8 – направляющие;
9 – планки; 10 – пружина; 11 – корпус; 12 – ось; 13 – кулачки

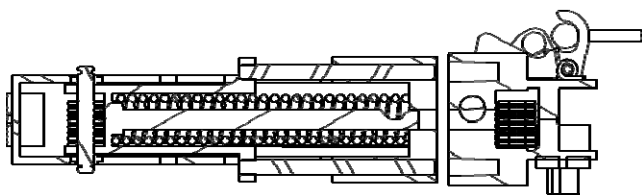


Рис. 4. СО в рабочем состоянии

Конструкция такого ОС исключает возможность диффузионной сварки контактов в условиях вакуума и обеспечивает разрыв механических и электрических связей после 5 лет эксплуатации в открытом космосе.

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. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 т. Т. 3. 8-е изд., перераб. и доп. / под ред. И. Н. Жестоковой. М. : Машиностроение, 2001. 859 с.
3. Пат. 112578 Российская Федерация, МКП Н 05 К 3/36. Соединение гибкого печатного кабеля / Полотов А. Г., Самойлов А. Н. № 2011131032/07 ; заявл. 25.07.2011 ; опубл. 10.01.2012. 3 с.
4. Пат. 41391 Российская Федерация, МКП Н 01 К 41/02. Устройство разрывной электрической связи / Яшуков В. В., Хабаров А. Д. №2004118551/22 ; заявл. 18.06.2004 ; опубл. 20.10.2004. 4 с.
5. Пат. 148877 Российская Федерация, МКП Н 01 К 13/00. Многоканальный электрический соединитель / Мустфин Т. М. №2014121837/07 ; заявл. 30.05.2014 ; опубл. 20.12.2014, 4 с.

References

1. Chebotarev V.E., Kosenko V.E., *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya: ucheb. Posobie* [Fundamentals of spacecraft design information support] / Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2011. 488 p.
2. Anuryev V. I. *Spravochnik konstruktor-mashinostroytelia* [Handbook of mechanical engineer] : v 3 t. T. 3. 8-e izd., pererab. i dop. / pod red. I. N. Zhestokovoi. M. : Mashinostroenie, 2001. 859 p.
3. Polutov A. G., Samoilov A. N. *Soedinenie gibkogo pechatnogo kabelya* [Connection flexible printed cable]. Patent RF, no. 112578, 2012.
4. Yashukov V. V., Habarov A. D. *Ustroistvo razryvnogo elektricheskoy syazi* [Disposable electrical communication device]. Patent RF, no. 41391, 2004.
5. Mustfin T. M. *Mnogokanalnyi elektricheskii kabel* [Multichannel electrical cable]. Patent RF, no. 148877, 2014.

© Герус А. А., Кузнецов А. Д., Волков М. В.,
Надеин И. О., Рыбина У. И., 2020

СОЗДАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

К. А. Гончаров^{1*}, О. С. Симонов¹, С. А. Новичкова¹,
А. К. Хмельницкий², Я. А. Хмельницкий²

¹ООО НПП «Тепловые Агрегаты и Системы»

Российская Федерация, 141407, Московская обл., г. Химки, ул. Бабакина, 5а, офис 702

²Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А. Г. Ромашина

Российская Федерация, 249031, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 15

*E-mail: tais@heatpipe.ru

В настоящей работе рассматривается новое конструктивно-технологическое решение создания панелей из углепластиков, которое базируется на новых материалах, новых технологиях получения и обработки композитов, новых конструкциях и новых методах проектирования, получившее название интегральных углепластиковых панелей. Разработка позволяет улучшить массогабаритные параметры силовых и корпусных конструкций КА, а также создавать изделия существенно дешевле и в более сжатые сроки.

Ключевые слова: интегральная углепластиковая конструкция, сотованель, солнечная батарея.

RESERCH @ DEVELOPMENT OF INTEGRAL CARBON FIBER STRUCTURES

K. A. Goncharov^{1*}, O. S. Simonov¹, S. A. Novichkova¹,
A. K. Khmelnsky², Y. A. Khmelnsky²

¹LLC NPP “Thermal Aggregates and Systems”

5a, office 702, Babakina Str., Moscow region, Khimki, 141407, Russian Federation

²Obninsk Research and Production Enterprise “Technology” named after A. G. Romashina

15, Kiev highway, Kaluga region, Obninsk, 249031, Russian Federation

*E-mail: tais@heatpipe.ru

In the paper, we consider a new constructive and technological solution for creating panels from carbon fiber reinforced plastics, which is based on new materials, new technologies for obtaining and processing composites, new structures and new design methods, which is called integral carbon fiber panels. The development makes it possible to improve the weight and size parameters of the spacecraft power and hull structures, as well as to create products much cheaper and in a shorter time frame.

Keywords: integral carbon fiber structures, honeycomb panel, solar battery.

Введение. Постоянный спрос на компоненты космических аппаратов (КА) с высокими удельными массовыми характеристиками требует непрерывного совершенствования конструкции и технологии, особенно в том случае, если становятся доступными новые материалы. Так, все более широкое применение углепластиков позволяет сегодня снижать массу КА, повышать прочность и жесткость конструкций. Хорошо известны и широко применяются такие типы углепластиковых конструкций, как конструкции, получаемые выкладкой, намоткой, прессованием, углепластиковые сотованели, изогридные углепластиковые конструкции.

В настоящей работе рассматривается одно из интересных и новых направлений создания панелей из углепластиков, которое базируется на новых материалах, новых технологиях получения и обработки композитов, новых конструкциях и новых методах проектирования. Результатом наших работ стало создание нового класса конструкций – интегральных углепластиковых панелей.

Созданию интегральных углепластиковых конструкций предшествовало существенное улучшение авторами технологии углепластиковых сотованелей. Сотованельные конструкции широко используются зарубежными и отечественными компаниями, в том числе РКК «Энергия», ВНИИЕМ и НПО Лавочкина. Сотованели, созданные авторами, имеют ряд новых конструктивно-технологических решений, позволяющих существенно повысить их прочность, качество, технологичность и снизить цикловое время их создания. Так, конструкции опорного узла и ряд других решений защищены патентами РФ на изобретение [1; 2].

Технология резки углепластиковой обшивки оказалась непростой задачей. Механические методы обработки дают неудовлетворительный результат, т. к. угольные волокна по краям обшивок создают большую проблему, осыпаясь и создавая большое количество электропроводной пыли, что недопустимо для элементов КА. После длительных поисков и экспериментов был разработан метод и создано оборудование для лазерной обработки углепластиковой об-

шивки, позволяющие осуществлять резку с высокой точностью и достаточной производительностью тонких углепластиковых листов [3].

Удельная масса одного квадратного метра углепластиковых сотопанелей составляет от 0,9 до 1,4 кг. Большая часть этой массы приходится на сотозаполнитель, который выполняет только одну функцию – передает сдвиговые напряжения на обшивки.

Что собой представляет интегральная углепластиковая конструкция? Идея заключается в том, чтобы отказаться от сотозаполнителя, который неэффективно используется в сочетании с вырезанными и облегченными обшивками. Вместо сот в интегральной конструкции используется промежуточный набор из углепластиковых ребер, которые создают оптимальную структуру с точки зрения прочности, благодаря чему достигается существенный выигрыш в весе. Толщина, шаг и направление ребер оптимизируются совместно с вырезами в обшивках (рис. 1).

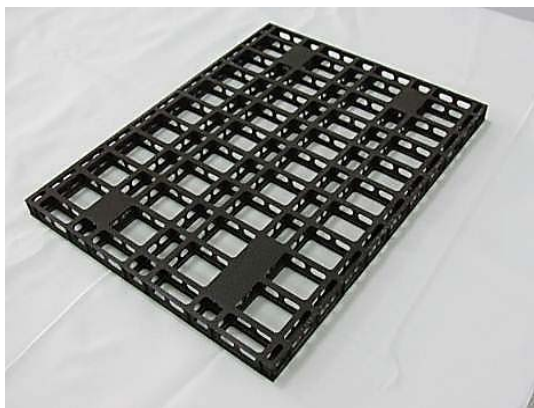


Рис. 1. Образец интегральной панели

В панелях интегральной конструкции, также как и в сотопанелях, могут быть предусмотрены закладные элементы, обеспечивающие установку кронштейнов, фитингов, узлов поворота, узлов зачехловки, упоров, а также отверстия и шахты для крепления и прокладки кабелей внутри панели. В зонах установки закладных элементов и кронштейнов для усиления могут устанавливаться соты, заполняемые терморасширяющимся или полимеризующимся компаундом.

Созданная конструкция позволяет использовать конструктивные решения, технологии и оборудование для производства сотопанелей. Возможность корректного математического моделирования интегральной углепластиковой конструкции, хорошая сходимость результатов испытаний с результатами расчетов делают конструкцию предсказуемой и надежной.

Удельная масса интегральных углепластиковых панелей составляет от 0,4 до 1,2 кг/м² в зависимости от прочностных требований и назначения панелей.

Разработка панелей БС на основе интегральной углепластиковой конструкции. Появление интегральных углепластиковых конструкций способно резко изменить подходы к проектированию не только механических устройств БС, но и подходы к проектированию БС и КА в целом. Удельный вес БС на основе сетеполотна превышает 5 кг/м². Струнный каркас

позволяет снизить удельную массу БС до 4 кг/м², что на 20–25 % легче каркасов с сетеполотном, но для них также требуется защита ФЭП с тыльной стороны от радиации. Удельная масса БС на основе углепластиковых сотопанелей составляет от 3,5 до 4,4 кг/м².

Обладая всеми преимуществами сотопанельной конструкции, интегральные углепластиковые панели обеспечивают меньшую массу и наиболее эффективный тепловой режим ФЭП, обеспечивают высокую технологичность и ремонтпригодность БС. Распределенная масса панелей является хорошей защитой тыльной стороны ФЭП от радиации и метеоритов. Внешняя поверхность панелей абсолютно свободна от элементов крепления, кронштейнов, механизмов фиксации, раскрытия, зачехловки и развязывающих диодов. Плотность заполнения площади панелей преобразователями превышает значение 0,95. Оригинальная технология крепления ФЭП позволяет осуществлять их легкий ремонт и замену. Удельная масса БС на основе трехкаскадных арсенид-галиевых преобразователей производства ПАО «Сатурн» составляет от 2,5 до 3,6 кг/м² при КПД 28–30 %.

Первым применением интегральных панелей стала БС для КА АИСТ-2Д (рис. 2). БС была разработана в период 2014–2015 гг. по заказу ЦСКБ Прогресс в рекордно сжатые сроки. КА АИСТ-2Д был успешно запущен первым пуском с космодрома «Восточный» в ноябре 2016 г. и успешно прошел ЛКИ. Замечаний к БС не было. Монтаж БС на корпус КА и ее ПСИ производились на космодроме «Восточный». При разработке БС был выполнен полный объем ОКР в соответствии с РК-11. В настоящий момент ведутся работы по подготовке данной БС к серийному производству.



Рис. 2. Панели БС интегральной конструкции КА «АИСТ-2Д»

Интегральная конструкция панелей обеспечивает равномерную защиту фотогенерирующей части от факторов воздействия космического пространства, что позволяет снизить массу тыльной защиты ФЭП от радиации или повысить их ресурс без увеличения массы.

Разработка панелей корпуса и силовых элементов на основе интегральной углепластиковой конструкции. Поверхность интегральных углепластиковых панелей может быть, как плоской, так и любой другой формы – цилиндрической, конической и лю-

бой другой, которую захочет создать конструктор. Их достоинства описаны в работах [5–7].

Такие конструкции могут стать серьезным конкурентом изогридным структурам. При этом они могут оказаться при равной прочности и массе существенно дешевле и создаваться в более краткие сроки.

Выводы. Результатом наших работ стало создание нового класса конструкций – интегральных углепластиковых панелей, которые стали одним из интересных и новых направлений создания панелей из углепластиков. Новое решение базируется на новых материалах, новых технологиях получения и обработки композитов, новых конструкциях и новых методах проектирования.

Создана технология лазерной резки углепластиков и создано оборудование для обработки крупногабаритных изделий с высокой точностью.

Регулярный сотовый наполнитель заменен на ребра из углепластика, которые по шагу и толщине оптимизированы с вырезами в обшивках панели.

Созданная конструкция позволяет использовать конструктивные решения, технологии и оборудование для производства сотовых панелей. Обладая всеми достоинствами сотовых панелей, интегральные конструкции позволяют снизить массу панелей до 0,4 кг/м².

Разработаны, испытаны и прошли ЛКИ БС на основе интегральных углепластиковых панелей и трехкаскадных арсенид-галиевых преобразователей. Их удельная масса может составлять до 2,5 кг/м² при КПД 28–30 %.

Интегральные углепластиковые панели дополняют известные типы углепластиковых конструкций, получаемых выкладкой, намоткой, прессованием, сотовыми и изогридными конструкциями.

Появление интегральных углепластиковых панелей может позволить в будущем существенно улучшить массогабаритные параметры силовых и корпусных конструкций КА, таких как несущие элементы корпуса, панели солнечных батарей, трансформируемые и крупногабаритные конструкции антенн и телескопов, а также создавать изделия существенно дешевле и более краткие сроки.

Библиографические ссылки

1. Пат. РФ на изобретение № 2291782. Опорный узел трехслойной панели / Хмельницкий А. К. ; приоритет от 01.08.2005, зарегистрирован 20.01.2007.
2. Пат. РФ на изобретение № 2559474. Трехслойная панель / Хмельницкий А. К., Гончаров К. А., Ширинина О. В., Наседкин Ю. В., Буш А. В. ; приоритет от 15.04.2013, зарегистрирован 14.07.2015.
3. Пат. РФ на изобретение № 2689346. Способ лазерной резки тонколистного углепластика / Наседкин Ю. В., Хмельницкий А. К., Гончаров К. А., Иванов А. В., Хмельницкий Я. А. ; приоритет от 01.10.2018, зарегистрирован 27.05.2019.
4. Патент РФ на изобретение № 2642487. Солнечная батарея / Битков В. А., Карагодин С. А., Саяпин

А. П., Хлопяникова Л. М. и др. ; приоритет от 25.07.2016, зарегистрирован 25.01.2018.

5. Особенности изготовления тепловых панелей систем терморегулирования космических аппаратов / А. К. Хмельницкий, Н. В. Выморков, Н. В. Мухин и др. // Ракетно-космическая техника: фундаментальные и прикладные проблемы : тезисы докладов 2-й междунар. науч. конф. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана ; МИИТ, 2004.

6. Повышение весовой эффективности систем терморегулирования космических аппаратов в результате применения новых материалов / А. К. Хмельницкий, Н. В. Выморков, О. В. Федорова, К. А. Гончаров // Теория и практика технологии производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов (ТПКММ). Корпоративные, нано- и CALS-технологии в наукоемких отраслях промышленности : труды докладов 4-й Московской Международ. конф. М. : Изд-во «Знание», 2006.

References

1. Khmel'nitsky A. K. [*Inserts of a three-layer panel*], RF patent for invention № 2291782, priority dated 01.08.2005, registered on 20.01.2007.
2. Khmel'nitsky A. K., Goncharov K. A., Shirina O. V., Nasedkin Yu. V., Bush A. V. [*Three-layer panel*], RF patent for invention № 2559474, priority from 15.04.2013, registered 14.07.2015.
3. Nasedkin Yu. V., Khmel'nitsky A. K., Goncharov K. A., Ivanov A. V., Khmel'nitsky Ya. A. [*Method for laser cutting of thin sheet CFRP*], RF Patent for invention № 2689346, priority dated 01.10.2018, registered on 27.05.2019.
4. Bitkov V. A., Karagodin S. A., Sayapin A. P., Khlopyanikova L. M., Polyanskov Yu. N., Goncharov K. A., Khmel'nitsky A. K. [*Solar battery*], RF Patent for invention № 2642487, priority from 25.07.2016, registered 25.01.2018.
5. Khmel'nitsky A. K., Vymorkov N. V., Mukhin N. V., Fedorova O. V., Goncharov K. A. [*Features of the manufacture of thermal panels for thermal control systems of spacecraft*] // *Rocket and space technology: fundamental and applied problems: Abstracts of the 2nd international scientific conference*. Moscow MSTU im. N. E. Bauman. Ed. M. : MIIT, 2004.
6. Khmel'nitsky A. K., Vymorkov N. V., Fedorova O. V., Goncharov K. A. [*Increasing the weight efficiency of spacecraft thermal control systems as a result of the use of new materials // Theory and practice of technology for the production of products from composite materials and new metal alloys (TPKMM).*] *Corporate, nano- and CALS-technologies in high-tech industries: Proceedings of the 4th Moscow International Conf.* M. : Publishing house "Knowledge", 2006.

© Гончаров К. А., Симонов О. С., Новичкова С. А., Хмельницкий А. К., Хмельницкий Я. А., 2020

**ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ НАГРУЗОК
ПРИ ИМИТИРОВАНИИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ОТ СРАБАТЫВАНИЯ
ПИРОСРЕДСТВ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Д. В. Деришев, М. В. Пустобаев, А. В. Шматков, А. О. Грабилин

Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А. Г. Иосифьяна»
Российская Федерация, 107078, г. Москва, Хоромный тупик, 4, строение 1
E-mail: lab182@mcc.vniiem.ru

Работа посвящена особенностям реализации высокочастотных нагрузок при имитировании срабатывания пиросредств. Проведена оценка вероятностей полей разброса при воздействии порохового заряда.

Ключевые слова: ударные нагрузки, ударный спектр ускорений, моделирование срабатывания пиросредств, поле допуска.

**FEATURES OF HIGH FREQUENCY LOADS SIMULATION WHEN SIMULATING
TRANSIENT PYROSHOCK FROM THE ACTIVATION OF PYROTECHNIC DEVICES
OF TRANSFORMED STRUCTURES**

D. V. Derishev, M. V. Pustobaev, A. V. Shmatkov, A. O. Grabilin

¹Joint Company 'Research and Production Corporation
'Space Monitoring Systems, Information & Control and Electromechanical
Complexes' named after A. G. Iosifian'

²Russian Federation, 107078, Moscow, Khoromny tupik, 4/1
E-mail: lab182@mcc.vniiem.ru

The work is devoted to the features of implementing high-frequency loads when simulating the operation of pyrotechnic devices. The scattering fields probability estimation is made of a powder charge actuation.

Keywords: shock loads, shock response spectrum, simulation of pyrotechnic devices operation, tolerance field.

Введение. При выведении на орбиту космического аппарата (КА) его приборы подвергаются воздействию ударных нагрузок. Эти нагрузки возникают вследствие подрыва пиропатронов при отделении КА от промежуточных конструкций – адаптеров, а также при расчеховке замков трансформируемых конструкций. Для подтверждения стойкости бортовой аппаратуры (БА) КА к данным воздействиям проводят испытания на специальных стендах, имитирующих возникающие в реальных условиях динамические нагрузки от подрыва пиросредств.

Наиболее распространенным критерием корректного проведения такого рода испытаний являются соответствие полученного ударного спектра ускорений при стендовых испытаниях требованиям к БА с учетом установленного поля допуска [1; 2]

В работе рассмотрен метод воспроизведения ударных воздействий с помощью порохового заряда (монтажный пистолет), приведена оценка вероятностей полей разброса по трём взаимно-перпендикулярным осям при воздействии удара в одном заданном направлении. Обработка данных проводилась с использованием системы LMS SCADAS и ПО Siemens PLM Software LMS TEST.LAB [3].

Результаты анализа показали, что:

1) в области низких (до 1000 Гц) частот разброс значений амплитуды спектра в направлении удара существенно (в ~2 раза) превышает разброс в направлениях, перпендикулярных оси удара, при этом с ростом частоты разница уменьшается.

2) в области средних и высоких частот (от 1000 до 5000 Гц) разброс полей вероятностей для всех направлений примерно одинаков. При этом поля рассеяния уровней увеличиваются с ростом частоты по степенной зависимости.

На основании полей рассеяния уровней предложено поле допуска при проведении стендовых испытаний, которое соответствует принятой мировой практике [4; 5].

Проведенные исследования могут быть положены в основу отечественного стандарта, регламентирующего методику испытаний изделий на нестационарную вибрацию (ударные воздействия от срабатывания пиросредств).

Предполагается, что исследования процессов будут продолжены, при этом для получения более корректных результатов будет усовершенствована осна-

стка и минимизировано влияние человеческого фактора на результаты воздействия.

Библиографические ссылки

1. Моделирование режимов ударного нагружения на аппаратуру КА при срабатывании пиротехнических средств разделения / А. О. Грабилин, Б. И. Зубренков, М. В. Пустобаев [и др.] // Тр. ВНИИЭМ. 2014. № 138(1). С. 35–42.
2. ГОСТ Р 53190–2008 (МЭК 60068-81:2003). Испытания на удар с воспроизведением ударного спектра. М., 2008.
3. ГОСТ РВ 20.57.305–98 КСКК. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы испытаний на воздействие механических факторов. М., 1998.
4. Bateman V. I., Davie N. T. Pyroshock Testing // Shock and Vibration Handbook (A. G. Piersol, T. L. Paez, Ed.). 6th ed. New York, NY : McGrawHill, 2010. Chapter 28.
5. NASA-STD-7003A. Pyroshock test criteria. Washington, DC 20546-0001, 2011.

References

1. Modelirovanie rezhimov udarnogo nagruzheniya na apparaturu KA pri srabatyvanii pirotekhnicheskikh sredstv razdeleniya [Space Equipment Pyroshock Modeling caused by Separation Systems Operation] / A. O. Grabilin, B. I. Zubrenkov, M. V. Pustobaev [et al.] // Tr. VNIIEEM. 2014. № 138(1). P. 35–42 (In Russ.).
2. GOST R 53190–2008 (IEC 60068–81:2003). Ispytaniya na udar s vosproizvedeniyem udarnogo spektra (Russian national standard). M., 2008.
3. GOST RV 20.57.305–98 KSKK. Apparatura, pribory, ustroystva i oborudovaniye voyennogo naznacheniya. Metody ispytaniy na vozdeystviye mekhanicheskikh faktorov. M., 1998.
4. Bateman V. I., Davie N. T. Pyroshock Testing // Shock and Vibration Handbook (A. G. Piersol, T. L. Paez, Ed.). 6th ed. New York, NY : McGrawHill, 2010. Chapter 28.
5. NASA-STD-7003A. Pyroshock test criteria. Washington, DC 20546-0001, 2011.

© Деришев Д. В., Пустобаев М. В., Шматков А. В., Грабилин А. О., 2020

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИЛОВОГО ПРИВОДА ДЛЯ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

В. Н. Зимин, Г. Н. Кувыркин, В. С. Зарубин, А. О. Шахвердов

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

Усложнение конструктивных схем перспективных трансформируемых крупногабаритных космических конструкций вследствие повышения их эксплуатационных функциональных возможностей приводит к необходимости разработки и создания все более сложных систем. Для обеспечения управляемого раскрытия трансформируемых конструкций предложено использовать приводы из материала с эффектом памяти формы. Экспериментальные исследования простейшего привода, изготовленного из никелида титана, подтвердили возможность его использования для раскрытия проектируемых перспективных трансформируемых космических конструкций.

Ключевые слова: трансформируемая космическая конструкция, раскрытие, привод, эффект памяти формы, экспериментальные исследования.

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL OF FORCE ACTUATOR FOR TRANSFORMABLE SPACE STRUCTURES

V. N. Zimin, G. N. Kuvyrkin, V. S. Zarubin, A. O. Shakhverdov

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

To improve the operational functionality of design schemes of promising transformable large space structures, it is necessary to develop and create more and more complex systems. To ensure a controlled deployment of transformable structures, it is proposed to use actuators made of material with a shape memory effect. Experimental investigations of the simplest actuator made of the titanium-nickel alloy confirmed the possibility to use it for the deployment of developing and promising transformable space structures.

Keywords: transformable space structure, deployment, actuator, shape memory effect, experimental investigations.

Одним из наиболее ответственных этапов при создании крупногабаритных космических конструкций является доставка на околоземную орбиту в упакованном виде и дальнейшее приведение их в рабочее состояние [1]. Процесс раскрытия представляется чрезвычайно ответственным и обеспечение его надежности связано с решением сложных задач механики конструкций, так как размеры систем в сложенном и рабочем состояниях могут отличаться в десятки раз [2]. Процедура раскрытия конструкции происходит под воздействием силовых приводов, в качестве которых можно использовать сжатые или растянутые пружины, электродвигатели и т. д. Несмотря на достигнутые значительные успехи в области проектирования трансформируемых крупногабаритных космических конструкций, важной остается задача обеспечения плавного и надежного раскрытия таких систем, состоящих из десятков, сотен и даже тысяч взаимосвязанных между собой элементов, при гарантированном обеспечении их последующего функционирования [3].

Наиболее простой, но в тоже время достаточно хорошо учитывающей особенности трансформируемых

конструкций расчетной схемой, является система абсолютно твердых тел, связанных между собой шарнирными узлами.

Уравнения движения следует представить в наиболее общем виде

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right)^T - \left(\frac{\partial T}{\partial q_k} \right)^T + \left(\frac{\partial \Phi_i}{\partial q_k} \right)^T \lambda_i = Q_k, \quad k = \overline{1, K}, \quad (1)$$

совместно с уравнениями связей, записанными в форме алгебраических соотношений

$$\Phi_i(q_k, t) = 0, \quad i = \overline{1, N}, \quad (2)$$

где K – число обобщенных координат; N – число связей; T – суммарная кинетическая энергия; Φ_i – уравнения связей; Q_k – обобщенные приложенные силы; λ_i – множитель Лагранжа (силы реакции в связях); $\dot{q}_k = dq_k / dt$, t – время; q_k – обобщенные координаты. Дифференцирование уравнений системы (1) сводится к системе дифференциальных уравнений второго порядка, численное интегрирование которых позволяет проводить расчет раскрытия трансформируемых космических конструкций.

В качестве силовых приводов, способных обеспечить раскрытие трансформируемых крупногабаритных космических конструкций, могут быть использованы материалы с эффектом памяти формы (ЭПФ) [4]. Материалы с ЭПФ обладают способностью к деформированию при низких температурах и к сохранению этих деформаций до тех пор, пока они не нагреты. Проволока из никелида титана (нитинол) – типичный пример использования материалов с ЭПФ в простейших силовых приводах [5]. Как правило, проволоку нагревают за счет прохождения через неё тока.

Для силовых элементов привода управляющим воздействием может быть только температурное поле. При этом наряду с задачей деформирования возникает необходимость решать задачу теплопроводности.

В качестве первого приближения можно принять, что изменение тепловой энергии простейшего привода из материала с ЭПФ при наземных испытаниях, равно количеству теплоты, поступившему за счет электрической энергии минус тепловые потери от естественной конвекции

$$cm \frac{dT}{dt} = RI^2 - \alpha S(T - T_c), \quad (3)$$

где c – удельная массовая теплоемкость; m – масса простейшего привода; T – температура привода; R – сопротивление материала привода; I – сила тока; α – коэффициент теплообмена; S – площадь поверхности теплообмена; T_c – температура окружающей среды.

Электрическое сопротивление силового элемента R определяется по формуле

$$R = \rho L / A,$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала силового элемента; A и L – соответственно площадь и длина силового элемента.

Если в некоторый момент времени, принимаемый за начальный ($t = 0$), температура T_0 привода отличается от значения равновесной температуры, то связь между t и текущим значением температуры $T(t)$ следует из решения (3) в виде

$$t = \frac{1}{S} \int_{T_0}^{T(t)} \frac{cmdT}{\left(\frac{RI}{S}\right)^2 - \alpha(T - T_c)}.$$

Найдем равновесную температуру из (3) при условии $\frac{dT}{dt} = 0$

$$\bar{T} = RI^2 / (\alpha S) + T_c.$$

Обозначим $\beta = cm / \alpha S$. Тогда уравнение (3) примет следующий вид

$$\beta \frac{dT}{dt} = \bar{T} - T. \quad (4)$$

При начальном условии $T = T_0$ ($t = 0$) решение уравнения (4) будет иметь вид

$$T(t) = \bar{T} - (\bar{T} - T_0) \exp(-t / \beta).$$

В ходе количественных и качественных исследований проволок с ЭПФ типа никелида титана выявлены некоторые характеристики, важные для их применения в качестве силовых приводов. Силовые приводы из материалов с ЭПФ, для управления деформациями которых используется изменение температуры, пригодны для весьма медленных (квазистатических) движений трансформируемых крупногабаритных космических конструкций. Они могут обеспечить «управляемое» плавное раскрытие таких систем, исключая динамические нагрузки ударного характера на конструктивные элементы при их установке на упоры или при срабатывании замковых устройств, фиксирующих раскрытое рабочее состояние системы.

Библиографические ссылки

1. Лопатин А.В., Рутковская М.А. Обзор конструкций современных трансформируемых космических антенн (Ч. 1) // Вестник СибГАУ. 2007. № 2. С. 51–57.
2. Hasanzade V., Sedighy S. H., Shahravi M. Compact Deployable Umbrella Antenna Design With Optimum Communication Properties // Journal of Spacecraft and Rockets, 2017. № 54(3). P. 782–788.
3. Механика больших космических конструкций / Н. В. Баничук, И. И. Карпов, Д. М. Климов и др. М. : Изд-во «Факториал», 1997. 302 с.
4. Truss mounting in space by shape memory alloys / V. A. Likhachev, A. I. Razov, A. G. Cherniavsky [et al.] // Proceedings of the First International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, California, USA, 1994. P. 245–248.
5. Schiedeck F., Hemsel T., Wallaschek J. The use of shape memory alloy wires in actuators // In Solid State Phenomena. Trans Tech Publications Ltd. 2006. Vol. 113. P. 195–198.

References

1. Lopatin A. V., Rutkovskaya M. A. (). The review of designs of modern transformed space antennas (P. 1) // Vestnik SibGAU. 2007. № 2. P. 51–57.
2. Hasanzade V., Sedighy S. H., Shahravi M. Compact Deployable Umbrella Antenna Design With Optimum Communication Properties // Journal of Spacecraft and Rockets, 2017. № 54(3). P. 782–788.
3. Mekhanika bol'shikh kosmicheskikh konstruktсий [Mechanics of large space structures] / N. V. Banichuk, I. I. Karpov, D. M. Klimov [et al.]. M. : Faktorial Publ., 1997. 302 p.
4. Truss mounting in space by shape memory alloys / V. A. Likhachev, A. I. Razov, A. G. Cherniavsky [et al.] // Proceedings of the First International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, California, USA, 1994. P. 245–248.
5. Schiedeck F., Hemsel T., Wallaschek J. The use of shape memory alloy wires in actuators // In Solid State Phenomena. Trans Tech Publications Ltd. 2006. Vol. 113. P. 195–198.

© Зимин В. Н., Кувыркин Г. Н., Зарубин В. С., Шахвердов А. О., 2020

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛОВОГО ПРИВОДА ДЛЯ РАСКРЫТИЯ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

В. Н. Зимин, А. В. Крылов, Г. Н. Кувыркин, Н. Г. Павлов, В. С. Филиппов

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

Особый класс крупногабаритных космических конструкций образуют так называемые трансформируемые системы, схема которых допускает автоматическое изменение конфигурации. Процедура раскрытия таких конструкций происходит под действием силовых приводов. Экспериментально-теоретические исследования простейшего привода из никелида титана подтвердили возможность его использования для раскрытия трансформируемых конструкций. Методика расчета силового привода базируется на математической модели его функционирования с учётом полученных экспериментальных данных.

Ключевые слова: трансформируемые космические конструкции, раскрытие, привод, методика, модель.

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATIONS OF FORCE ACTUATOR FOR DEPLOYMENT OF TRANSFORMABLE LARGE SPACE STRUCTURES

V. N. Zimin, A. V. Krylov, G. N. Kuvyrkin, N. G. Pavlov, V. S. Filippov

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

A special class of large space structures consists of so-called transformable systems that scheme has the ability to change configuration automatically. Deployment of such structures is performed by force actuators. Experimental and theoretical investigations of the simplest actuator made of the titanium-nickel alloy confirmed the possibility of its application for the transformable structure deployment. Procedure of the force actuator calculations is based on the mathematical model of its operation and takes into account the obtained experimental data.

Keywords: transformable space structure, deployment, actuator, calculation procedure, model.

Трансформируемые крупногабаритные космические конструкции доставляют на околоземную орбиту в плотноупакованном транспортном состоянии [1]. При достижении рабочей орбиты осуществляется раскрытие конструкции или её трансформация [2, 3].

Существуют материалы, обладающие эффектом памяти формы (ЭПФ). Поэтому перспективным направлением прикладных исследований в области применения материалов с ЭПФ является создание на их основе силовых термомеханических приводов для трансформируемых крупногабаритных космических конструкций [4].

Общая деформация проволоки из материала с ЭПФ складывается из упругой, температурной и фазовой деформаций:

$$\varepsilon = \varepsilon^{(e)} + \varepsilon^{(T)} + \varepsilon^{(\Phi)},$$

где $\varepsilon^{(e)} = \sigma / E$ – упругая деформация; σ – напряжение в текущей точке поперечного сечения; E – модуль упругости; $\varepsilon^{(T)} = \alpha_T \Delta T$ – температурная деформация; α_T – коэффициент линейного (температурного) расширения; $\varepsilon^{(\Phi)}$ – фазовая деформация.

Для того чтобы использовать проволоку из сплава никелида титана в качестве силового элемента в приводах для раскрытия трансформируемых крупногабаритных конструкций необходимо определить его длину [5]. Длина проволоки определяется исходя из требуемой величины рабочего хода привода по величине восстанавливаемой (фазовой) деформации:

$$L = \frac{\Delta l}{\varepsilon^{(\Phi)}},$$

где Δl – требуемое перемещение силового элемента привода.

Для силовых элементов привода управляющим воздействием может быть только температурное поле. При этом наряду с задачей деформирования возникает необходимость решать задачу теплопроводности.

В качестве первого приближения можно принять, что изменение тепловой энергии простейшего привода из сплава с ЭПФ равно теплу, поступившему за счет электрической энергии минус тепловые потери от излучения на орбите

$$cm \frac{dT}{dt} = RI^2 - \varepsilon \sigma_0 T^4 S, \quad (1)$$

где c – удельная массовая теплоемкость; m – масса простейшего привода; T – температура привода; t – время; R – сопротивление материала привода; I – сила тока; ε – относительный коэффициент лучеиспускания (степень черноты); σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана; S – площадь излучаемой поверхности.

Если в некоторый момент времени, принимаемый за начальный ($t = 0$), температура T_0 привода отличается от значения равновесной температуры, то связь между t и текущим значением температуры $T(t)$ следует из решения (1) в виде

$$t = \frac{1}{S} \int_{T_0}^{T(t)} \frac{cmdT}{\left(\frac{RI^2}{S}\right) - \varepsilon\sigma_0 T^4}. \quad (2)$$

Принимая, что $dT/dt = 0$, определим равновесную температуру

$$\bar{T}_1 = \sqrt[4]{\frac{RI^2}{\varepsilon\sigma_0 S}}. \quad (3)$$

Для равновесной температуры

$$RI^2 - \varepsilon\sigma_0 \bar{T}_1^4 S = 0.$$

Тогда

$$cm \frac{dT}{dt} = \varepsilon\sigma_0 S (\bar{T}_1^4 - T^4).$$

Обозначим $\beta_1 = \frac{cm}{\varepsilon\sigma_0 S}$, и уравнение примет следующий вид

$$\beta_1 \frac{dT}{dt} = \bar{T}_1^4 - T^4.$$

Начальное условие $T = T_0$ ($t = 0$).

В процессе предварительных испытаний проводочные активные элементы подвергались различным видам температурной обработки. Термообработка проводилась с целью устранения возможных внутренних напряжений проводочных активных элементов. Длина активных проводочных элементов составляла 190...250 мм. Затем они растягивались до относительного удлинения порядка 8...10 % и в этом состоянии фиксировались. После снятия фиксации длина активных проводочных элементов уменьшалась на 2...5 мм. При пропускании электрического тока силой 6...10 А по проводочным элементам они нагревались до температуры 125...170 °С, при которой восстанавливали свою первоначальную форму (длину), при этом в элементах развивалось продольное усилие порядка 1000...1200 Н.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили получить инженерную мето-

дику для проектирования простейшего силового привода, предназначенного для приведения трансформируемой крупногабаритной космической конструкции из транспортного положения в рабочее состояние на орбите.

Библиографические ссылки

1. Лопатин А. В., Рутковская М. А. Обзор конструкций современных трансформируемых космических антенн (Ч. 1) // Вестник СибГАУ. 2007. № 2. С. 51–57.
2. Hasanzade V., Sedighy S. H., Shahravi, M. Compact Deployable Umbrella Antenna Design With Optimum Communication Properties // Journal of Spacecraft and Rockets. 2017. № 54(3). P. 782–788.
3. Механика больших космических конструкций / Н. В. Баничук, И. И. Карпов, Д. М. Климов и др. М.: Изд-во «Факториал», 1997. 302 с.
4. Truss mounting in space by shape memory alloys / V. A. Likhachev, A. I. Razov, A. G. Cherniavsky et al. // In Proceedings of the First International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies. California, USA, 1994. P. 245–248.
5. Schiedeck F., Hemsel T., Wallaschek J. The use of shape memory alloy wires in actuators. In Solid State Phenomena 2006. Vol. 113. P. 195–198. Trans Tech Publications Ltd.

References

1. Lopatin A. V., Rutkovskaya M. A. (). The review of designs of modern transformed space antennas (P. 1) // Vestnik SibGAU. 2007. № 2. P. 51–57.
2. Hasanzade V., Sedighy S. H., Shahravi, M. Compact Deployable Umbrella Antenna Design With Optimum Communication Properties // Journal of Spacecraft and Rockets. 2017. № 54(3). P. 782–788.
3. Mekhanika bol'shikh kosmicheskikh konstruktсий [Mechanics of large space structures] / N. V. Banichuk, I. I. Karpov, D. M. Klimov et al. M.: Faktorial Publ., 1997. 302 p.
4. Truss mounting in space by shape memory alloys / V. A. Likhachev, A. I. Razov, A. G. Cherniavsky et al. // In Proceedings of the First International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies. California, USA, 1994. P. 245–248.
5. Schiedeck F., Hemsel T., Wallaschek J. The use of shape memory alloy wires in actuators. In Solid State Phenomena 2006. Vol. 113. P. 195–198. Trans Tech Publications Ltd.

© Зимин В. Н., Крылов А. В., Кувыркин Г. Н., Павлов Н. Г., Филиппов В. С., 2020

АНАЛИЗ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА В ШАРНИРНЫХ УЗЛАХ МНОГОРАЗОВОГО РАСКРЫТИЯ-СКЛАДЫВАНИЯ

С. А. Зоммер, А. В. Иванов, А. П. Кравчуновский, С. И. Немчанинов, А. И. Адамович

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

Представлены результаты анализа формы зависимости величины крутящего момента от угла поворота в шарнирных узлах механических устройств батарей солнечных многоразового раскрытия-складывания.

Ключевые слова: шарнирный узел, батарея солнечная, космический аппарат.

ANALYSIS OF OF TORQUE VALUE IN THE MULTI-TIME DEPLOYMENT-FOLDING HINGE

A. S. Zommer, A. V. Ivanov, A. P. Kravchunovsky, S. I. Nemchaninov, A. I. Adamovich

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

The article presents the results of the analysis of the shape of the dependence of the magnitude of the torque in the hinge nodes of the mechanical devices of solar batteries of multiple deployment and folding of solar array.

Keywords: hinge joint, solar panel, spacecraft.

Шарнирные узлы (ШУ) многоразового раскрытия-складывания применяются в механических устройствах солнечных батарей перспективных космических аппаратов [1; 2]. Модель ШУ многоразового раскрытия-складывания приведена на рис. 1, а.

Процесс раскрытия-складывания ШУ включает в себя два этапа: этап преодоления крутящего момента сопротивления $M_{ш\upsilon}$, создаваемого под действием усилия F пружины при её сжатии до тех пор, пока трос не пересечет ось вращения ШУ, и этапа, когда под действием усилия F пружины создается крутящий момент $M_{ш\upsilon}$, который способствует повороту ШУ в крайнее положение с последующим удержанием его в этом положении [3]. На этапе преодоления $M_{ш\upsilon}$ кру-

тящий момент на ШУ передается от электромеханического привода (ЭМП), установленного в ШУ.

Механическую мощность ЭМП выбирают исходя из максимальной величины момента сопротивления $M_{ш\upsilon}$ в начале раскрытия или складывания, которую необходимо преодолеть в первый этап движения ШУ. Величина момента $M_{ш\upsilon}$ зависит от усилия пружинного привода и должна быть достаточной для того чтобы преодолевать все моменты сопротивления M_c в конце раскрытия или складывания для обеспечения полного перевода панелей в крайние положения.

Для анализа формы зависимости величины крутящего момента, возникающего в шарнирном узле многоразового раскрытия-складывания приведена условная схема раскрытия, показанная на рис. 1, б [4].

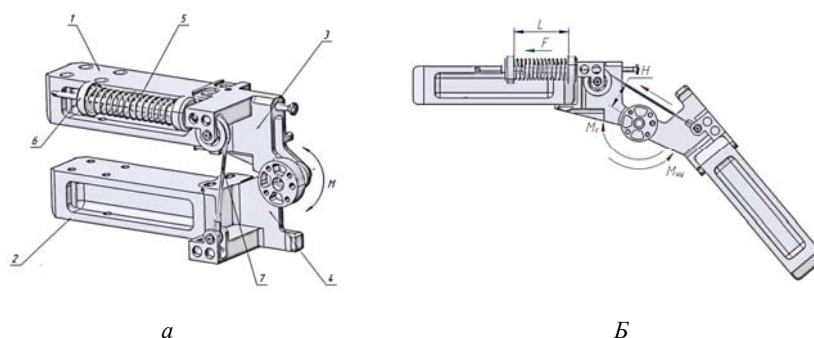


Рис. 1. Модель шарнирного МУ БС многоразового раскрытия-складывания (а): 1 – опорный элемент, относительно которого происходит раскрытие; 2 – раскрываемый элемент; 3 – упорный кронштейн шарнира; 4 – приводной кронштейн шарнира; 5 – пружинный привод; 6 – кронштейн закрепления троса на пружинном приводе; 7 – трос; силы и моменты, действующие в ШУ при раскрытии (б)

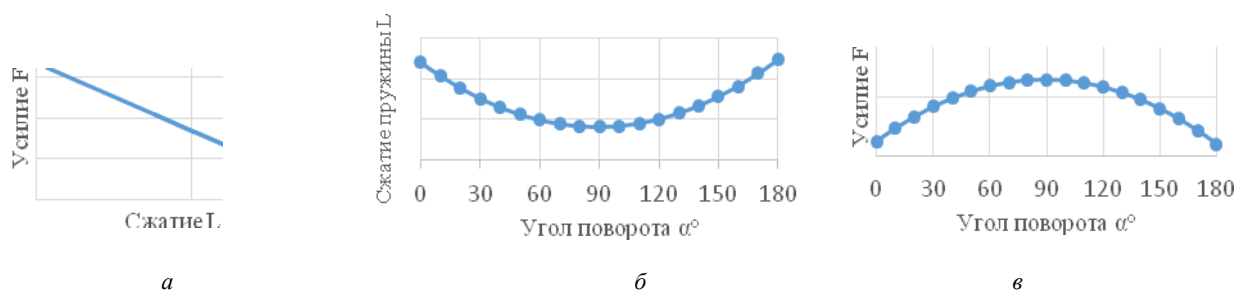


Рис. 2. Зависимость усилия пружины от её сжатия (а); зависимость величины сжатия пружины от угла поворота шарнира (б); зависимость величины усилия пружины от угла поворота шарнира (в)

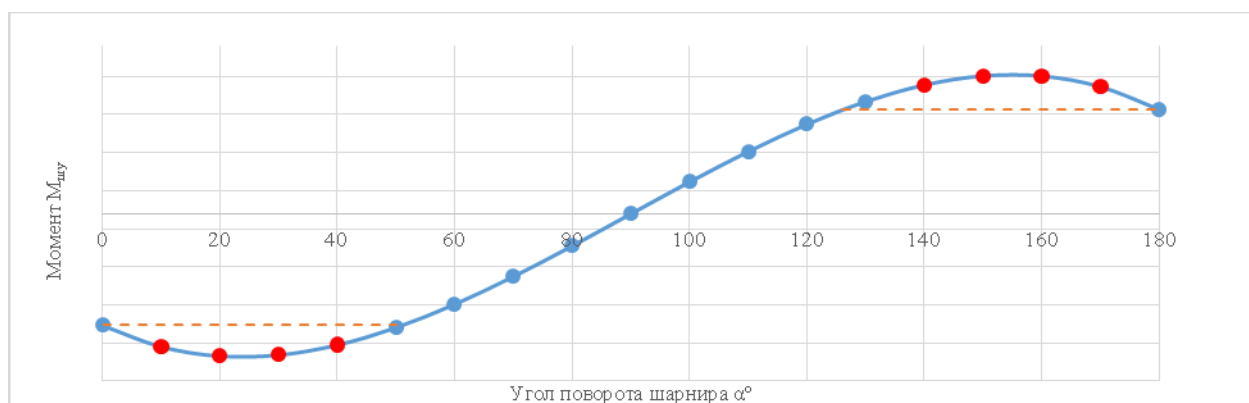


Рис. 3. Форма зависимости момента ШУ от угла поворота

Форма зависимости величины усилия пружины F от величины сжатия L во время поворота ШУ, определяется её жёсткостью и имеет общий вид, показанный на графике (рис. 2, а).

Зависимость значения $M_{шyu}$ от угла поворота α шарнира определяется как произведение усилия пружины F и плеча H .

Величина сжатия L зависит от угла поворота и геометрических характеристик ШУ. В общем виде форма зависимости сжатия пружины L от угла поворота ШУ α для ШУ выбранной конструктивной схемы показана на рис. 2, б. Функция зависимости усилия спиральной пружины сжатия от угла поворота ШУ многоразового раскрытия-складывания $F(\alpha)$ будет иметь вид, показанный на рис. 2 в. Зависимость плеча H от угла поворота ШУ имеет линейный характер.

Исходя из полученных теоретических данных видно, что форма зависимости $M_{шyu}$ от угла поворота ШУ, показанная на рис. 3, имеет нелинейный характер и максимальные значения крутящего момента генерируются при повороте ШУ на угол 25° и 155° . Значения величины крутящего момента в выделенных зонах выше необходимых для преодоления моментов сопротивления и полного раскрытия ШУ и являются избыточными. Этот факт приводит к необходимости применения более мощного ЭМП и увеличению прочностных характеристик ШУ в следствии действия больших изгибающих моментов в процессе раскрытия.

Причинами возникновения зон увеличения значений величины $M_{шyu}$ являются непостоянность характеристики F пружины сжатия (рис. 2, а) и нелинейность зависимости величины сжатия L пружины от угла поворота ШУ (рис. 2, б), обусловленная особенностью конструкции ШУ. Для получения линейной зависимости крутящего момента от угла поворота с максимальными значениями в крайних положениях без изменения конструкции ШУ, необходимо использовать пружину с постоянным значением усилия во всем пределе деформации во время поворота ШУ.

В результате проведённого анализа теоретическим путем определены зоны возникновения избыточной величины крутящего момента и причины их возникновения.

Выявлено, что изменение формы зависимости крутящего момента к требуемой без изменения конструкции ШУ возможно путем применения пружин постоянного усилия вместо спиральных пружин сжатия.

Библиографические ссылки

1. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488с.
2. Немчанинов С. И. Механическое устройство многоразового раскрытия/складывания батареи солнечной // Решетневские чтения материалы Междунар. науч.-практ. конф. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2014. Ч. 1. С. 92–94.

3. Солнечная батарея космического аппарата: пат. 2619158 Рос. Федерация : МПК В64 G1 1/44 / Немчанинов С. И., Кузоро В. И., Парафейник В. И. ; заявитель и патентообладатель АО «Информационные спутниковые системы «имени академика М. Ф. Решетнева». № 2015134190 ; заявл. 13.08.2015 ; опубл. 12.05.2017, Бюл. № 14. 11 с.

4. Крылов А. В., Чурилин С. А. Моделирование раскрытия солнечных батарей различных конфигураций // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. № 1. С. 106–111.

5. Моделирование процесса раскрытия крупногабаритных солнечных батарей / С. В. Борзых, В. Н. Бакулин, Ю. Н. Щиблев [и др.] // Математическое моделирование. 2004. № 6. С. 88–92.

References

1. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya: ucheb. posobiye*. [Design basics of the communication spacecrafts] / Sib. gos. aerokosmich. un-t Krasnoyarsk, 2014. 488 p.

2. Nemchaninov S. I. [The mechanical facility of the reusable deploying-folding hinge assembly of solar panels] : *materialy XVIII Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XVIII Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2014. Vol. 1. P. 92–94 (In Russ.)

3. Solnechnaya batareya kosmicheskogo apparata: pat. 2619158 Ros. Federatsiya : МПК V64 G1 1/44 / Nemchaninov S. I., Kuzoro V. I., Parafeynik V. I. ; zayavi-tel' i patentoobladatel' АО «Informatsionnyye Sputnikovyye Sistemy «imeni akademika M. F. Reshetneva». № 2015134190 ; zayavl. 13.08.2015 ; opubl. 12.05.2017, Byul. № 14. 11 p. (In Russ.)

4. Krylov A. V., Churilin S. A. [Modeling of the deployment of the different types of solar panels] // *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana*. 2011. Vol. 1. P. 106–111.

5. Borzykh S. V., Bakulin V. N., Shchiblev Yu. N. [Modeling of the large solar panel deployment process] // *Matematicheskoye modelirovanie*. 2004. P. 88–92.

© Зоммер С. А., Иванов А. В., Кравчуновский А. П., Немчанинов С. И., Адамович А. И., 2020

УДК 629.78.064.56

ПРОГРАММА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА ПРУЖИН ПОСТОЯННОГО УСИЛИЯ

С. А. Зоммер, А. В. Иванов, А. П. Кравчуновский, С. И. Немчанинов, А. И. Адамович

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

Представлен алгоритм проектирования и расчета характеристик пружин постоянного усилия, применяемых в механических устройствах космических аппаратов. Разработана программа автоматизированного расчета, проведена верификация расчетных характеристик на соответствие экспериментально полученным данным.

Ключевые слова: шарнирный узел, пружина, космический аппарат, программа.

PROGRAM FOR CONSTANT FORCE SPRING AUTOMATED CALCULATING

S. A. Zommer, A. V. Ivanov, A. P. Kravchunovsky, S. I. Nemchaninov, A. I. Adamovich

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

The article presents an algorithm for the design and calculation of the characteristics of constant force springs used in mechanical devices of spacecraft. An automated calculation program has been developed, and the calculated characteristics have been verified for consistency with the experimentally obtained data.

Keywords: hinge joint, spring, spacecraft, code.

Пружины постоянного усилия применяются в шарнирных узлах (ШУ) трансформируемых конструкций космических аппаратов для линейного перемещения. Особенностью данного типа пружин является способность оказывать постоянное усилие, неизменное по величине в пределах рабочей деформации пружины [1].

С целью повышения эффективности существующих процедур анализа пружин постоянного усилия [2; 3] разработан усовершенствованный алгоритм расчета основных характеристик пружины.

Для осуществления расчета усилия пружины необходимо определить материал пружины и её основные геометрические характеристики (рис. 1). В настоящее время наиболее распространенным материалом из которого изготавливаются пружины данного типа является нержавеющая сталь «AISI 302» ГОСТ Р 58127–2018 (EN 10270-3-1.4310) [4].

Механические характеристики материала, необходимые для расчета: коэффициент Пуансона μ ; временное сопротивление на разрыв (предел прочности) σ_b (Па); модуль упругости E (Па); относительное сужение ψ .

Геометрические параметры пружины показаны на рис. 2 и включают в себя внутренний радиус R (мм), толщину пружины t (мм) и ширину пружины b (мм).

С целью увеличения эффективности процедуры расчета усилия требуемой пружины, необходимо учитывать количество циклов работы устройства,

так как исходя из зависимостей, описанных в ГОСТ 25.504–82 [5], видно, что в условиях малоциклового нагружения расчетный предел прочности может быть задан больше чем теоретический. Увеличение значения предела прочности влияет на максимально возможное значение толщины пружины, от которой зависит генерируемое ей усилие.

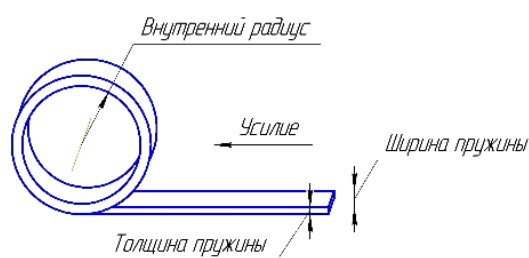
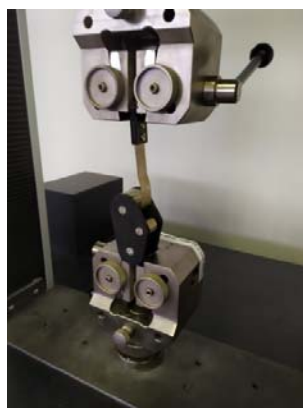


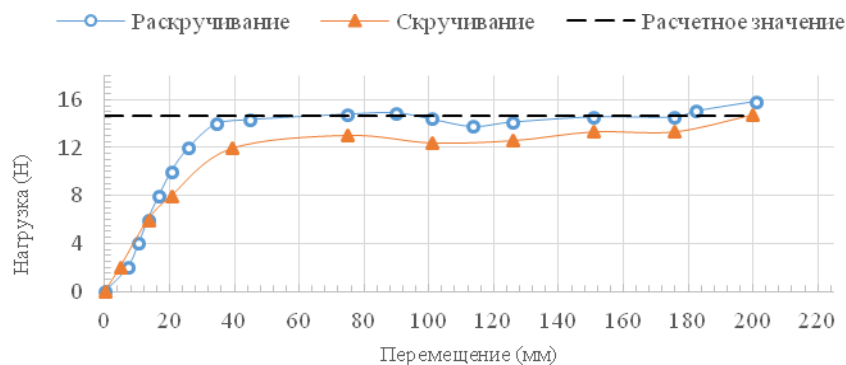
Рис. 1. Условное представление пружины постоянного усилия

Таким образом, после определения геометрических характеристик и выбора материала пружины необходимо определить количество циклов работы пружины N . Далее производится расчет уточненного значения предела прочности, согласно ГОСТ 25.504–82.

Для дальнейшего расчета необходимо определить максимально возможную толщину пружины, при которой она сможет нормально функционировать при выбранных геометрических характеристиках и условиях эксплуатации [2].



а



б

Рис. 2. Процесс измерения (а); результаты испытания пружины (б)

Параметры материала пружины	Геометрические параметры пружины	Толщина пружины	Параметры расчета
Коэффициент Пуассона: <input type="text" value="0.29"/>	Ширина пружины: <input type="text" value="16"/> мм	Максимальная: <input type="text" value="0.216"/> мм	Произвести расчет
Предел прочности: <input type="text" value="1860"/> МПа	Внутренний радиус: <input type="text" value="8"/> мм	Задаваемая: <input type="text" value="0.2"/> мм	
Модуль упругости: <input type="text" value="193000"/> МПа	Расчет максимальной толщины пружины		Усилие: <input type="text" value="14.73"/> Н
Число циклов: <input type="text" value="1000"/>			
Относительное сужение: <input type="text" value="0.5"/>			
Выход			

Рис. 3. Интерфейс программы

Определив максимальное значение толщины пружины, необходимо выбрать наиболее близкое значение толщины из имеющихся вариантов конфигураций пружин и произвести расчет усилия F , генерируемого пружиной [3].

Используя приведенный выше алгоритм расчета пружин постоянного усилия возможно вычислять необходимые геометрические параметры пружины при заданном требуемом усилии, решая задачу в обратном порядке.

С целью верификации предложенного алгоритма расчета пружин постоянного усилия был проведён сравнительный анализ на соответствие расчетных данных с действительно измеренными значениями усилия пружины, изготовленной из материала «AISI 302», радиусом 8 мм, шириной 16 мм, толщиной 0,2 мм. Расчетное значение усилия пружины такой конфигурации равняется 14,7 Н.

Измерение усилия пружин проводилось разрывной машиной «EUROTEST T-30» с использованием специально разработанной оснастки. Измерения проводились в течение 3-х циклов раскручивания-скручивания, усреднённые результаты представлены на рис. 2.

Для автоматизации процесса расчета пружин данного типа была разработана программа, в которую заложены алгоритмы расчета. Интерфейс программы представлен на рис. 3.

Как видно из полученных экспериментальных зависимостей усилия пружины от перемещения, расчетная величина усилия соответствует измеренной при растяжении (раскручивании) пружины. Величина усилия при сжатии (скручивании) пружины оказывается меньше расчетной по причине возникновения сил трения между слоями пружины и трением между барабаном и осью [2; 3].

Библиографические ссылки

1. Шатров А. К., Назаров Л. Н., Машуков А. В. Основы конструирования механических устройств космических аппаратов. Конструктивные решения, динамические характеристики : учебное пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2009. 144 с.
2. Advances in the Analysis and Design of Constant-Torque Springs // John R/McGuire and Joseph A. Yura.
3. McGuire J. Analysis and Design of Constant-Torque Springs Used in Aerospace applications. Ph.D.

Dissertation, The University of Texas at Austin, December, 1994.

4. ГОСТ Р 58127–2018. Проволока стальная для механических пружин : [введен в действие от 01.01.2019]. 20 с. (Национальный стандарт Российской Федерации).

5. ГОСТ 25.504–82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости : [введен в действие от 01.07.1983]. 100 с. (Международный стандарт).

References

1. Shatrov A. K. *Osnovy konstruirovaniya mekhanicheskikh ustroystv kosmicheskikh apparatov. Konstruktivnie resheniya, dinamicheskie kharakteristiki: ucheb. posobiye.* [Fundamental of spacecrafts mechanical apparatus designing. Structural concept, dynamics] / Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2009, 144p.

2. John R/McGuire, Joseph A. Yura. Advances in the Analysis and Design of Constant-Torque Springs.

3. McGuire J. Analysis and Design of Constant-Torque Springs Used in Aerospace applications. Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, December, 1994.

4. HOST R 58127–2018. *Provoloka stal'naya dlya mekhanicheskikh pruzhin* [Steel wire for mechanical springs]. from 1th January 2019. (In Russ.)

5. HOST 25.504–82. *Raschety i ispytaniya na prochnost`.* *Metody rascheta kharakteristik soprotivleniya ustalosti* [Strength calculations and tests. Methods used for fatigue resistance calculations]. from 1th July 1983. (In Russ.)

© Зоммер С. А., Иванов А. В., Кравчуновский А. П., Немчанинов С. И., Адамович А. И., 2020

УДК 52.08

КОНТРОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛА АНТЕННЫ КОСМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «МИЛЛИМЕТРОН» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

М. А. Иванов, В. В. Петров

ООО «Промгеодезия»

Российская Федерация, 199106, Санкт-Петербург, Большой проспект В. О., 84, литера А

E-mail: maxim.ivanov@promgeo.com

Рассмотрена зеркальная система антенны космической обсерватории «Миллиметронт». Исходя из высоких требований по точности, для контроля геометрии панелей антенны в термобарокамере планируется использовать интерферометрическую систему Etalon Absolute Multiline.

Ключевые слова: космическая обсерватория, разворачиваемая антенна, контроль геометрии.

MONITORING THE SURFACE OF THE MAIN MIRROR FOR THE SPACE OBSERVATORY MILLIMETRON USING AN INTERFEROMETRIC SYSTEM

M. A. Ivanov, V. V. Petrov

Industrial Geodesy LTD

84, letter A, Bolshoy prospect V. O., St. Petersburg, 199106, Russian Federation

E-mail: maxim.ivanov@promgeo.com

The report describes the mirror antenna system of the Millimetron space observatory. Based on the requirements for high accuracy, it is planned to use the Absolute Multiline interferometric system to control the geometry of the antenna panels in the thermal vacuum chamber.

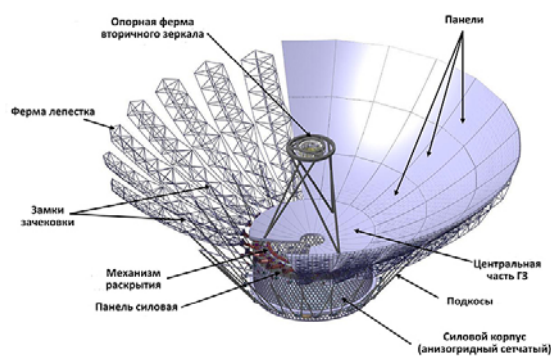
Keywords: space observatory, deployable antenna, geometry control.

Введение. Панели антенны космической обсерватории «Миллиметронт» представляют собой трехслойную конструкцию из рабочей обшивки параболической формы, тыльной обшивки, подкрепляющих ребер, а также механических и тепловых интерфейсов. Заявленная среднеквадратическая ошибка поверхности рефлектора равна 6 мкм. Для определения формы антенны с такими параметрами требуется использовать интерферометрические измерительные системы.

Антенна космической обсерватории «Миллиметронт». Антенна представляет собой 2-х зеркальную оптическую систему, построенную по схеме Кассегрена. Она состоит из главного параболического, и вторичного гиперболического зеркал. Диаметр главного зеркала составляет 10 метров, что слишком велико для существующих обтекателей ракетносителей, поэтому конструкция зеркала будет раскладывающейся. Оно состоит из не раскладываемой центральной части, диаметром 3 метра, и раскрываемой части, состоящей из 24 лепестков (см. рисунок) [1].

Целевая среднеквадратическая погрешность поверхности 10-метрового главного зеркала равна 6 мкм, а самих панелей еще выше – точность технологии изготовления панелей выше, чем 1 мкм [2].

Для испытаний панелей в термической камере и для определения малых смещений необходимо высокоточное оборудование, которое может работать как в условиях космоса, так и получать точности субмикронного уровня.



Антенна обсерватории «Миллиметронт»

Абсолютная дальномерная интерферометрическая система Etalon Absolute Multiline. Absolute Multiline является передовой технологией прецизионного измерения длин линий до 30 метров с погрешностью 0.5 мкм на метр. Система может поддерживать до 124 измерительных каналов, которые работают одновременно [3].

Система Absolute Multiline успешно используется в областях промышленности, где необходим высокоточный мониторинг и контроль геометрических параметров крупногабаритных структур [4].

Важной особенностью системы является возможность проведения измерений в вакууме, а также в условиях криогенных температур и радиации.

Применение системы Absolute Multiline к контролю поверхности панелей. Система Absolute Multiline выбрана в качестве измерительной для определения деформаций панелей антенны «Миллиметрон» в термобарокамере. Система способна измерять расстояния как на отражатель, так и на поверхность панели [5]. Учитывая возможность использования системы в условиях вакуума и криогенных температур, а также высокие точностные характеристики делают систему Absolute Multiline идеальным вариантом решения задачи контроля формы панели.

Библиографические ссылки

1. Миллиметрон : офиц. портал космической обсерватории [Электронный ресурс]. URL: <https://www.millimetron.ru/ru/osnovnyye-parametry/antenna> (дата обращения: 09.09.2020).
2. Wild W., Kardashev N. S., Babakin N. G. Millimetron – a large RussianEuropean submillimeter space observatory // *Experimental Astronomy*. 2009. Vol. 23, № 1. P. 221–244.
3. Официальный сайт компании Etalon [Электронный ресурс]. URL: <https://www.etalonproducts.com/en/products/absolute-multiline-technology/> (дата обращения: 09.09.2020)
4. Traceability of On-Machine Tool Measurement: A Review / U. Mutilba, E. Gomez-Acedo, G. Kortaberria et al. // *Sensors*. 2017. № 17. P. 1605.

5. Meter-class mirror figure metrology using a 24-channel fiber interferometer / R. Holzlöhner, S. Lévêque, N. Di Lieto et al. // *Proc. SPIE 10706, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation III*, 107061F. 10 July 2018.

References

1. The official portal of the space observatory "Millimetron" [Electronic resource]. URL: <https://www.millimetron.ru/ru/osnovnyye-parametry/antenna> (access: 09.09.2020).
2. Wild W., Kardashev N. S., Babakin N. G. Millimetron – a large RussianEuropean submillimeter space observatory // *Experimental Astronomy*. 2009. Vol. 23, № 1. P. 221–244.
3. Official site of the company Etalon [Electronic resource]. URL: <https://www.etalonproducts.com/en/products/absolute-multiline-technology/> (access: 09.09.2020).
4. Traceability of On-Machine Tool Measurement: A Review / U. Mutilba, E. Gomez-Acedo, G. Kortaberria et al. // *Sensors*. 2017. № 17. P. 1605.
5. Meter-class mirror figure metrology using a 24-channel fiber interferometer / R. Holzlöhner, S. Lévêque, N. Di Lieto et al. // *Proc. SPIE 10706, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation III*, 107061F. 10 July 2018.

© Иванов М. А., Петров В. В., 2020

УДК 528.74

ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ АНТЕНН

М. А. Иванов, В. В. Петров

ООО «Промгеодезия»

Российская Федерация, 199106, Санкт-Петербург, Большой проспект В. О., 84, литера А

E-mail: maxim.ivanov@promgeo.com

Описаны основные типы трансформируемых космических антенн. Рассмотрена технология фотограмметрических измерений применительно к рефлекторам с примерами. Проведен анализ измерений антенны ферменного типа двумя фотограмметрическими системами.

Ключевые слова: разворачиваемая антенна, контроль геометрии, фотограмметрия.

APPLICATION OF PHOTOGRAMMETRIC SYSTEMS FOR MEASURING ELEMENTS OF TRANSFORMABLE SPACE ANTENNAS

M. A. Ivanov, V. V. Petrov

Industrial Geodesy LTD

84, letter A, Bolshoy prospect V. O., St. Petersburg, 199106, Russian Federation

E-mail: maxim.ivanov@promgeo.com

The main types of transformable space antennas are described. The technology of photogrammetric measurements is considered as applied to reflectors with examples. The analysis of measurements of the truss-type antenna by two photogrammetric systems is carried out.

Keywords: deployable antenna, geometry control, photogrammetry.

Введение. К трансформируемым конструкциям предъявляют высокие требования по жесткости, надежности развертывания, минимальной массе и объему. Любая трансформируемая антенна проходит стадию наземной отработки, на которой проводится комплекс испытаний и исследований. Такие параметры как форма радиоотражающей поверхности и повторяемости раскрытия возможно определить фотограмметрическими методами как в статике, так и в динамике.

Геометрия космических трансформируемых рефлекторов антенн КА. По конструктивному оформлению космические антенны можно разделить на ферменные, вантовые, сборные, секторные, надувные и зонтичные [1]. Вне зависимости от вида антенны, общее для всех рефлекторов – это наличие радиоотражающего полотна и опорной конструкции.

Технология фотограмметрических измерений. Ближняя фотограмметрия объединяет фотограмметрические методы измерений и интерпретации изображений для определения геометрических характеристик и положения объектов от 0,5 м до 200 м по одному или нескольким фотоснимкам [2]. С ростом применения фотограмметрии в промышленной метрологии и системах контроля качества у нее появляются задачи в новых областях.

С появлением и внедрением цифровых камер и цифровой обработки изображений процедуры получения снимков на месте съемки и их обработки в камеральных условиях, традиционно разнесенные во

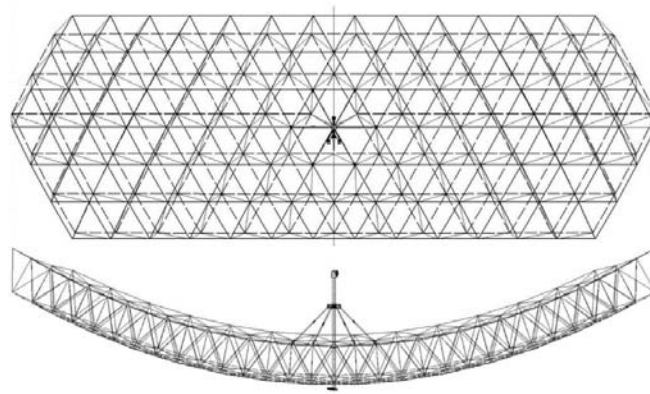
времени и пространстве, теперь могут быть объединены. Весь процесс измерений может быть выполнен на месте съемки.

Использование фотограмметрических систем широко используются в аэрокосмической промышленности при измерениях параболических антенн, зеркал телескопов, трансформируемых конструкций, а также при динамических испытаниях космических аппаратов и трансформируемых конструкций.

Применение фотограмметрических систем для космических рефлекторов. Спектр решаемых задач включает контроль размеров и формы при изменении температуры и настройку формы больших зеркал, анализ формы рефлекторов в вакуумной термической камере [3], определение геометрических характеристик космических аппаратов как в статике, так и в динамике.

Определение формы поверхности радиоотражающей поверхности и повторяемости раскрытия проведены на антенне ферменного типа, разработанной ОКБ МЭИ. При этом для статичных измерений применялась система AICON DPA Professional, для динамических измерений – AICON MoveInspect HF4.

Ферменные рефлекторы, разработанные ОКБ МЭИ, представляют собой сложный трансформируемый механизм с большим количеством элементов и связей. Основу фермы составляют складывающиеся тетраэдрические ячейки, состоящие из стержней и пружинно-шарнирных элементов [4] (см. рисунок).



Общий вид рефлектора ОКБ МЭИ

В узловых точках лицевой и тыльной сторон ферменного каркаса находятся шарнирные устройства (узловые шарниры). К узловым шарнирам присоединены стержни, образующие поверхность, имеющие возможность складывания (складывающиеся стержни), а также стержни, соединяющие лицевую и тыльную стороны ФК (диагональные стержни). Для испытаний панелей в термической камере и для определения малых смещений необходимо высокоточное оборудование, которое может работать как в условиях космоса, так и получать точности субмикронного уровня [5].

Одним из подходов к оценке повторяемости раскрытия может быть анализ базовых ячеек лицевой стороны рефлектора – сравнение длин складывающихся стержней в треугольниках между циклами и с номинальными величинами. Также возможно сравнить форму каркаса по точкам на узловых шарнирах путем вписывания геометрии по методу наименьших квадратов (МНК). Форма радиотражающей поверхности рефлектора оценивается путем вписывания в измеренные точки параболоида и сравнением СКО вписывания по МНК с теоретическими значениями.

Применение методов ближней фотограмметрии в испытаниях крупногабаритных трансформируемых конструкций различных типов является распространенной мировой практикой, что подтверждается большим количеством успешных испытаний и исследований.

На космической антенне ферменного типа ОКБ МЭИ отработана методика определения формы сетчатого полотна и повторяемости раскрытия, которая может применяться на антеннах любого типа.

Библиографические ссылки

1. Лопатин А. В., Рутковская М. А. Обзор конструкций современных трансформируемых космических антенн (ч. 1) // Вестник СибГАУ. 2007. № 2. С. 78–81.
2. Ближняя фотограмметрия и 3D-зрение : пер. с англ. / Т. Луманн, С. Робсон, С. Кайл, Я. Бом. М. : ЛЕНАНД, 2018. 704 с
3. Stegman, Matthew & Fedyk, Mike & Kuehn, Steven. Solar Thermal Vacuum testing of deployable mesh

reflector for model correlation // IEEE Aerospace Conference Proceedings. 10.1109/AERO.2010.5446961.

4. Моделирование динамики раскрытия ферменного каркаса трансформируемого рефлектора антенны космического базирования методом конечных элементов / И. Е. Гутковский, А. В. Золин, С. В. Курков и др. // Современное машиностроение. Наука и образование. 2012. № 2. С. 276–285.

5. Зимин В. Н. Экспериментальное определение динамических характеристик крупногабаритных трансформируемых космических конструкций // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2011. № 1. С. 47–56.

References

1. Lopatin A. V., Rutkovskaya M. A. *Obzor konstruktivnykh sovremennykh transformiruemyykh kosmicheskikh antenn (chast' 1)* [Review of designs of modern transformed space antennas (part 1)] // *Vestnik SibGAU*. 2007. № 2. С. 78-81. (In Russ)
2. Luhmann T., S. Robson, S. Kyle, J. Boehm. *Blizhniaia fotogrammetriia i 3D-zrenie. per. s angl.* [Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. Translated from Engl.]. М. : Lenand Publ., 2018. 704 p.
3. Stegman, Matthew & Fedyk, Mike & Kuehn, Steven. Solar Thermal Vacuum testing of deployable mesh reflector for model correlation IEEE Aerospace Conference Proceedings. 10.1109/AERO.2010.5446961.
4. *Modelirovanie dinamiki raskrytiya fermennogo karkasa transformiruемого reflektora anteny kosmicheskogo bazirovaniya metodom konechnyykh elementov* [Simulation of the dynamics of opening the truss frame of a transformable reflector of a space-based antenna by the finite element method] / I. E. Gutovskiy, A. V. Zolin, S. V. Kurkov et al. // *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie*. 2012. № 2. P. 276–285 (In Russ)
5. Zimin V. N. [Experimental determination of dynamic characteristics of large-sized transformable space structures] *Jeksperimental'noe opredelenie dinamicheskikh harakteristik krupnogabaritnykh transformiruemyykh kosmicheskikh konstrukcij* // *Vestnik MGTU im. N. Je. Baumana. Serija «Mashinostroenie»*. 2011. № 1. P. 47–56 (In Russ).

© Иванов М. А., Петров В. В., 2020

УДК 681.5

РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА СИЛОВОЙ КОНСТРУКЦИИ МОДУЛЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОВЫВОДНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ.

А. В. Карманова, Ю. А. Петрова, А. А. Хвалько

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

Рассмотрена разработка силовой конструкции модуля бортовой аппаратуры для применения многовыводных электронных компонентов. Основной задачей является анализ контактных соединений для поверхностного монтажа современных корпусов микрочипов.

Ключевые слова: силовая конструкция, модуль бортовой аппаратуры, многовыводные электронные компоненты, поверхностный монтаж, космический аппарат, анализ.

DEVELOPMENT OF THE DESIGN OF THE POWER STRUCTURE OF THE ON-BOARD EQUIPMENT MODULE FOR THE USE OF MULTI-LEAD ELECTRONIC COMPONENTS.

A. V. Karmanova, Y. A. Petrova, A. A. Hvalko

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

This article is devoted to the development of the power design of the on-Board equipment module for the use of multi-lead electronic components. The main task is to analyze the contact connections for surface mounting of modern microchip housings.

Keywords: power structure, onboard equipment module, multi-lead electronic components, surface mounting, spacecraft, analysis.

Создание космического аппарата (КА) с длительным сроком активного существования, на сегодняшний день, это одна из основных целей. Для этого все конструктивные узлы КА должны быть очень надежными, обладать повышенной живучестью и иметь большой запас прочности на длительный промежуток времени, в связи с тем, что вмешаться в ход эксперимента, как это делается в наземных лабораторных условиях весьма затруднительно, а повторение эксперимента потребует значительных затрат времени и средств.

Решение задач обеспечения длительного срока активного существования приводит к необходимости постановки и решения оптимизационных задач выбора параметров бортовых и наземных систем. Эти задачи приводят к миниатюризации электронных компонентов и переход на современную компоновку модуля бортовой аппаратуры, вызванные естественно-техническим развитием и необходимыми целями, требует особого отношения к прочностным характеристикам материалов и типов механических контактов для обеспечения работоспособности модуля на протяжении всего срока технологического ресурса.

Поэтому разработка проекта силовой конструкции модуля бортовой аппаратуры является актуальной как в научном, так и в практическом отношении. В инже-

нерной практике расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) в материале элементов конструкций проводится с использованием аппарата сопротивления материалов, строительной механики, с помощью упрощенных схем, основанных на постулатах теорий упругости и пластичности.

При использовании многовыводных компонентов для поверхностного монтажа обеспечивается возможность более высокой плотности монтажа. При увеличении количества компонентов лишь в два раза на той же площади, неизбежно возникает необходимость в использовании более узких печатных проводников и расстояний между проводниками. Увеличивается также удельная тепловая нагрузка, и возникают различные условия теплового расширения в области между компонентами и печатной платой, которые отличаются от условий стандартной (DIP) технологии, где они компенсируются за счет гибких выводов. Все эти положения должны учитываться уже при разработке модуля бортовой аппаратуры и при проектировании силовой конструкции.

В ходе анализа, результаты исследований последних десятилетий указывают на необходимость разработки силовой конструкции модуля бортовой аппаратуры с такими параметрами, которые позволят минимизировать деформацию модуля, предотвратить

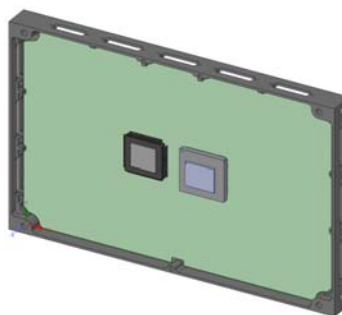
разрушение многовыводных контактов, уменьшить амплитуду колебаний, которая поможет справиться с вибрацией в бортовом модуле, что не позволит войти в резонанс с КА. Для достижения поставленных целей необходимо исследовать на прочностные характеристики такие контактные соединения, как: BGA, PGA, CGA, MCS. Что в дальнейшем укажет на определение остаточного ресурса и оценки долговечности по планируемой истории нагружения для материала контактного соединения комплектующих электронных плат. В результате трехмерного моделирования деформации, должны получиться оценки прочности конструкции при рабочих нагрузках.

В данной работе рассмотрена нужная информация для создания проекта силовой конструкции модуля бортовой аппаратуры для применения многовыводных электронных компонентов. Были рассмотрены вариации контактных соединений для поверхностного монтажа современных корпусов микрочипов. В ходе анализа остановились на двух видах корпусов (CCGA и CQFP), как самые применяемые в космической технике.

Для разработки новой силовой конструкции модуля бортовой аппаратуры была рассмотрена конструкция модуля, применяемого в бортовой радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) КА (см. рисунок).

Были выявлены большие деформации в месте установки электронных радио изделий (ЭРИ), что не пригодно для многовыводных компонентов так как

при большой амплитуды происходит разрушение в местах контактных соединений.



Внешний вид геометрической модели силовой конструкции модуля бортовой РЭА с смонтированными многовыводными ЭРИ

Для решения этой проблемы предлагается силовая конструкция с применением ребер жесткости, это позволит не входить в резонанс с КА и увеличит надежность контактных соединений. При рассмотрении внешних и внутренних дестабилизирующие факторов, влияющих на весь модуль бортовой аппаратуры, были выделены наиболее разрушающие факторы влияния на конструкцию и многовыводные контакты.

© Карманова А. В., Петрова Ю. А.,
Хвалько А. А. 2020

УДК62-237

ВЫСОКОТОЧНАЯ ТРАНСФОРМИРУЕМАЯ ШТАНГА

П. А. Краевский, И. С. Морозков, В. В. Болгов, Д. Л. Рукосуев

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

Представлены краткие результаты разработки высокопрецизионной трансформируемой штанги крупногабаритных трансформируемых механических систем космического аппарата.

Ключевые слова: штанга, механизм раскрытия, космический аппарат, крупногабаритные трансформируемые системы, шарнирный узел.

THE HIGH PRECISION TRANSFORMATION BEAM

P. A. Kraevskiy, I. S. Morozkov, V. V. Bolgov, D. L. Rukosuev

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

This article presents design results of the high precision transformation beam for the large deployable mechanism of satellite.

Keywords: beam, mechanism of transformation, deployable mechanism, satellite, large deployable mechanism, hinged joint.

При разработке новых космических аппаратов (КА) возникает ряд технических проблем, связанных с компоновкой спутника в целом. Для компактного размещения крупногабаритных антенн и элементов полезной нагрузки, требующих удаленного расположения от КА, применяется различные схемы складывания конструкций (штанг, рам, ферм), используемых для связи отодвигаемых элементов с КА. Для обеспечения этих задач необходимо разработать трансформируемые конструкции (штанги) обеспечивающие перевод в рабочее положение на орбите функционирования с требуемой точностью, жесткостью и при этом конструкции должны обладать температурной стабильностью.

Разработка высокоточной трансформируемой штанги актуальная проблема в конструировании механических систем спутника. Для решения этой задачи необходимо учесть ключевые требования:

- обеспечить минимальные массовые характеристики;
- обеспечить стабильность при внешних воздействиях, таких как перепады температур;
- обеспечить высокую точность перевода штанги в рабочее положение,
- обеспечить прочность и жесткость конструкции в транспортном положении;
- обеспечить жесткость конструкции в рабочем положении.

Представлена высокоточная трансформируемая штанга для рефлектора антенны Ø12 м, соответствующая мировым требованиям, предъявляемым к

крупногабаритным трансформируемым механическим системам.

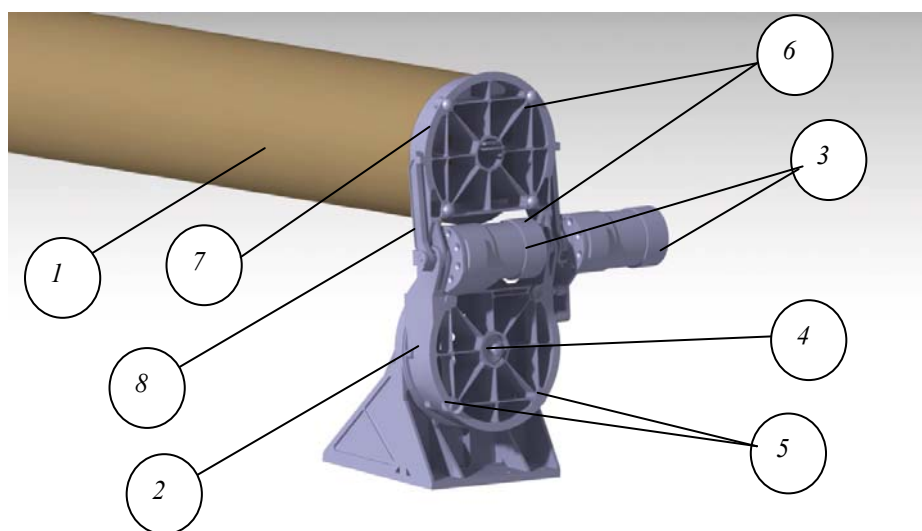
Конструкция штанги представляет собой звено с одной стороны установленное на подвижную часть шарнирного узла (ШУ), который крепится к корпусу КА с другой стороны на штангу устанавливается рефлектор.

Представленная штанга была разработана в двух исполнениях имеющих следующие характеристики:

- длина штанги – 4900 мм; масса звена штанги – 8,1 кг; (первое исполнение);
- длина штанги – 7900 мм, масса звена штанги – 12,8 кг (второе исполнение);
- диаметр звена штанги – 200 мм; (для обоих исполнений);
- масса ШУ – 5,7 кг (для обоих исполнений).

При разработке ШУ штанги был использован опыт, ранее полученный в рамках ОКР. Конструкция ШУ представляет собой неподвижную часть, на которой устанавливаются опорные ложементы (4 шт.), фиксирующее устройство и электромеханические привода.

Подвижная часть ШУ, на которую устанавливаются опорные сферы, поворачивается водилами установленными на выходных валах ЭМП. Представленная конструкция проста и надежна за счет резервирования приводов раскрытия, а опорные элементы и фиксирующее устройство спроектированы для обеспечения требуемой точности раскрытия и жесткости обеспечиваемой моментом запираения и применяемыми материалами.



Высокоточная трансформируемая штанга:

1 – звено штанги, 2 – неподвижная часть ШУ, 3 – Электромеханические приводы (ЭМП),
4 – фиксирующее устройство, 5 – опорные ложементы, 6 – опорные сферы,
7 – подвижная часть ШУ, 8 – водило

Подвижная и неподвижная части ШУ выполнены из титановых сплавов обеспечивающих требуемую термостабильность, прочность и легкость конструкции.

Опорные элементы выполнены из высокотвердых стальных сплавов обеспечивающих высокую контактную твердость и точность поверхности.

Звено высокоточной трансформируемой штанги выполнено из полимерного композиционного волокна. Геометрия и схема армирования звена были спроектированы, с целью получения минимально возможного коэффициента температурного расширения материала для обеспечения высокой температурной стабильности всей конструкции.

Звено штанги длиной 4900 мм было подвержено испытаниям на воздействие равномерного температурного поля плюс 100 ± 2 °C по результатам которого изменение взаимного положения посадочных плоскостей звена штанги не превысило $27''$ (кручение).

Конструкция штанги прошла автономные испытания подтвердившие выполнение технических требований:

- воспроизводимость поворота ШУ в рабочее положение не более $\pm 15''$;
- запирающий момент в трех ортогональных плоскостях не менее 5,4 кг/м;
- жесткость ШУ не менее $2,5 \cdot 10^3$ Н·м/рад в плоскости раскрытия.

Разработанная конструкция крупногабаритной штанги рефлектора антенны масштабируема и может быть применима в других КА для решения различных задач по обеспечению точного положения элементов полезной нагрузки.

© Краевский П. А., Морозков И. С.,
Болгов В. В., Рукосуев Д. Л., 2020

УДК 629.7

МЕТОДИКА ОБОСНОВАННОГО ВЫБОРА СПОСОБА ЗАКРЕПЛЕНИЯ ПРЯМЫХ УЧАСТКОВ ВОЛНОВОДОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИХ ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ НАГРЕВЕ*

И. В. Кудрявцев

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

Предлагается методика обоснованного выбора способа закрепления прямых участков волноводов для обеспечения значений их первой частоты колебаний и устойчивости при изменении температуры на этапе эксплуатации космического аппарата.

Ключевые слова: космический аппарат, волновод, колебания, первая собственная частота, температура, устойчивость, опора.

SELECTION METHOD OF FIXING METHOD FOR STRAIGHT WAVEGUIDES TO ENSURE THEIR DYNAMIC STATE DURING HEATING

I. V. Kudryavtsev

Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: ikudryavcev@sfu-kras.ru

The technique is proposed that makes it possible to ensure the choice of supports for straight waveguides in order to ensure their dynamic state taking into account the change in temperature over a wide range during the operation of the spacecraft.

Keywords: spacecraft, waveguide, vibration, first eigenfrequency, temperature, stability, support.

Введение. В течение длительного срока эксплуатации космического аппарата (КА) волноводы [1] подвергаются воздействию различных воздействий, среди которых выделим вынужденные колебания и изменение температуры в широком диапазоне (до -150...+150 °С). Одними из важнейших механических условий работоспособности волноводов является обеспечение заданных допустимых значений первой собственной частотой колебаний f_1 и критической температурой ΔT_{cr} , при которой происходит потеря устойчивости:

$$f_1 \geq [f], \Delta T_{cr} \geq [\Delta T]. \quad (1)$$

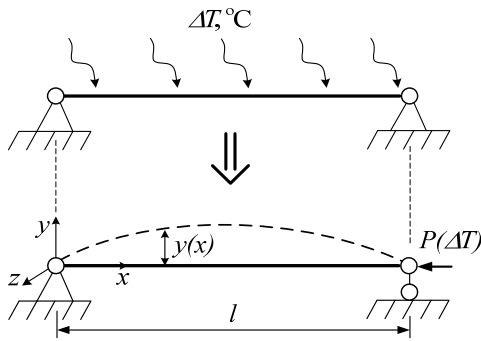
На рисунке, *a* показана упрощенная модель прямого участка волновода, которая учитывает изменение температуры через эквивалентную продольную силу $P(\Delta T)$. При снижении температуры ниже нуля продольная сила $P(\Delta T)$ будет растягивающей, а при нагреве – сжимающей. Воздействие продольной силы будет изменять жесткость конструкции волновода и ее динамические параметры. На рисунке, *б* для примера показан типичный график зависимости изменения частоты от температуры.

При росте температуры до критического значения ΔT_{cr} (см. рисунок, *б*) частота собственных колебаний уменьшится с номинального значения f_0 до нуля, при этом возникшая продольная сжимающая сила $P(\Delta T)$ приведет к общей потере устойчивости волновода.

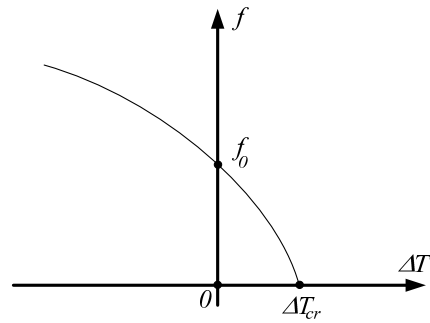
Одним из эффективных способов обеспечить условия работоспособности (1) для протяженных конструкций волноводов является обоснованный выбор вида и способов расстановки краевых и промежуточных опор. Применяемый для этого в настоящее время подход заключается в создании на ЭВМ полной геометрической модели конструкции волновода с опорами и последующего расчета методом конечных элементов, что сопряжено с большими временными и вычислительными затратами.

Более эффективным является аналитический проектный расчет, который строится по упрощенному моделированию исходной конструкции, например по теории стержней. Будем рассматривать изгибные колебания и форму потери устойчивости волновода, происходящими в плоскости его наименьшей жесткости.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта: «Разработка методики расчета термоупругого состояния волноводно-распределительной системы космических аппаратов связи на этапе эксплуатации».



а



б

Влияние температуры волновода на его частоту собственных колебаний:
а – эквивалентная схема нагрева; б – зависимость частоты от температуры

В этом случае первая собственная частота колебаний и критическая температура определяются по зависимостям [2; 3]:

$$f_1(\Delta T) = \frac{\alpha^2}{2\pi l^2} \cdot \sqrt{\frac{EJ}{m}}$$

и

$$\Delta T_{cr} = \frac{\pi^2 J_{min}}{\mu^2 \cdot l^2 \cdot \alpha_t \cdot S} \leq [\Delta T], \quad (2)$$

где μ и α – коэффициенты, определяемые способом закрепления волновода.

Значения коэффициентов опор α и μ в (2) получаются из решения соответствующих разрешающих уравнений колебаний и устойчивости при определенных условиях закрепления. Для наиболее распространенных случаев закрепления значения коэффициентов опор приводятся во многих справочниках [2; 3].

Объединяя выражения (2) с учетом их совместного действия [2], получим аналитическую зависимость, которая определяет первую собственную частоту колебаний волновода при заданной температуре и расстановке опор.

$$f_1(\Delta T) = \left(\frac{\alpha}{\pi l}\right)^2 \cdot \sqrt{\frac{E}{4m} (\pi^2 J_{min} - \mu^2 \cdot l^2 \cdot \alpha_t \cdot \Delta T \cdot S)} \leq [f]. \quad (3)$$

Выражая из уравнения (3) коэффициенты опор α и μ , можно получить решение искомой обратной задачи по обоснованию требований к опорам, что позволит выполнять аналитический проектный расчет требуемого закрепления. Однако проблемой является использование в одном уравнении (3) двух разнородных коэффициентов опор, α и μ , неравнозначности их значений и отсутствия учета числа пролетов для многопролетных схем.

С целью устранения данного затруднения предлагается производить пересчет коэффициентов опор до их сопоставимых значений α' и μ' , что позволит однозначно решать проектные задачи по обоснованному выбору схемы расстановки опор для которых будут одновременно выполнены оба условия работоспособности (1). В этом случае необходимо найти только

одно минимальное значение коэффициента опор α_{min} по выражению:

$$\alpha_{min} = C_{\Delta T} + \sqrt{C_{\Delta T}^2 + \frac{4m[f_1]^2 l^4}{\pi^2 EJ_{min}}},$$

где

$$C_{\Delta T} = \frac{\alpha_t \cdot \Delta T \cdot S l^2}{2\pi^2 J_{min}} \quad (4)$$

Тогда методика обоснования выбора схемы закрепления состоит из следующих этапов:

1. Создание набора возможных схем закрепления.
2. Определение коэффициентов опор α и μ для каждой схемы закрепления из выбранного набора по справочной литературе либо расчетным путем.
3. Пересчет значений коэффициентов опор и нахождение значений α' и μ' для каждой схемы закрепления из выбранного набора так, чтобы они приняли близкие значения.
4. Определение минимального значения коэффициента опор α_{min} по зависимости (4).
5. Выбор из набора такой схемы закрепления, для которой значение коэффициентов α' и μ' будут не меньше чем рассчитанная величина α_{min} по зависимости (4).

Методика справедлива не только для простейших видов опор (заделка, шарнирная опора и др.), но и для любых опор, например, с заданной жесткостью. В этом случае коэффициенты опор будут переменными функциями и зависят от жесткости опоры C :

$$\alpha' = \alpha'(C_{on}), \quad \mu' = \mu'(C_{on}). \quad (5)$$

Разработанная методика основана на аналитических выражениях, что позволяет проводить разносторонние исследования динамического состояния волновода в зависимости от геометрии волновода, материала, условий закрепления, наличия гибкой секции и др.

По разработанной методике выполнены сравнительные расчеты участка волновода в ПО «Ansys», которые показали хорошую сходимость результатов.

Разработанная методика имеет общий характер, что позволяет посредством расстановки опор управлять динамическим состоянием любых протяженных

конструкций: тяги, кабели, балки, паро-, масло-, водопроводы и др.

Библиографические ссылки

1. Сильченко П. Н., Кудрявцев И. В., Михнёв М. М. Анализ динамического состояния волноводно-распределительных систем от воздействия вибрационных нагрузок на этапе КА вывода на орбиту // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2012. № 2. С. 205–219.
2. Blevins R. D. Formulas for dynamics, acoustics and vibration // Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 2016. 458 p.
3. Биргер И. А. Прочность, устойчивость, колебания. М. : Машиностроение, 1988. Т. 3. 567 с.

References

1. Silchenko P. N., Kudryavtsev I. V., Mikhnev M. M. Dynamic state analysis of waveguide distribution systems from vibration loads effects while launching spacecraft into the orbit // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2012. № 2. P. 205–219 (In Russ.).
2. Blevins R. D. Formulas for dynamics, acoustics and vibration. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 2016. 458 p.
3. Birger I. A. Prochnost', ustojchivost', kolebanija. M. : Mashinostroenie, 1988. 567 p. (In Russ.).

© Кудрявцев И. В., 2020

УДК 629.7.023.4

КОНСТРУКЦИЯ ОПОРНОГО КАРКАСА ЦЕНТРАЛЬНОГО ЗЕРКАЛА КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА «МИЛЛИМЕТРОН»

А. Д. Леоненков, Ю. А. Оберемок

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

Рассмотрены варианты конструкций опорного каркаса центрального зеркала с выбором оптимального исполнения.

Ключевые слова: космический телескоп, опорный каркас, центральное зеркало.

THE STRUCTURE OF THE SUPPORT FRAME OF THE CENTRAL MIRROR OF THE SPACE TELESCOPE "MILLIMETRON"

A. D. Leonenkov, Y. A. Oberemok

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

The article discusses options for the support frame of the central mirror with the choice of the optimal design.

Keywords: space telescope, support frame, center mirror.

Одной из базовых конструкций главного зеркала космического телескопа «Миллиметрон» является опорный каркас центрального зеркала. К данной конструкции из условий функционирования предъявляется ряд жестких требований, как то размеростабильность в широком диапазоне температур от $-268,6$ °C до $+20$ °C, высокие жесткостные характеристики, необходимость компоновки в строго ограниченном объеме, отсутствие возможности применения многоопорной схемы, так как размещение опор исходя из компоновки возможно только на внешнем поясе каркаса. Исходя из изложенных требований рассмотрено три варианта компоновки

Первый вариант каркаса состоит из двух кольцевых поясов, расположенных на разных уровнях, и соединительной решетки из прямолинейных стержней. Наружный кольцевой пояс опирается на силовое кольцо корпуса рефлектора посредством спаренных наклонных стержней [1; 2].

Опорные стержни расположены в плоскостях, параллельных фокальной оси, что обеспечивает фактически статически определенное опирание для осесимметричных воздействий (рис. 1). Эту схему каркаса можно назвать фермой только условно. По определению, принятому в строительной механике, «фермой называется стержневая система, остающаяся неизменяемой, если все стержни считать шарнирно соединенными в узлах». Формально эта схема не является фермой.

Геометрическая неизменяемость этой схемы каркаса обеспечивается за счет жесткого соединения стержней в узлах. Данный вариант затруднителен в реализации из-за сложности конструкции.

Следующий вариант представляет однослойную структуру, но включает не два, а три кольцевых пояса (рис. 2). Главное же отличие данного варианта состоит в том, что в качестве стержневых элементов использованы углепластиковые трубки диаметром 11,4 мм с узловыми соединениями типа «MERO». В таком исполнении опорный каркас становится очень гибким, практически геометрически изменяемым. Дело в том, что узловое соединение типа MERO фактически является шарнирным и может использоваться исключительно в стержневых системах, строго подпадающим под определение фермы. Оно работает только на осевые усилия: растяжение или сжатие и не может воспринимать существенных по величине изгибающих и крутящих моментов.

Был выполнен анализ другой расчетной модели в которой использованы изгибаемые стержневые элементы типа *BEAM*, причем средние части стержней имеют характеристики трубок из углепластика, а концевые вставки, соответствуют титановым болтам *M5*. Минимальная частота колебаний оказалась равной 6.0 Гц. Эту величину следует рассматривать как верхнюю оценку, поскольку неизбежные люфты в резьбовом соединении приведут к снижению частоты [3].



Рис. 1. Опорный каркас вариант № 1

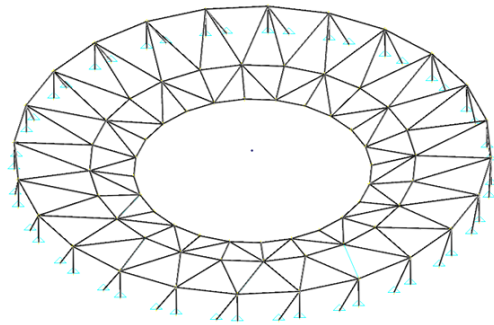


Рис. 2. Опорный каркас вариант № 2

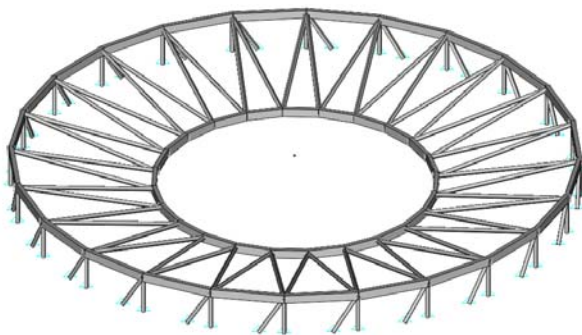


Рис. 3. Опорный каркас вариант № 3

Последний вариант с жесткими узлами и двумя кольцевыми поясами с аналогичными общими габаритными размерами, позволил добиться заданных требований по жесткости, первая частота колебаний оказалась равной 55 Гц (рис. 3). Данный вариант выбран в качестве основного рабочего.

Библиографические ссылки

1. Проект «Миллиметрон» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.asc.rssi.ru> (дата обращения: 12.03.2020).
2. Конструкции «Меро» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rudesign.ru> (дата обращения: 12.03.2020).

3. Анализ методом конечных элементов [Электронный ресурс]. URL: <https://structures.aero/software/femap/> (дата обращения: 12.03.2020).

References

1. Project “Millimetron” [Electronic resource]. URL: <http://www.asc.rssi.ru> (access: 12.03.2020).
2. Designs “Mero” [Electronic resource]. URL: <http://www.rudesign.ru> (access: 12.03.2020).
3. Analysis by the finite element method [Electronic resource]. URL: <https://structures.aero/software/femap/> (access: 12.03.2020).

© Леоненков А. Д., Оберемок Ю. А., 2020

УДК 669.713.7

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ С ИЗМЕНЯЕМЫМИ МОРФОЛОГИЧЕСКИМИ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

А. Н. Лихачев

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова»
Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., 1
E-mail: alikhachev@yandex.ru

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяющих реализовать подходы по созданию конструкций с изменяемыми морфологическими и функциональными характеристиками изделий авиационно-космической техники на основе гибких композиционных материалов на основе эластичной матрицы с управляемой фазовой структурой.

Ключевые слова: реконфигурируемые конструкции, морфологические характеристики, актуаторы, фазовый переход, композиционные структуры.

THEORETICAL FOUNDATIONS FOR CREATING STRUCTURES WITH VARIABLE MORPHOLOGICAL AND FUNCTIONAL CHARACTERISTICS

A. N. Likhachev

Baltic State Technical University "Voenmeh" named after D. F. Ustinov
Russian Federation 190005 Saint-Petersburg, 1st Krasnoarmeyskaya str., 1
E-mail: alikhachev@yandex.ru

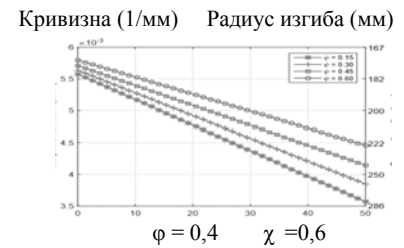
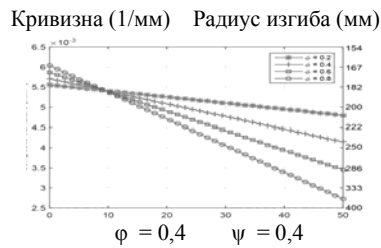
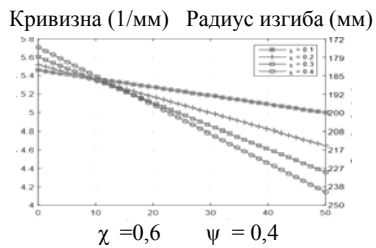
The paper presents the results of theoretical and experimental studies that allow us to implement approaches to create structures with variable morphological and functional characteristics of aerospace products based on flexible composite materials based on an elastic matrix with a controlled phase structure.

Keywords: reconfigurable structures, morphological characteristics, actuators, phase transition, composite structures.

Традиционный подход создания конструкций, в том числе и авиационно-космической техники, связан с разработкой, структур с низкой морфологией и постоянными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. Создание конструкций, изменяющих свою форму, структуру и подстраивающих свои функционально-эксплуатационные характеристики в процессе работы с учётом изменяющихся внешних и внутренних условий, является актуальной задачей для многих систем авиационно-космической техники.

В данной работе рассмотрены морфологически изменяемые структуры, приводимые в действие термоактивными актуаторами, работающими на основе фазового перехода и являющиеся частью эластичных композиционных конструкций, созданных на базе гиперэластичных материалов и армирующих структур. Они соответствуют трём основным принципам. Требуемая форма конструкции программно управляется с помощью актуаторов, которые интегрированы в конструкцию и определяется как структурой композиционного материала, так и структурной архитектурой самой конструкции. В материале конструкции реализуется изотропная или анизотропная деформация, зависящая от свойств композита, его топологии и программы действия, актуаторов. Материал конструкции позволяет получать информацию о состоянии

структуры и активно управлять её морфологией изменяя её форму и характеристики. Разработаны теоретические основы создания материалов, конструкций, методов проектирования актуаторов и датчиков, интегрированных в конструкцию. Для создания эластичных структурных элементов созданы, приводимые в действие актуаторами, композиты с эластичной матрицей (КЭМ), осуществляющие контроль состояния структуры и изменение её формы. Представлена модель плоского композита, состоящего из следующих основных структурных слоёв: ограничительных, фиксирующих, предварительно напряженных и силовых. Ограничительный слой является гибким, слабо растяжимым, с высоким модулем упругости в плоскости слоя и обеспечивает структурную целостность в одном направлении и морфинга системы в другом. Механически предварительно напряженный слой является источником внутренней восстанавливающей силы в КЭМ. Предварительное напряжение, заложенное в композит, необратимо и обеспечивает конструкции, возврат к своей первоначальной стабильной форме. Фиксирующий слой представляет собой структуру позволяющую осуществить фиксацию формы КЭМ после придания ей заданной топологии. Силовой слой способен к контролируемому локализованному изменению своего напряженного состояния за счёт чего происходит изменение форма КЭМ.



Отклик пластины КЭМ на изменение давления, создаваемое в актуаторе

Представленные слои могут быть использованы для достижения нескольких функций, таких как структурная целостность, встроенная бистабильность и встроенная актуация. Эти функции определяются последовательностью укладки слоёв, их доменной границей и эксплуатационными свойствами композита. В композитной конструкции реализована внутренняя структура из гибких силовых слоёв, в виде сети анизотропных каналов определённой формы, программно изменяющих свою жесткость и управляющих локальной кривизной конструкции. В работе представлены результаты исследования влияния на морфологические свойства параметров структуры КЭМ. Некоторые результаты, полученные с применением выше изложенного подхода, представлены на рисунке, где показано изменение кривизны КЭМ от развиваемого давления в актуаторе, при различных параметрах трансформируемой конструкции, к которым относятся, χ – безразмерная толщина КЭМ, ψ – безразмерная расстояние от канала актуатора до содержащего слоя, ϕ – безразмерная ширина КЭМ.

Имитационные исследования при изменении давления актуатора от 0-50 кПа показали, что наклон кривой отклика КЭМ увеличивается с увеличением ϕ , что является следствием увеличения площади поперечного сечения канала актуатора при заданном давлении. Увеличение кривизны пластины с увеличением ϕ связано с уменьшением активного материала в канале актуатора. Изменение толщины канала актуатора показало, что его увеличение позволяет уменьшить давление актуатора для достижения нужной кривизны КЭМ (аналогичный характер изменения, как и для ϕ). Общий эффект от увеличения χ и ϕ , позволяет усилить деформацию пакета КЭМ при низких давлениях актуатора. Исследовано влияния размеров расположения канала актуатора относительно ограничительного слоя КЭМ, показало, что увеличение ψ ведёт к уменьшению кривизны композита при заданном давлении, что связано с увеличением напряжений сдвига при увеличении сжимающих напряжений в канале актуатора. Показано, что теоретически наиболее выгодными, с точки зрения морфинга, при заданном давлении актуации являются значения $\phi = 1$, $\chi = 1$, $\psi = 0$

Представленный подход и разработанная на его базе модель позволяет использовать предложенное решение для проектирования элементов конструкций с изменяемыми морфологией и функционально-эксплуатационными характеристиками, изменяющимися в процессе эксплуатации.

Библиографические ссылки

1. Лихачёв А. Н. Интеллектуальные конструкции – новый подход к созданию изделий авиационно-космической техники // Актуальные проблемы защиты и безопасности : тр. XXII Всерос. науч.-практ. конф. РАН. Т. 1 «Вооружение, военная и специальная техника. 2019. С. 216–222.
2. Лихачёв А. Н. Исследование деформирования реконфигурируемой конструкции на основе ауксетичной композиционной структуры с управляемым коэффициентом Пуассона // Решетневские чтения : материалы XXIII Междунар. науч. конф. : в 2 ч. / Сиб. гос. аэрокосм. ун-т Красноярск, 2019. С. 126–128.
3. Vasista S., Tong L., Wong K. Realization of morphing wings: A multidisciplinary challenge // Journal of Aircraft. 2012. № 49(1). P. 11–28.
4. Weisshaar T. A. Morphing aircraft systems: Historical perspectives and future challenges // Journal of Aircraft. 2013. № 50(2). P. 1–17.
5. Averous L., Moro L., Dole P., Fringant C. Properties of thermoplastic blends: starch–polycaprolactone. Polymer. 2000. № 41(11). P. 4157–4167.

References

1. Likhachev A. N. Intelligent design-a new approach to the creation of aerospace products. Current issues of protection and security // Proceedings of the XXII all-Russian scientific and practical conference RARAN. Vol. 1 " Armament, military and special equipment. 2019. P. 216–222 (In Russ.)
2. Likhachev A. N. [Study of the deformation of a reconfigurable structure based on an auxetic composite structure with a controlled Poisson's ratio. *Materialy XXIII Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXIII Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2019. P. 126–128 (In Russ.)
3. Vasista S., Tong L., Wong K. Realization of morphing wings: A multidisciplinary challenge // Journal of Aircraft. 2012. № 49(1). P. 11–28.
4. Weisshaar T. A. Morphing aircraft systems: Historical perspectives and future challenges // Journal of Aircraft. 2013. № 50(2). P. 1–17.
5. Averous L., Moro L., Dole P., Fringant C. Properties of thermoplastic blends: starch–polycaprolactone. Polymer. 2000. № 41(11). P. 4157–4167.

УДК 53.083.8, 681.7

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ 3D-СКАНЕРА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ЗЕРКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОБСЕРВАТОРИИ «МИЛЛИМЕТРОН»

С. Н. Макаров¹, А. Г. Верхогляд¹, М. Ф. Ступак¹, Д. А. Овчинников², Ю. А. Оберемок²

¹Конструкторско-технологический институт научного приборостроения
Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41

²Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: stupak@tdisie.nsc.ru

Создана математическая модель, численно описывающая процесс предварительного обмера зеркальной системы обсерватории «Миллиметронт» с использованием оптических контрольных меток на поверхности зеркальной системы, осуществлено численное моделирование работы бортового 3D-сканера.

Ключевые слова: математическая модель, зеркальная система обсерватории «Миллиметронт», система контроля, форма телескопа, контрольные метки, 3D-сканер.

MATHEMATICAL MODELING OF THE 3D SCANNER OF THE MIRROR SYSTEM CONTROL SYSTEM OF THE MILLIMETRON OBSERVATORY

S. N. Makarov¹, A. G. Verhoglyad¹, M. F. Stupak¹, D. A. Ovchinnikov², Y. A. Oberemok²

¹Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
41, Russian Str., Novosibirsk, 630058, Russian Federation

²Joint-Stock Company "Academician M. F. Reshetnev" Information Satellite Systems"
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
E-mail: stupak@tdisie.nsc.ru

A mathematical model has been created, numerically describing the process of pre-measurement of the mirror system of the "Millimetront" observatory using optical control marks on the surface of the mirror system, a numerical simulation of the work of the onboard 3D-scanner was carried out.

Keywords: mathematical model, mirror system of the Millimeteron Observatory, control system, telescope shape, control marks, 3D-scanner.

Введение. Проект космической обсерватории «Миллиметронт» (Спектр-М) рассчитанный для работы в миллиметровом и дальнем ИК диапазонах (70 мкм – 10 мм) с 10-метровым охлаждаемым (~4,5 К) криогенным телескопом [1–2]. Главной проблемой создания крупных телескопов является обеспечение качества изображения, что в свою очередь, требует разработки высококачественных и высокоточных методов контроля формы составных элементов их зеркальной системы [3–5]. Создание различных систем контроля формы составных элементов таких телескопов требует разработки математических моделей и алгоритмов работы данных контрольных систем [6; 7].

Описываемая в настоящем сообщении система контроля зеркальной системы обсерватории «Миллиметронт» (СК ЗС) создается для работы в составе бортового комплекса научной аппаратуры обсерватории «Миллиметронт» и рассчитывается на работу в условиях космического пространства. СК ЗС предназначена для контроля качества зеркальной системы (ЗС) космического телескопа и использования данных, получаемых СК ЗС в качестве сигналов «обратной

связи» для предварительных настройки и юстировки оптической системы телескопа в космическом пространстве.

Математическая модель. Задачей системы является определение многомерного вектора неизвестных параметров зеркальной системы телескопа по косвенным измерениям, получаемым в результате обмера телескопа 3D-сканером. Создана математическая модель, численно описывающая процесс предварительного обмера зеркальной системы обсерватории «Миллиметронт» с использованием оптических контрольных меток на поверхности зеркальной системы. Линейная математическая модель позволяет связать фактические косвенные измерения зеркальной системы с неизвестными смещениями ее параметров, определяющими форму телескопа. Выведена формула для оптимального решателя обратной задачи в процессе предварительного обмера зеркальной системы. Описана методика обмера составляющих элементов телескопа в рамках его предварительной настройки. Обмер контрольных меток выполняется на основе 3D-сканера, заложенного в конструкции системы кон-

троля зеркальной системы. Проведен анализ ошибок при использовании оптимального решателя, получена ковариационная матрица для вектора ошибки.

Решив матричную систему уравнений и получив оценку \hat{x} вектора смещений параметров x , становится известно – как и какие оптические поверхности (ОП) необходимо «довернуть» или сместить на орбите, чтобы вернуть их в исходное заводское положение, которое соответствует настроенному телескопу.

Если степени свободы неизвестных абсолютных параметров X при определении ОП выбрать удобным образом, соответствующим имеющимся актуаторам ОП, то это дает определенные удобства. В таком случае расчетный вектор смещения \hat{x} является вектором, сообщающим «насколько каждый из приводов ОП смещен от идеального (исходного) положения», и, по сути, сколько необходимо сделать шагов привода, чтобы рассматриваемая ОП «встала» на исходное место. Таким образом, вычисленный вектор \hat{x} может быть непосредственным входом для механизмов коррекции ЗС телескопа.

Применение описанного алгоритма настройки телескопа имеет существенные положительные практические качества:

- малость изменений положения ОП позволяет свести задачу к системе линейных уравнений. Это позволяет использовать методы линейной алгебры и дает точное единственное решение обратной задачи с прогнозируемой точностью работы алгоритма;

- нет необходимости знать абсолютные значения параметров x_p для ОП;

- нет необходимости точно знать абсолютное положение КМ в системе координат спутника и места установки их на ОП. Не требуется высокой точности установки КМ на панели ГЗ и другие ОП.

Моделирование работы 3D-сканера. На базе созданной математической модели осуществлено численное моделирование работы бортового 3D-сканера при предварительном обмере зеркальной системы обсерватории «Миллиметрон» с использованием оптических контрольных меток на поверхности зеркал в приближении геометрической оптики. Создан метод предварительной оценки смещения элементов ЗС телескопа по косвенным (неявным) измерениям, выполняемым 3D-сканером. Метод основан на математическом преобразовании косвенных измерений отклонений положения контрольных меток зеркал телескопа от их эталонного положения, на выходе которого выдается список оценок смещений неизвестных параметров элементов зеркальной системы, задаваемых удобным образом. Показана возможность обмера зеркальной системы телескопа с целью его предварительной настройки при использовании 3D-сканера на борту космического аппарата. Приведены оценки допустимых отклонений компонент зеркальной системы, необходимые для обеспечения функциональности телескопа.

Библиографические ссылки

1. Обзор научных задач для обсерватории Миллиметрон / Н. С. Кардашев, И. Д. Новиков, В. Н. Лукаш и др. // УФН. 2014. Т. 184, № 12. С. 1319–1352.

2. Сайт Астрокосмического центра ФИАН, г. Москва [Электронный ресурс]. URL: <http://millimetron.web2.ru/ru/> (дата обращения: 12.05.2020).

3. Лукин А. В., Мельников А. Н., Скоцилов А. Ф. Контроль зеркала контррефлектора телескопа «Миллиметрон» на основе использования синтезированной голограммы // Фотоника. 2016. № 5. С. 44–48.

4. Система контроля геометрических параметров центрального зеркала космического телескопа «Миллиметрон» / А. Г. Верхогляд, В. М. Михалкин, В. А. Куклин, В. И. Халиманович, Ю. В. Чугуй // Решетневские чтения : материалы Междунар. науч.-практ. конф. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2014. Т. 1(18). С. 61–63.

5. Дёмин А. В. Математическая модель процесса юстировки составных зеркал // Известия вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 11. С. 901–907.

6. Algorithm and mathematical model for geometric positioning of segments on aspherical composite mirror / B. Conquet, L. F. Zambrano, N. K. Artyukhina, R. V. Fiodortsev, A. R. Sitie // Приборы и методы измерений. 2018. Т. 9, № 3. С. 234–242.

7. Сычев В. В., Клем А. И. Алгоритм управления многоэлементным зеркалом на примере космического телескопа обсерватории «Миллиметрон» // Оптика атмосферы и океана. 2018. № 7. С. 578–586.

References

1. Obzor nauchnykh zadach dlya observatorii Millimetron / N. S. Kardashev, I. D. Novikov, V. N. Lukash et al. // UFN. 2014. T. 184, № 12. P. 1319–1352.

2. The website of the ASTrospace Center of FIAN, Moscow [Electronic resource]. URL: <http://millimetron.web2.ru/ru/> (access: 12.05.2020).

3. Lukin A. V., Melnikov A. N., Skolyarov A. F. Control of the mirror counter-reflector of the telescope "Millimetron" based on the use of a synthesized hologram [In Russian] // Photonics. 2016. № 5. P. 44–48.

4. System of control of geometric parameters of the central mirror of the Millimetron Space Telescope / A. G. Verhoglyad, V. M. Michalkin, V. A. Kuklin et al. // Reshetnevskiye chteniya : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. ; Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2014. T. 1 (18). P. 61–63 (In Russ).

5. Demin A. V. A mathematical model of the process of justation of composite mirrors // I'm a Universities. Instrumentation. 2015. T. 58, № 11. P. 901–907 (In Russ).

6. Algorithm and mathematical model for geometric positioning of segments on aspherical composite mirror / B. Conquet, L. F. Zambrano, N. K. Artyukhina, R. V. Fiodortsev, A. R. Sitie // Devices and measurement methods. 2018. T. 9, № 3. P. 234–242.

7. Sychev V. V., Klem A. I. The multi-cell mirror control algorithm is based on the Millimetron Space Telescope // Atmosphere and Ocean Optics. 2018. № 7. P. 578–586 (In Russ).

© Макаров С. Н., Верхогляд А. Г., Ступак М. Ф., Овчинников Д. А., Оберемок Ю. А., 2020

МЕТОД ИМИТАЦИИ НЕВЕСОМОСТИ ПРИ ОТРАБОТКЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ОТДЕЛЕНИЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В. М. Михалкин, В. А. Куклин, Г. С. Дмитриев, С. А. Ильвутиков, И. В. Романенко

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

Рассмотрен практический опыт применения альтернативного метода отработки надежности системы отделения с регистрацией параметров движения разделяемых объектов, при этом вес отделяемого объекта компенсируется приложением обезвешивающего усилия.

Ключевые слова: имитация невесомости, бросковые испытания, система отделения, малый космический аппарат.

WEIGHTLESSNESS SIMULATION METHOD FOR TESTING THE RELIABILITY OF THE SMALL SPACECRAFT SEPARATION SYSTEM

V. M. Mihalkin, V. A. Kuklin, G. S. Dmitriev, S. A. Il'vutikov, I. V. Romanenko

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

The article describes the practical experience of using an alternative method for testing the reliability of the separation system with recording the movement parameters of separated objects, while the weight of the separated object is compensated by the application of a de-weighting force.

Keywords: zero-gravity simulation, throwing test, separation system, the small spacecraft.

При выводе космических аппаратов (КА) на целевую орбиту ответственной операцией является отделение КА от разгонного блока [1]. Исходя из целевой задачи КА, разработчиками КА регламентируются допустимые угловые и линейные скорости при отделении [2]. Для большинства КА связи допускается угловая скорость после отделения от 0,5 до 3 %/с [3].

Для отработки надежности отделения КА и гарантирования допустимых угловых и линейных скоростей отделения необходимо иметь наземные стендовые средства для имитации разделения КА в невесомости [4].

Для решения подобных задач широко применяется метод бросковых испытаний систем отделения КА (см. рисунок) [5]. Суть метода заключается в определении параметров движения разделяемых объектов в процессе свободного падения. Требуемая высота испытательной установки зависит от циклограммы работы механизма системы отделения, длительности процесса разделения, требуемого мерного участка, расчетного участка для спасения разделяемых объектов, который в свою очередь зависит от допустимой перегрузки и ряда других факторов.

К недостаткам этого метода можно отнести:

– затраты на разработку и изготовление силового портала значительной высоты;

– необходимость разработки, изготовления и последующей настройки системы спасения разделяемых объектов в зависимости от допустимых перегрузок;

– трудоемкость и длительность подготовки и проведения каждого испытания.

В статье рассмотрен практический опыт применения альтернативного метода отработки надежности системы отделения с регистрацией параметров движения разделяемых объектов. При этом один из объектов фиксируется неподвижно на силовом портале, а вес отделяемого объекта компенсируется приложением обезвешивающего усилия в центре масс через трособлочную систему.

Особенностями примененного метода испытаний являются:

– необходимость высокоточной балансировки имитатора отделяемого объекта с целью совмещения точки приложения обезвешивающего усилия с центром масс;

– необходимость обеспечения моментов инерции и суммарной массы имитатора отделяемого объекта соответствующими штатному отделяемому объекту;

– необходимость обеспечения минимального трения в системе обезвешивания с целью минимизации влияния на процесс отделения;

– возможность применения высокоскоростной видеокамеры (до 1000 кадров в секунду) с целью детального изучения работы кинематики механизмов при отделении объекта.

При испытаниях определялись угловые скорости (погрешность датчика угловых скоростей $\pm 0,15$ %/с) и линейные скорости (погрешность определения $\pm 0,1$ м/с).

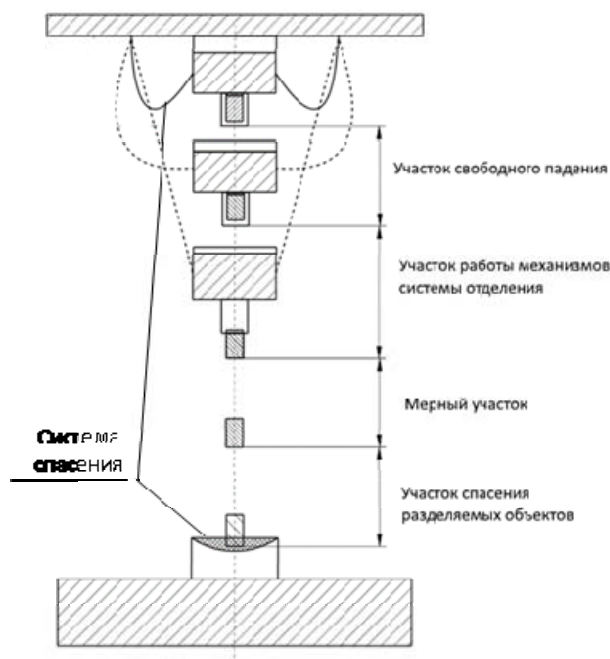


Схема бросковых испытаний

Достоинства примененного метода испытаний:

- схема испытаний не зависит от длительности процесса разделения;
- исключена необходимость разработки, изготовления и настройки системы спасения разделяемых объектов;
- исключена необходимость разработки и изготовления дорогостоящего силового портала;
- по сравнению с традиционной схемой бросковых испытаний значительно снижены временные затраты на проведение каждого испытания;
- возможность применения данного метода в термобарокамере в условиях вакуума и заданных экстремальных температурах условий эксплуатации.

Примененный метод позволил в течение нескольких дней провести более 70 срабатываний с несколькими вариантами конструкции системы отделения и получить большое количество экспериментальных данных, что позволило выявить особенности кинематики механизмов разделяемых объектов. Благодаря этому в крайне сжатые сроки, минимальными затратами и требуемой точностью определения параметров проведена отработка надежности механизмов разделения и подтверждено качество изготовления летной продукции.

Описанный в статье метод может быть применен для отработки надежности системы разделения малых КА, в том числе при длительном процессе разделения до 1 и более секунд.

Библиографические ссылки

1. Технология сборки и испытаний космических аппаратов : учебник / И. Т. Беляков, И. А. Зернов, Е. Г. Антонов и др. ; под общ. ред. И. Т. Белякова и И. А. Зернова. М. : Машиностроение, 1990. 352 с.
2. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного

обеспечения : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.

3. Чеботарев В. Е. Проектирование космических аппаратов систем информационного обеспечения : в 2 кн. Кн. 2. Внутреннее проектирование космического аппарата / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2005. 168 с.
4. Механика больших космических конструкций / Н. В. Баничук [и др.]. М. : Изд-во «Факториал», 1997. 302 с.
5. Конструирование автоматических космических аппаратов / Д. И. Козлов [и др.]. М. : Машиностроение, 1996. 448с.

References

1. Belyakov I. T., Zernov I. A., Antonov E. G. *Technologia sborki i isputaniy kosmicheskikh apparatov* [Technology of spacecraft assembly and tests]. M. : Mashinostroyeniye, 1990. 352 p.
2. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informacionnogo obespecheniya* [Basics of designing information support spacecraft]. Krasnoyarsk, 2011. 488 p.
3. Chebotarev V. E. *Proektirovanie kosmicheskikh apparatov sistem informacionnogo obespecheniya* [Design of spacecraft by information support system]. Krasnoyarsk, 2005. 168 p.
4. *Mekhanika bol'shih kosmicheskikh konstrukcij* [Mechanics of large space structures] / N. V. Banichuk [et al.]. M. : Faktorial, 1997. 302 p.
5. *Konstruirovaniye avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov* [Design of automatic spacecraft] / D. I. Kozlov [et al.]. M. : Mashinostroyeniye, 1996. 448 p.

© Михалкин В. М., Куклин В. А., Дмитриев Г. С., Ильвутиков С. А., Романенко И. В., 2020

УДК 621.01

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТОКОСЪЕМНЫХ КОЛЕЦ ИЗ БЕРИЛЛИЕВОЙ БРОНЗЫ

С. В. Мишин, Р. А. Савельев, М. А. Дремухин

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: pro100stealth@mail.ru

Рассматривается эффективность сплавов бериллиевых бронз для космических аппаратов в области приборостроения и аэрокосмической техники.

Ключевые слова: бериллиевые бронзы, контактные токосъемные кольца, холодная листовая штамповка.

PRODUCTION OF CURRENT COLLECTOR RINGS FROM BERYLLIUM BRONZE

S. V. Mishin, R. A. Savelev, M. A. Dremukhin

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
E-mail: pro100stealth@mail.ru

The efficiency of beryllium bronze alloys for spacecraft in the field of instrument-making and aerospace engineering is considered.

Keywords: beryllium bronze, contact current-collecting rings, cold sheet stamping.

Бериллиевые бронзы являются уникальными сплавами по благоприятному сочетанию в них хороших механических, физико-химических и антикоррозионных свойств. Эти сплавы после закалки и облагораживания имеют высокий предел прочности, упругости, текучести и усталости, отличаются высокой электропроводностью, теплопроводностью, твердостью, обладают высоким сопротивлением ползучести, высокой циклической прочностью при минимальном гистерезисе, высоким сопротивлением коррозии и коррозионной усталости. Они – морозостойкие, не магнитные и не дают искр при ударах. Бериллиевые бронзы являются уникальным материалом для изделий в области приборостроения и аэрокосмической техники. Основными требованиями, предъявляемые к таким изделиям, являются: высокая электропроводность, теплопроводность и коррозионная стойкость, релаксационная стойкость, упругие свойства и износостойкость [1].

Бериллиевые бронзы отличаются высоким уровнем прочностных, упругих свойств и релаксационной стойкости, они имеют высокую электро- и теплопроводность, и значительное сопротивление коррозии, поэтому такие бронзы используют для изготовления изделий специального назначения, к которым относятся токосъемные кольца. Токосъемные кольца широко применяются во многих областях промышленности. Однако требования к их изготовлению и свойствам зависят от многих факторов и определяются назначением этих деталей. Особенно они ужесточены при производстве элементов летательных аппаратов в авиа-и космическом машиностроении [2].

Контактные токосъемные кольца изготавливают из прутка сплава БрБ2 механической обработкой, что являлось не эффективным из-за низкого коэффициента использования металла. К рабочим поверхностям наружной, внутренней обоим упругих колец предъявляются следующие требования: минимальная шероховатость наружной поверхности кольца, отсутствие забоин, вмятин, трещин, заусенцев и любых дефектов, выступающих за пределы заданной шероховатости. В процессе эксплуатации при достижении циклической усталости эти кольца могут ломаться [3]. Для повышения упругих свойств и надежности при эксплуатации материал кольца должен иметь равномерное распределение в микроструктуре включений бета фазы и величину зерна до 50 мкм. В работе, целью повышения коэффициента выхода годных деталей, улучшения микроструктуры материала и уменьшения величины зерна, была предложена экономичная схема изготовления токосъемного кольца из листа БрБ2 методом штамповки с получения полого полуфабриката в форме стакана. Дополнительным преимуществом холодной штамповки является то, что изделия получают чистую поверхность и высокую точность [4].

Для осуществления глубокой вытяжки при листовой штамповки сплав БрБ2 должен обладать высокой пластичностью, что обеспечивается термической обработкой, как правило, закалкой, с получением мелкозернистой структуры. Полуфабрикаты сплава БрБ2 в закаленном и деформированном состоянии после вытяжки подвергаются старению с целью повышения прочности, твердости и износостойкости. Требования, которые предъявляются готовому изделию ТК: размер

зерна не более 40 мкм, твердость после старения более 320 HV.

Изготовление токосъемных колец является сложным производственным процессом, на который влияют многие факторы: это и состояния поставки материала, и термообработка детали [5].

Термическую обработку бериллиевых бронз проводят при температуре 750–790 °С с последующей закалкой в воду для получения пересыщенного твердого раствора. В закаленном состоянии бронза БрБ2 имеет значительную пластичность, что позволяет производить холодную пластическую деформацию изделий между закалкой и старением. Низкотемпературная термомеханическая обработка, заключающаяся в применении пластической деформации между операциями закалки старения, также значительно повышает характеристики прочности. В этом состоянии бериллиевые бронзы легко переносят операции гибки, вытяжки и другие виды деформации.

После закалки – обязательный контроль величины зерна. После вытяжки производится старение стакана в вакуумной печи при температуре 310 °С с последующим контролем твердости. При возможном несоответствии твердости заданной чертежом, необходимо произвести исследования основного материала с определением оптимального режима термообработки для получения заданных свойств.

Видно, что изготовление детали типа стаканов является важным процессом, от которого зависит надежность эксплуатации изделий. Метод холодной листовой штамповкой в полной мере обеспечивает выполнение заданных требований.

Библиографические ссылки

1. Феодосьев В. И., Сиярев Г. Б. Введение в космическую технику : учеб. пособие / Гос. науч.-тех. изд., 2-е изд, испр. и доп. М. : Оборонгиз, 1960. 506 с.
2. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного

обеспечения : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488с.

3. Шатров А. К., Назаров Л. П., Машуков А. В. Механические устройства космических аппаратов. Конструктивные решения и динамические характеристики : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2006. 84 с.

4. Технология производства космических аппаратов : учебник / Н. А. Тестоедов и др. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2009. 352 с.

5. Гушин В. Н., Основы устройства космических аппаратов : учебник для вузов. М. : Машиностроение, 2003. 272 с.

References

1. Feodos'ev V. I., Sinyayev G. B. Vvedenie v kosmicheskuyu tekhniku [Leadig into space technology]. M. : Oborongiz Publ., 1960. 506 p.

2. Chebotayev V. E., Kosenko V. E. Osnovy proyektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo naznacheniya [Informational spacecrafts design basis] / Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2011. 488 p.

3. Shatrov A. K., Nazarov L. P., Mashukov A. V. Mekhanicheskiye ustroystva kosmicheskikh apparatov. Konstruktivnie resheniya i dinamicheskie kharakteristiki [Spacecrafts' mechanical devices. Construction decisions and dynamic descriptions] / Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2006. 84 p.

4. Tekhnologiya proizvodstva kosmicheskikh apparatov [Spacecrafts production technology] / N. A. Testoedov et al. ; Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2009. 352 p.

5. Gushchin V. N. Osnovy ustroystva kosmicheskikh apparatov [Spacecrafts structure basis]. M. : Mashinostroenie Publ., 2003. 272 p.

© Мишин С. В., Савельев Р. А.,
Дремухин М. А., 2020

УДК 629.7

ПРОРЫВНОЕ ДВИЖЕНИЕ БЕЗ ПРОПЕЛЛЕНТА: ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ НОВЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ

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, концепт стенда.

Ключевые слова: движение без пропеллента, emdrive, СВЧ резонатор.

BREAKTHROUGH MOTION WITHOUT PROPELLENT: A RESEARCH STAND FOR STUDYING NEW PHYSICAL PRINCIPLES FOR SPACE FLIGHT

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, the concept of a research stand.

Keywords: propellantless propulsion, emdrive, microwave resonator.

За последнее время были представлены новые идеи построения двигателей для движения в космическом пространстве без использования традиционных космических двигателей.

КвД Леонова [1], двигатель VRD [2], идеи двигателей на основе теории квантованной инерции QI (фотонная петля) [3], опубликованы рабочие чертежи двигателя Emdrive [4].

Мы провели изучение заявленных концепций и предлагаем оригинальный концепт стенда для изучения новых физических принципов построения двигателей для космических полетов.

Предварительно, мы сформулировали определение идеального космического двигателя, как то:

а) двигатель не может нарушать законы сохранения энергии/ импульса;

б) двигатель должен использовать ресурсы космического пространства, космический вакуум для создания тяги.

Так же мы обсуждаем, что в природе существуют различные физические принципы для передачи импульса через вакуум и предложенный концепт стенда должен позволить исследовать новые физические принципы, используя разные алгоритмы, как то:

а) двигатель может использовать физический вакуум для создания потоков, что передают импульс;

б) двигатель может использовать фотоны низких энергий для предварительной «обработки вакуума», для создания в физическом вакууме неких квазичастиц, (фононов, солитонов и т. п.) и создавать тягу

за счет воздействия на эти квазичастицы с помощью, например, электромагнитных полей.

Обобщая, мы сформулировали, что двигатель должен иметь в себе *адаптер, интерфейс к новой физике для космических полетов.*

Изучая опубликованные рабочие чертежи Emdrive, строгие технологические требования к механической обработке его деталей и важное условие, что конический резонатор должен иметь криволинейные торцевые стенки, проведя серию компьютерных симуляций по распределению ЭМП в СВЧ резонаторе, мы нашли идею изготовления СВЧ резонатора V-образной формы с прямой и криволинейной частью. Где кривая часть резонатора изготавливается как отъемная часть, что позволит выполнить следующие условия:

а) технологичность изготовления и простота настройки СВЧ тракта;

б) прямая часть резонатора позволит создать режим распространения ЭМ волн в максимальном приближении к движению плоской ЭМ волны. Это позволит, как показали наши симуляции, максимально исключить вредное влияние прямых (боковых стенок) резонатора для создания эффекта тяги;

в) кривая часть резонатора позволит реализовать различные идеи распространения ЭМП в резонаторе и взаимодействия с ресурсами технической системы (стенки, поверхность резонатора, вакуум) и является основным конструктивным элементом *адаптера/интерфейса к новой физике для космических полетов;*

г) в общем случае, мы должны изучить возможные физические явления в кривой части, например, с разными материалами, микрорельефами, дополнительными источниками стационарных электрических и магнитных полей, дополнительными импульсами переменных ЭМ полей, физическими явлениями на молекулярном и атомарном уровне;

д) например, можно описать алгоритм 3-импульсов. Первый импульс воздействует на физическую структуру вакуума, создает в вакууме квазичастицу (по аналогии синтеза электрон-позитронных пар), второй импульс воздействует на созданные квазичастицы что бы задать им некие электромагнитные свойства, и третий импульс – основной, поступает в кривую часть из прямой части в нужное время, нужной формы и сообщает квазичастицам импульс. Если размеры квазичастиц как то малы, они могут свободно проходить через стенки резонатора и поток квазичастиц сможет унести импульс из КА наружу;

е) например, можно показать возможность создания тяги за счет передачи импульса с помощью волн Унру. В кривой части волновода ЭМ фотоны могут создать ускорения от 10^{24} м/с², что согласно идеям из QI может создать тягу. При этом надо просто изготовить кривую часть резонатора со стенками разной толщины и кривизны. Удобно использовать лазер как источник фотонов и оптический резонатор в факторе асимметричная катушка с 2000 витков (фотонная петля);

ж) так же интересно исследовать идеи создания тяги за счет микрорельефа в нанометровом масштабе на внутренней поверхности кривой части. Где согласно предсказанию автора QI [5], любая асимметричная полость размерами 129 нм, в силу принципа неопределенности Гейнзберга, может создать ускорение от 1g. Мы могли бы поместить в резонатор сменный картридж с нанорельефом в виде набора дифракционных решеток с переменным шагом от 120/60 нм (2D-резонатор).

Некоторые результаты компьютерных симуляций предложенного СВЧ резонатора показаны на рис. 1, 2

Объем статьи не позволяет описать детали, отметим, что настройка тракта СВЧ происходит после компьютерной симуляции, где важным критерием оптимизации является анализ сил изменения сил радиационного давления на внутренней поверхности резонатора на интервале наносекунд в зависимости от формы СВЧ импульса и геометрии V-резонатора.

Так как согласно [3; 4] тяга двигателя прямо зависит от добротности резонатора, моделирование позволит найти оптимальный дизайн для изготовления высокодобротного резонатора путем изучения распространения ЭМ в СВЧ тракте, на наносекундном интервале, с анализом изменения сил радиационного давления.

В работе проведен анализ известных идей, предложена принципиальная схема СВЧ резонатора, показан новый метод настройки тракта СВЧ через моделирование сил радиационного давления.

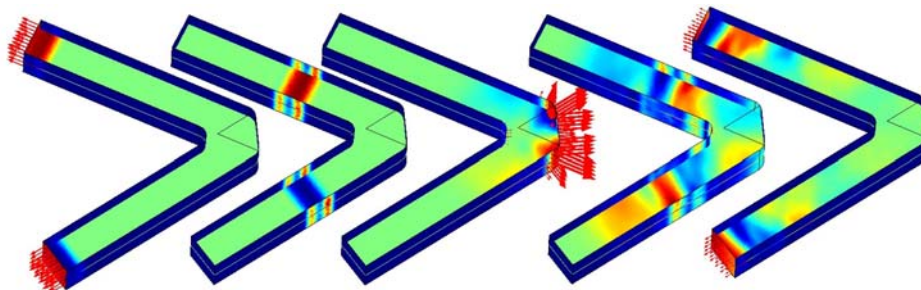


Рис. 1. Движение короткого СВЧ импульса в V-резонаторе на интервале 10 нс, импульс выходит слева, движется вправо, проходит через кривую часть, и возвращается назад. Красные стрелки показали изменения сил радиационного давления в резонаторе

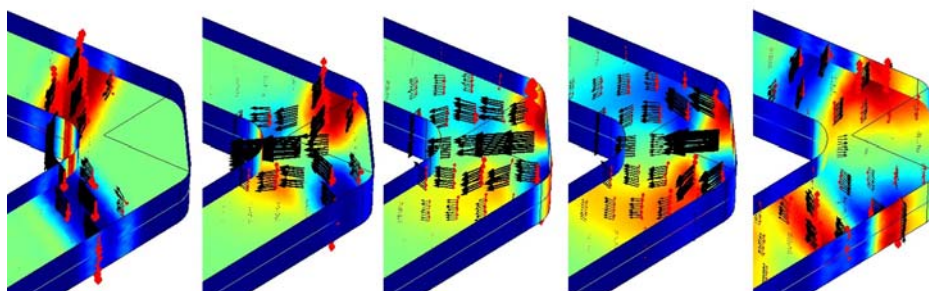


Рис. 2. СВЧ импульс проходит кривую часть, видно вращение силовых линий магнитного поля (стрелки черного цвета) характерное изменение направления векторов электрического поля

Библиографические ссылки

1. Леонов В. С. Схемы гибридных (ЖРД+КВД) двигателей для космоса [Электронный ресурс]. URL: <https://vladimir-leonov.livejournal.com/18420.html> (дата обращения: 10.09.2020).
2. VRD (vacuum reaction-propulsion device) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vrdspace.com/> (дата обращения: 10.09.2020).
3. McCulloch M. Five Experiments (Physics from the Edge) [Электронный ресурс]. URL: <https://physicsfromtheedge.blogspot.com/2020/07/five-experiments.html> (дата обращения: 10.09.2020).
4. Sawyer R. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.emdrive.com/flighthrusterreportissue2.pdf> (дата обращения: 10.09.2020).
5. McCulloch M. Pushing Off the Vacuum (Physics from the Edge) [Электронный ресурс]. URL: <https://physicsfromtheedge.blogspot.com/2020/06/pushing-off-vacuum.html> (дата обращения: 10.09.2020).

References

1. Leonov V. S. Schemes of hybrid (LPRE + KvD) engines for space [Electronic resource]. URL: <https://vladimir-leonov.livejournal.com/18420.html> (access: 10.09.2020).
2. VRD (vacuum reaction-propulsion device) [Electronic resource]. URL: <https://www.vrdspace.com/> (access: 10.09.2020).
3. McCulloch M. Five Experiments (Physics from the Edge) [Electronic resource]. URL: <https://physicsfromtheedge.blogspot.com/2020/07/five-experiments.html> (access: 10.09.2020).
4. Sawyer R. [Electronic resource]. URL: <http://www.emdrive.com/flighthrusterreportissue2.pdf> (access: 10.09.2020).
5. McCulloch M. Pushing Off the Vacuum (Physics from the Edge) [Electronic resource]. URL: <https://physicsfromtheedge.blogspot.com/2020/06/pushing-off-vacuum.html> (access: 10.09.2020).

© Овчар А. В., 2020

УДК 629.78

ИНЖЕНЕРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Ю. П. Похабов

АО «НПО ПМ МКБ»

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск, Красноярский край, ул. Ленина, 55а

E-mail: pokhabov_yury@mail.ru

Предложена инженерная методика анализа и оценки надёжности в свете задач, стоящих перед разработчиками крупногабаритных трансформируемых конструкций КА.

Ключевые слова: надёжность, конструкторско-технологический анализ надёжности (КТАН), развертываемые конструкции, подвижные механические узлы, космический аппарат.

ENGINEERING RELIABILITY PROVISION FOR DEPLOYABLE STRUCTURES

Yu. P. Pokhabov

JSC “NPO PM Small Design Bureau”

55a, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

E-mail: pokhabov_yury@mail.ru

An engineering technique for analyzing and assessing reliability in the light of the challenges facing developers of large-sized transformable structures of spacecraft is proposed.

Keywords: reliability, design and technology reliability analysis, deployable structures, moving mechanical assemblies (MMS), spacecraft.

Во избежание критически чувствительных отказов трансформируемых конструкций пренебрежительное отношение к вопросам надежности недопустимо. К сожалению, инженерные традиции, сформированные в конце 1950–1960-х годов и многократно закрепленные в нормативной документации, трактуют надежность с позиций статистических правил теории надежности, которые имеют мало общего с выбором и обоснованием реальных инженерных решений [1]. В первую очередь статистические методы теории надежности неприемлемы для высоконадежных изделий единичного изготовления, которые работают в уникальных условиях применения (глубоко под землей или под водой, при повышенной радиации, в космосе, на естественных космических объектах и т. д.). К тому же современные методики расчетов надежности на основе статистических подходов зачастую приводят на практике к ошибкам, достигающим не менее порядка величины значащей цифры [2]. По этой причине у большинства инженеров и конструкторов надежность ассоциируется с бессмысленным нагромождением математических формул, не имеющих практического применения, что вызывает отторжение расчетов надежности как ненужного и вредного занятия.

Между тем, надежность – это интегральная характеристика совокупных свойств изделий, необходимых и достаточных для выполнения требуемых функций во времени. Согласно ГОСТ Р 50779.10–2000 такую характеристику можно определить не только вероятностью возникновения отказов исходя из частоты в серии наблюдений, но и степенью уверенности в том,

что некоторое событие (или цепочка событий) произойдет. В первом случае для вычислений надежности используют статистические методы теории надежности, что отрывает вероятностные показатели надежности от практических результатов конструирования, не предоставляя ни малейшей информации для принятия конструкторских решений. Во втором случае, каждому конструкторскому решению может быть дана объективная вероятностная оценка с позиций уверенности в осуществлении благоприятных исходов потенциальных событий, а сама надежность способна стать эффективным инструментом для выбора и обоснования любого из параметров конструкции, влияющего на выполнение требуемых функций.

Суть надежности как степени уверенности в неизбежности событий идеально соответствует главной задаче конструктора – предпринять все необходимые и достаточные действия для того, чтобы случайные события непременно свершились бы в заданной допустимой области, что при должном обосновании гарантирует осуществление таких событий на практике. Такой инженерный подход к надежности лег в основу методики конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН), которая позволяет прогнозировать, смягчать или исключать возможные отказы на ранних стадиях жизненного цикла [3; 4]. Причем надежность в этом случае достигается методами инженерных дисциплин и конструкторско-технологических приемов обеспечения качества и надежности изделий без применения статистических правил теории надежности.

Методика КТАН многократно опробована на практике при разработке высоконадежных подвижных механических узлов космического назначения и гидроавтоматики нефтяного оборудования. В настоящее время указанная методика доработана для проектирования технических систем, состоящих из разнотипных компонентов и элементов: механизмов, конструкций, электрорадиоизделий, радиоэлектронных средств, пиротехнических и электромеханических устройств и т. п. Разработано методическое пособие, зарегистрированное как объект интеллектуальной собственности [5].

Методика КТАН находится на стадии внедрения при проектировании уникальных высокоответственных систем в интересах организаций Роскосмоса и МО.

Библиографические ссылки

1. Похабов Ю. П. Теория и практика обеспечения надёжности механических устройств одноразового срабатывания. Красноярск, 2018. 340 с.
2. Pokhabov Yu. P. Dependability in digital technology. *Dependability*. 2020. № 20(2). P. 3–11.
3. Похабов Ю. П. Проектирование высокоответственных систем с учётом надёжности на примере поворотной штанги // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2019. Т. 12, № 7. С. 861–883.
4. Artyushenko A. G., Pokhabov Yu. P. Design and technology reliability analysis: fork // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 862(2). P. 022001(1–6).
5. Похабов Ю. П. Конструкторско-технологический анализ надёжности (на примере системы отделения космических аппаратов). Железногорск, 2020. 57 с. [Выдано свидетельство № 3644 от 27.05.2020, зарегистрированное ООО «Сибкопирайт», г. Новосибирск].

References

1. 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.
2. Pokhabov Y. P. Dependability in digital technology. *Dependability*. 2020. № 20(2). P. 3–11.
3. Pokhabov Yu. P. [Design for reliability highly responsible systems on the example of a moving rod] // *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2019. № 12(7). P. 861–883 (In Russ.).
4. Artyushenko A. G., Pokhabov Yu. P. Design and technology reliability analysis: fork // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 862(2). P. 022001(1–6).
5. Pokhabov Yu. P. *Konstruktorsko-tehnologicheskij analiz nadezhnosti (na primere sistemy otdeleniya kos-micheskikh apparatov)*. [Design and technology reliability analysis (case of adapter spacecraft)]. Zheleznogorsk, 2020. 57 p. [Certificate No. 3644 dated 05/27/2020, registered by Sibcopyrite LLC, Novosibirsk, was issued].

© Похабов Ю. П., 2020

УДК 621.9.06

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛОБРАБОТКИ ПУТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЗОНЫ РЕЗАНИЯ ИОНИЗИРОВАННЫМ В ВИХРЕВЫХ ПОТОКАХ ВОЗДУХОМ

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

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: ann7901@ya.ru

Представлены технологии механической обработки для повышения качества поверхностей деталей с использованием ионизированного воздуха в качестве СОТС.

Ключевые слова: механическая обработка, СОТС (смазочно-охлаждающие технологические средства), ионизированный воздух, режущий инструмент, стойкость инструмента, шероховатость поверхности.

DEVELOPMENT OF METALWORKING TECHNOLOGY BY COOLING THE CUTTING ZONE WITH IONIZED AIR IN VORTEX FLOWS

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

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
E-mail: ann7901@ya.ru

The article presents the technologies of mechanical processing to improve the quality of surfaces of parts using ionized air as cutting fluid.

Keywords: machining, cutting fluids (cutting lubricants), ionized air, cutting tools, tool life, surface roughness.

Разработка технологии металлообработки путем охлаждения зоны резания ионизированным в вихревых потоках воздуха

При резании почти вся механическая энергия, затрачиваемая на деформирование, разрушение происходит в режущем инструменте и заготовке, переходит в тепловую. Исследования процессов теплообразования при обработке резанием позволяют определить направление и интенсивность тепловых потоков, градиенты температур в контактных областях и характеристики температурного поля в зоне резания, деталью и окружающей средой, а также получить качественное и количественное представление о тепловом балансе при обработке металла [1].

К методам увеличения стойкости и повышения качества и эффективности металлообработки относится применение смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) [2].

Цель работы – совершенствование процесса металлообработки при технологическом обеспечении показателей качества поверхностного слоя и повышении стойкости режущего инструмента путем подачи в зону резания СОТС в виде ионизированного и охлажденного в вихревых потоках воздуха и разработка оборудования для его получения.

Предмет исследования – установление взаимосвязей технологического режима механической обработки и параметров ионизированного и охлажденного в вихревых потоках воздуха с показателями качества обрабатываемых поверхностей деталей и стойкостью режущего инструмента.

Технологические операции лезвийной обработки деталей из конструкционных сталей (30ХГСА, 12Х18Н10Т) и оборудование, генерирующее ионизированный и охлажденный воздух в качестве СОТС.

Возможность замены жидких СОТС на ионизированный воздух, полученный с помощью вихревых потоков, при лезвийной обработке деталей из конструкционных сталей.

Анализ научно-технической информации [3] показал, что влияние параметров ионизированного воздуха на показатели качества и ресурсосбережение при механической обработке не выявлен. Для исследования влияния концентрации аэроионов воздуха на величину шероховатости и стойкость режущего инструмента был создан стенд на базе токарно-винторезного станка 16К20 [4].

Исследование влияния концентрации аэроионов на стойкость режущего инструмента выполнялось с использованием режущего инструмента со сменными твердосплавными неперетачиваемыми пластинами.

Обеспечение смазочного эффекта, за счет образования оксидных пленок на ювенильных поверхностях, ввиду высокой физико-химической активности ионизированного воздуха, оказался сравнимым с обработкой при поливе СОТС, которая является более затратной финансово.

Вследствие распространения высокоскоростных методов механической обработки применение обработки ионизированным потоком воздуха неуклонно растёт [5]. Одним из эффективных способов повышения производительности (или стойкости инструмента)

при обработке является охлаждение зоны резания ионизированным воздухом.

Получение ионизированного воздуха с помощью вихревого ионизирующего устройства является технически рационально и в достаточной мере эффективно при механической обработке для компенсации негативного влияния перегрева в зоне резания на стойкость режущего инструмента и получения необходимой шероховатости обрабатываемой поверхности.

Положительное влияние величины концентрации ионов в ионизированном воздухе на стойкость режущего инструмента и шероховатость обработанной поверхности при механической обработке подтверждено экспериментально и связано с интенсивностью образования оксидных пленок на трущихся поверхностях в зоне резания.

Библиографические ссылки

1. Раднюк В. С. Повышение работоспособности быстрорежущего инструмента при использовании микрокапсулированных СОТС, имеющих в своем составе трибоактивный йод : дис. ... канд. техн. наук. М., 2000. 140 с.
2. Подураев В. Н., Татаринов А. С., Петрова В. Д. Механическая обработка с охлажденным ионизированным воздухом // Вестник машиностроения. 1991. № 11. С. 27–31.
3. Подураев В. Н., Татаринов А. С., Петрова В. Д. Механическая обработка с охлажденным ионизированным воздухом // Вестник машиностроения. 1991. № 11. С. 27–31.
4. Тарнопольский А. В. Вихревые теплоэнергетические устройства : монография. Пенза : Изд-во Пензенского государственного университета, 2007. 184 с.
5. Экологически безопасная технология резания / В. А. Поклад, В. А. Горелов, Ю. В. Полоскин и др. // Двигатели и экология : тез. докл. науч.-техн. симпозиума. М. : ВВЦ. 2000. С. 47–54.

References

1. Radnyuk V. S. *Povyshenie rabotosposobnosti bystrorezhushchego instrumenta pri ispol'zovanii mikrokap-sulirovannykh SOTS, imeyushchikh v svoem sostave triboaktivnyy yod*. [Improving performance of a high-speed tool at using microencapsulated cutting fluids containing triboactive iodine]: Thesis. PhD of Engineering sciences. M., 2000. 140 p.
2. Poduraev V. N., Tatarinov A. S., Petrova V. D. *Mekhanicheskaya obrabotka s okhlazhdennym ionizirovannym vozdukhom*. [Mechanical processing with cooled ionized air] // Bulletin of mechanical engineering. 1991. № 11. P. 27–31.
3. Poduraev V. N., Tatarinov A. S., Petrova V. D. *Mekhanicheskaya obrabotka s okhlazhdennym ionizirovannym vozdukhom*. [Mechanical processing with cooled ionized air] // Bulletin of mechanical engineering. 1991. № 11. P. 27–31.
4. Tarnopolsky A. V. *Vikhrevye teploenergeticheskie ustroystva*. [Vortex heat-power devices] : monograph. Penza : publishing house of the Penza state University, 2007. 184 p.
5. Akhmetzyanov I. D., Vereschaka A.S., KhaustvaO.V. *Ekologicheski bezopasnaya tekhnologiya rezaniya*. [Environmentally friendly cutting technology] / D. A. Poklad, V. A. Gorelov, U. V. Poloskin et al. // Engines and ecology Thesis rep. scientific and technical symposium. M. : VVC. 2000. P. 47–54.

© Рудич А. И., Лисин В. А., Терехина В. С., Жильский А. С., 2020

УДК 621.794.61: 629.78

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ РАСПОРА УЗЛОВ РАСКРЫТИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Е. В. Рыков¹, А. О. Штокал^{1*}, О. П. Баженова², В. А. Богачев², М. О. Шилкина²

¹Филиал акционерного общества «Научно-производственное объединение имени С. А. Лавочкина»
Российская Федерация, 248000, г. Калуга, ул. Октябрьская, д. 17

²Акционерное общество «Научно-производственное объединение имени С. А. Лавочкина»
Российская Федерация, 141402, Московская обл., г. Химки, ул. Ленинградская, д. 24

*E-mail: cuauthemoc1@yandex.ru

Проанализированы условия работы элементов распора узлов раскрытия космических аппаратов в процессе их транспортирования на целевую орбиту. По результатам изучения максимального износа площадки произведена оптимизация конструкции упора.

Ключевые слова: контактирующие поверхности, элементы распора, узел раскрытия, фреттинг, микроудар, адгезия, микродуговое окисление.

DESIGN OPTIMIZATION METHOD OF DEPLOYMENT UNITS THRUST ELEMENTS OF SPACECRAFT

E. V. Rykov¹, A. O. Shtokal^{1*}, O. P. Bazhenova², V. A. Bogachev², M. O. Shilkina²

¹The branch of public company “Lavochkin Association”
17, Oktyabr'skaya Str., Kaluga, 248000, Russian Federation

²Public company “Lavochkin Association”
24, Leningradskaya Str., Khimki, Moscow region, 141402, Russian Federation

*E-mail: cuauthemoc1@yandex.ru

We analyze the operation conditions of deployment units thrust elements of spacecraft during their transportation to the target orbit. The article considers the thrust design optimization based on the results of studying the maximum wear of the platform.

Keywords: contacting surfaces, trust elements, deployment unit, fretting, micro-impact, adhesion, microarc oxidation.

При эксплуатации в составе узлов космических аппаратов в условиях глубокого вакуума у контактирующих узлов, изготовленных из металлов, способных к образованию твёрдых растворов и сплавов, наблюдается повышенная склонность к адгезии. В частности, эту склонность проявляют металлы с кубической кристаллической решёткой. У взаимно нерастворимых металлов адгезионные взаимодействия проявляются значительно слабее. [1]

Экспериментальные данные показывают, что адгезия минимальна, если контактирующие материалы имеют высокую твёрдость, высокий модуль упругости, низкую пластичность [2].

Различный механизм взаимных воздействий металлических элементов узлов раскрытия космических аппаратов во время микроудара и фреттинга показывают разный характер повреждения контактных зон. Так, после испытания на удар на поверхности видны следы пластической деформации, которые представляют собой скопления материала по краям контактной зоны. Фреттинг-износ аналогичных исследуемых образцов показывает разрушение поверхности из-за адгезионного износа. Материал вырывается из поверхности и прижимается назад или прилипает к ответной контактной детали [3].

При описании режимов взаимного воздействия контактирующих пар узлов космических аппаратов условно принята разница между режимами фреттинга и трения исходя из условия $D = 2a$, где D – величина перемещения, a – радиус пятна контакта [4; 5].

Данные учёных из Европейского космического агентства [3] указывают на то, что оксидный слой на алюминиевых и титановых сплавах, сформированный микродуговым окислением, обеспечивает надёжную защиту от адгезии при фреттинг-нагрузении.

Для выявления зависимости стойкости МДО-покрытия на плоском элементе (площадке) к воздействию ответной сферической детали (упор) было разработано приспособление (рис. 1), моделирующее нагрузки на контактирующие поверхности при выведении космического аппарата ракетой-носителем «Протон-М» на целевую орбиту.

Исследования были проведены на пластине из алюминиевого сплава Д16АТ с толщиной МДО-покрытия 120 мкм в точке контакта. Сферические упоры изготовлены из стали 20Х13 и имеют диаметры 18, 22, 25, 30 мм. Для замера максимального износа МДО-покрытия с использованием металлографического микроскопа получали профилограммы зон износа. Полученные экспериментальные данные сведены в таблице.

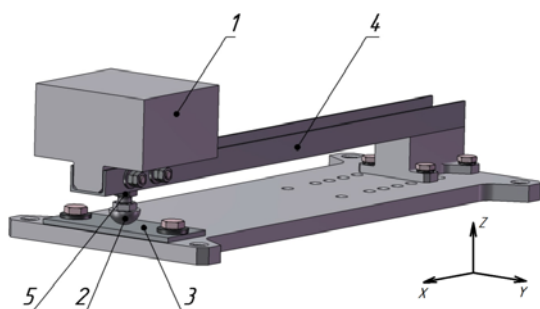


Рис. 1. Приспособление, моделирующее нагрузки на контактирующие поверхности сфера-плоскость: 1 – имитатор нагрузки; 2 – упор; 3 – площадка; 4 – балка; 5 – контргайка; X, Y, Z – оси приложения вибрационных нагрузок

Максимальный износ МДО-покрытия площадки

Диаметр упора d , мм	18	22	25	30
Максимальная глубина износа S , мкм	175,658	170,627	236,946	285,945

По полученным результатам методом наименьших квадратов построим график зависимости максимального износа МДО-покрытия площадки от диаметра сферы упора (рис. 2) и вычислим уравнение квадратичной регрессии.

Искомое уравнение квадратичной регрессии имеет вид $S = 0,6062d^2 - 19,1014d + 317,3747$.

Очевидно, что оптимальный диаметр упора будет при минимальной износе МДО-покрытия площадки. Для его нахождения возьмём первую производную от найденной функции $S' = 1,2124d - 19,1014$. Приравняв значение первой производной к нулю, найдём оптимальный диаметр упора $d = 15,76$ мм.

Описанная методика позволяет оптимизировать диаметр сферы упора для заранее заданных материала подложки площадки и технологии формирования МДО-покрытия, обуславливающей его структуру и химический состав. Минимизация износа МДО-покрытия при выведении космического аппарата на целевую орбиту подвysит надёжность работы узлов раскрытия, особенно с отложенным срабатыванием, путём предотвращения контакта металлических поверхностей элементов распора.

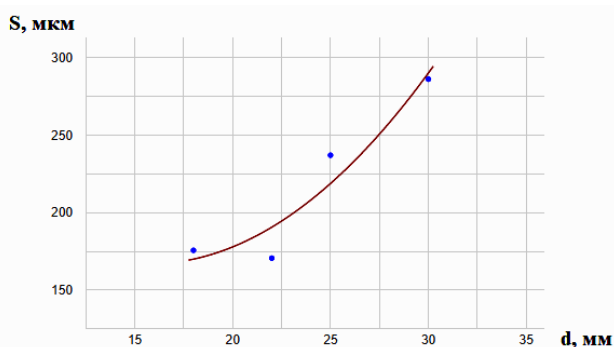


Рис. 2. Зависимость максимального износа МДО-покрытия площадки от диаметра сферы упора

Библиографические ссылки

1. Нусимов М. Д. Влияние космического вакуума на материалы и устройства научной аппаратуры. М. : Машиностроение, 1987. С. 12.
2. Pattee H. E., Monroe R. E. Adhesion in the space environment. Battelle Memorial Institute Columbus Laboratories, 1966. 137 p.
3. Assessment of Cold Welding between Separable Contact Surfaces due to Impact and Fretting under Vacuum (ESA STM-279 November 2009) / A. Merstallinger, M. Sales, E. Semerad, B. D. Dunn. ESA Communication Production Office, 2009. P. 12–17.
4. Изнашивание композиционных керамических покрытий, полученных методом микродугового оксидирования, для работы в экстремальных условиях ГТД / А. В. Джабаров, А. В. Ионов, Р. А. Куколин, И. А. Николаев // Научно-технический вестник Поволжья. 2017. № 6. С. 99.
5. Ляховецкий М. А. Исследование износо- и фреттингостойкости оксидов алюминия и циркония, сформированных методом микродугового оксидирования для защиты элементов двигателей и энергоустановок : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 25 с.

References

1. Nusimov M. D. *Vliyanie kosmicheskogo vakuuma na materialy i ustroystva nauchnoy apparatury* [Influence of space vacuum on materials and devices of scientific equipment]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, p. 12. (In Russ.)
2. Pattee H. E., Monroe R. E. Adhesion in the space environment. Battelle Memorial Institute Columbus Laboratories, 1966, 137 p.
3. Merstallinger A., Sales M., Semerad E., Dunn B. D. Assessment of Cold Welding between Separable Contact Surfaces due to Impact and Fretting under Vacuum (ESA STM-279 November 2009). ESA Communication Production Office, 2009, p. 12–17.
4. Dzhabarov A. V., Ionov A. V., Kukolin R. A., Nikolaev I. A. [Wear of composite ceramic microarc oxidation coatings for GTE extreme conditions]. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzhya*. 2017, no. 6, p. 99. (In Russ.)
5. Lyakhovetskiy M. A. *Issledovanie iznoso- i frettingostoykosti oksidov alyuminiya i tsirkoniya, sformirovannykh metodom mikrodugovogo oksidirovaniya dlya zashchity elementov dvigateley i energoustanovok*. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. [Investigation of the wear and fretting resistance of aluminum and zirconium oxides formed by micro-arc oxidation to protect the elements of engines and power plants. Cand. techn. sci. diss. abst.]. Moscow, 2014, 25 p.

© Рыков Е. В., Штокал А. О., Баженова О. П., Богачев В. А., Шилкина М. О., 2020

УДК 629.7.01

РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАЗОЧАСТОТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ХОЛОДОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Ю. А. Семейных¹, А. Г. Герилевич¹, В. В. Двирный²

¹Политехнический институт «Сибирский федеральный университет»

Межинститутская базовая кафедра «Прикладная физика и космические технологии»
Российская Федерация, 662971, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Кирова, 12а

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

¹E-mail: julya_kash@mail.ru

Проведен анализ существующих систем обеспечения теплового режима при проведении наземных испытаний и экспериментальной отработки. Предложен проект по усовершенствованию конструкции системы для обеспечения теплового режима.

Ключевые слова: космический аппарат, система обеспечения теплового режима, термоиспытания, испытательное оборудование, система терморегулирования.

DEVELOPMENT OF THE PROJECT OF THE SYSTEM FOR ENSURING THE THERMAL REGIME OF THE SPACECRAFT USING PHASE-FREQUENCY CONTROL OF COOLING CAPACITY

Iu. A. Semeinykh¹, A. G. Gerilovich¹, V. V. Dvirnyy²

¹Polytechnic Institute "Siberian Federal University"

The interinstitutional base Department "Applied Physics and Space Technologies"
12a, Kirov Str., Krasnoyarsk region, Zheleznogorsk, 662971, Russian Federation

²Joint-Stock Company "Academician M. F. Reshetnev" Information Satellite Systems"
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

¹E-mail: julya_kash@mail.ru

The analysis of existing systems for ensuring the thermal regime during ground tests and experimental testing is carried out. A project is proposed to improve the design of the system to ensure the thermal regime.

Keywords: spacecraft, system of thermal regime security, thermo testing, test equipment, thermal control system.

При нахождении космического аппарата в космосе и его эксплуатации, тепловой режим бортовой аппаратуры осуществляется за счет излучения тепла от радиационных панелей в космическое пространство. В то время как, при проведении наземных испытаний и экспериментальной отработки, тепло, выделяемое от оборудования, не полностью отводится естественным излучением и термоконвекцией, что может привести к поломке приборов и аппаратуры. Поэтому, при проведении наземных испытаний космических аппаратов (КА), необходимо применение систем забора тепла и охлаждения воздуха, чтобы тепло, передаваемое на поверхности приборных панелей, отводилось с помощью созданной системы по охлаждению воздуха [1; 2].

Анализ существующих систем обеспечения теплового режима (СОТР): патенты РФ № 2144893, № 2233773, № 2286291 [3; 4; 5] и СОТР, производства АО «НПО ПМ МКБ» [6] в период с 2016–2019 г., показал, что у методов регулирования холодопроизводительности в этих СОТР есть существенные недостатки:

а) метод пусков и остановок компрессора холодильной машины:

- 1) низкая точность регулирования температуры;
 - 2) низкий ресурс работоспособности компрессора, а, следовательно, необходимо обеспечивать резервирование с помощью дополнительного компрессора;
 - 3) высокая стоимость;
- б) механическое регулирование работы компрессора:

- 1) низкая надежность байпасного устройства, вследствие частого срабатывания в установившемся режиме;
- 2) низкий ресурс компрессора, т. к. даже при отсутствии пусков компрессор постоянно работает;
- 3) высокое энергопотребление.

Плюсом применения данного метода является точное поддержание заданной температуры.

При разработке проекта нового СОТР предлагается усовершенствовать конструкцию, применив способ регулирования холодопроизводительности, избежав при этом вышеперечисленные недостатки – изменить частоту вращения компрессора. Это позволит компрессору работать с переменной мощностью, тем

самым сохраняя высокий ресурс своей работы, и повысит энергоэффективность всей установки.

СОТР представляет собой воздушно-нагнетательный контур, в состав которого в зависимости от индивидуальных требований заказчика могут входить системы:

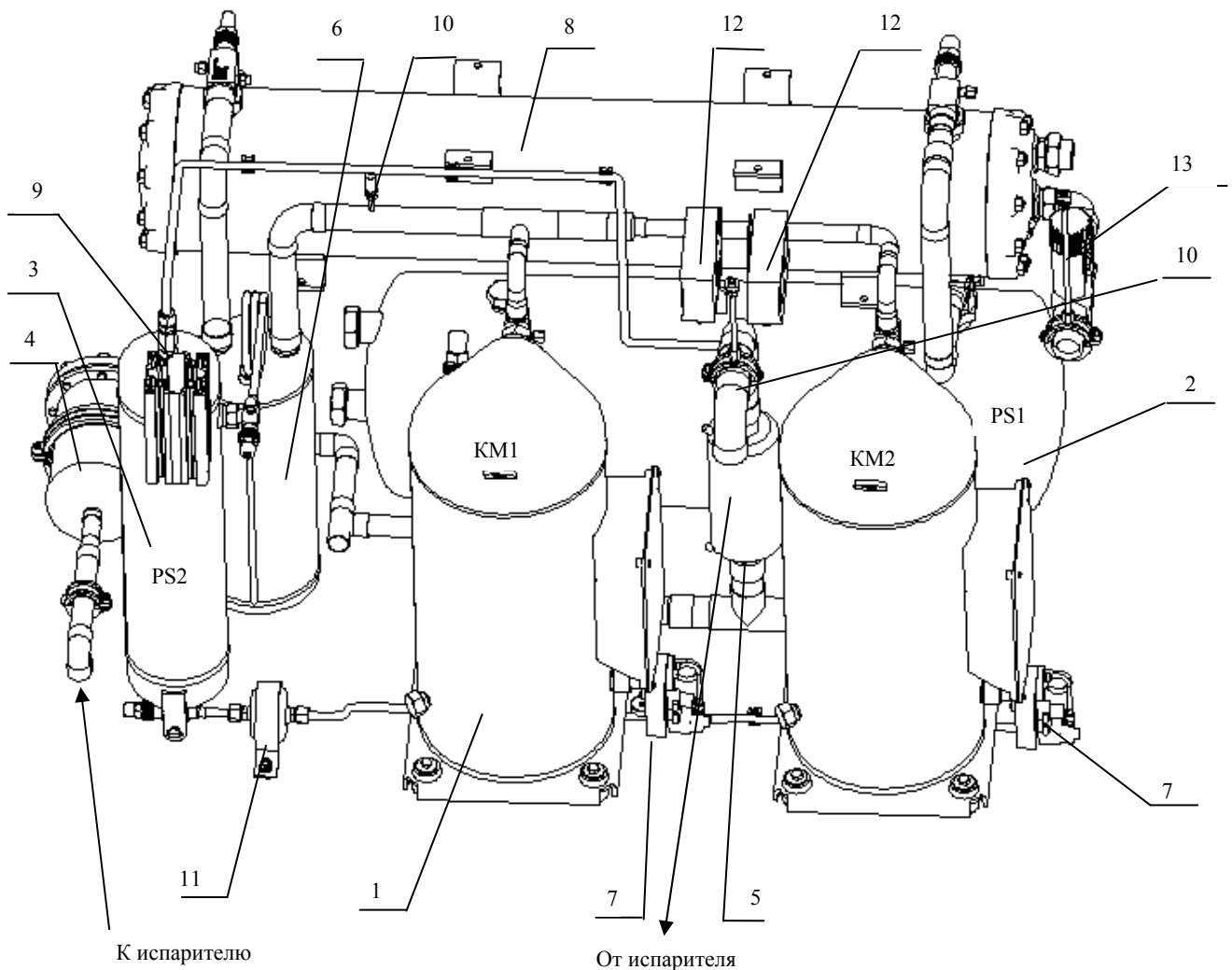
- холодильная машина (включает шкаф управления, трубопроводы для соединения с охладителем, шумопоглощающий чехол, рабочую жидкость – фреон);
- канальный вентилятор;
- канальный воздухоохладитель;
- соединительные воздуховоды (между охладителем, вентилятором, и коробами рабочего места);
- система управления (включает пульт управления и персонально электронно-вычислительную машину (ПЭВМ));
- термоанемометр (датчик скорости воздушного потока);
- термопреобразователи сопротивления;
- датчики давления;

комплект запасных частей и принадлежностей (ЗИП).

Подготовка воздуха в системе осуществляется следующим образом – поступающий из окружающего пространства рабочего помещения воздух охлаждается в межтрубной полости теплообменника каждого контура за счет циркуляции хладагента в трубной полости [7]. К трубной полости теплообменника присоединяется холодильная машина (ХМ), обеспечивающая циркуляцию хладагента. Охлажденный воздух нагнетается вентиляторами в воздуховоды панелей КА, создавая тем самым вынужденную конвекцию воздуха вдоль радиационных поверхностей панелей КА.

Контур ХМ предназначен для обеспечения температуры охлаждающего воздуха и отвода тепла от объекта испытаний.

Контур ХМ имеет водяное охлаждение. Конструкция ХМ приведена на рисунке.



Конструкция ХМ без каркаса:

- 1 – компрессор BITZERESH736Y-40S (KM1, KM2); 2 – горизонтальный ресивер BITZER F562N (PS1); 3 – ресивер масляный FRIGOPOINTFP-OR-8,0 (PS2); 4 – фильтр-осушитель AlcoADKS-Plus 487T; 5 – фильтр-осушитель AlcoASF-75S13; 6 – маслоотделитель; 7 – электронный регулятор уровня масла; 8 – конденсатор BITZER K573H; 9 – дифференциальный обратный клапан; 10 – датчик давления; 11 – фильтр масляный; 12 – реле давления Alco; 13 – регулятор давления конденсации

Компрессор 1 отсасывает газообразный хладагент из испарителя, через фильтр-осушитель 4. В компрессоре происходит нагнетание хладагента до давления конденсации. Газообразный хладагент из компрессора 1 через маслоотделитель 6 поступает на вход водяного конденсатора К573Н, где газообразный хладагент переходит в жидкое состояние. Жидкий хладагент поступает в ресивер 2, где происходит его накопление. Из ресивера 2 через запорный вентиль, хладагент поступает в фильтр-осушитель 4, где происходит удаление остатков влаги, примесей и загрязнений, а затем проходит через смотровое стекло и поступает на каналный воздухоохладитель ОКФ, где дросселируется терморегулирующим вентилем, установленным на входе в каналный воздухоохладитель. В каналном воздухоохладителе хладагент кипит, отводя тепло от объекта охлаждения.

Разработка проекта новой системы регулирования холодопроизводительности без использования нагревателей в конструкции ХМ планируется с применением теории механизмов и машин, электротехники и обратного цикла Карно. Для расчета и подбора холодильного оборудования предлагается использовать программу BITZER SOFTWARE и «Компас-3D».

Изменения коснутся схемы управления ХМ СОТР, в которой в настоящее время производителями используется способ регулирования холодопроизводительности методом пусков и остановок компрессора ХМ. Предлагается разработка новой схемы управления ХМ с использованием преобразователя частоты.

Разработка проекта новой системы регулирования холодопроизводительности без использования нагревателей путем введения фазочастотного регулирования в СОТР при проведении наземных испытаний и экспериментальной отработки бортовой аппаратуры КА в сравнении с традиционным способом регулирования температуры позволит поддерживать точные параметры температуры и продлить ресурс использования ХМ СОТР.

Кроме того, новая конструкция холодильной машины в составе СОТР позволит уменьшить габариты конструкции, потребляемую мощность, снизить затраты за счет экономии электроэнергии и расхода воды.

Библиографические ссылки

1. Основы теории полета космических аппаратов : учеб. пособие / В. С. Авдеевский, Б. М. Антонов, Н. А. Анфимов и др. ; под ред. Г. С. Нариманова, М. К. Тихонравова. М. : Машиностроение, 1972. 607 с.
2. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 487 с.
3. Пат. 2144893. Российская Федерация № 98108971/28 Система обеспечения теплового режима / В. П. Акчурин, Ю. М. Голованов, А. Е. Дюдин,

О. В. Загар, В. И. Халиманович, О. В. Шилкин ; заявл. 18.05.1998 ; опубл. 27.01.2000.

4. Пат. 2233773. Российская Федерация № 2002104523. Система обеспечения теплового режима / Г. В. Дмитриев, Ю. М. Голованов, А. Е. Дюдин, О. В. Загар, А. В. Томчук, О. В. Шилкин ; заявл. 19.02.2002 ; опубл. 10.08.2004.

5. Пат. 2286291. Российская Федерация № 2005107384. Система обеспечения теплового режима / А. Г. Козлов, В. А. Бартенев, Г. А. Кесельман, В. Г. Шелудько, В. И. Халиманович, В. П. Акчурин и др. ; заявл. 16.03.2005 ; опубл. 27.10.2006.

6. АО «НПО ПМ – Малое Конструкторское Бюро» [Электронный ресурс] : офиц. сайт. 2019. URL: <http://www.npopm-mkb.ru/show/text/11> (дата обращения: 13.12.2019).

7. Суховольская Ю. П. Космические вехи // Сб. науч. тр., посвящ. 50-летию создания ОАО «ИСС» им. акад. М. Ф. Решетнёва». Красноярск : ИП Суховольская Ю. П., 2009. С. 70–74

References

1. Osnovy teorii poleta kosmicheskikh apparatov: uchebnoe posobie [Fundamentals of the theory of spacecraft flight] / V. S. Avdееvskiy, B. M. Antonov, N. A. Anfimov et al. ; pod red. G. S. Narimanova, M. K. Tikhonravova. M. : Mashinostroenie, 1972. 607 p.
2. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proyektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [Basics of the design of spacecraft information support] / Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2011. 487 p.
3. Patent RF, № 2144893 / V. P. Akchurin, Yu. M. Golovanov, A. E. Dyudin, O. V. Zagar, V. I. Khalimanovich, O. V. Shilkin. *Sistema obespecheniya teplovogo regima* [System of thermal regime security]. 1998.
4. Patent RF, № 2233773 / G. V. Dmitriev, Yu. M. Golovanov, A. E. Dyudin, O. V. Zagar, A. V. Tomchuk, O. V. Shilkin. *Sistema obespecheniya teplovogo regima* [System of thermal regime security]. 2002.
5. Patent RF, № 2286291 / A. G. Kozlov, V. A. Bartenev, G. A. Keselman, V. G. Sheludko, V. I. Khalimanovich, V. P. Akchurin. *Sistema obespecheniya teplovogo regima* [System of thermal regime security]. 2005.
6. JSC NPO PM – SMALL DESIGN BUREAU [Electronic resource]. URL: <http://www.npopm-mkb.ru/show/text/11> (access: 13.12.2019).
7. Sukholovskaya Yu. P. *Kosmicheskiye vekhi* : sb. nauch. tr., posvyashchennuyu 50-letiyu sozdaniya OAO «ISS» im. akademika M. F. Reshetnova». Krasnoyarsk : IP Sukholovskaya Yu. P., 2009. P. 70–74 (In Russ.)

© Семейных Ю. А., Герилович А. Г., Двирный В. В., 2020

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРОТКИХ ЛИНЕЙНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ ПУТЕМ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

А. В. Сeryakov, А. П. Алексеев

ООО «РУДЕТРАНССЕРВИС»

Российская Федерация, 173003, г. Великий Новгород, ул. Санкт-Петербургская, 64

E-mail: seryakovav@yandex.ru

Представлены результаты исследований путем решения обратной задачи теплопроводности теплоемкости испарителя коротких линейных тепловых труб (ЛТТ) с выполненным в виде сопла Лавала паровым каналом и предназначенных для охлаждения космических аппаратов и спутников со строгой регламентацией взлетной массы.

Обратная задача теплопроводности, теплоемкость испарителя, тепловое сопротивление ЛТТ.

SHORT LINEAR HEAT PIPES INVESTIGATION BY THE INVERSE THERMAL CONDUCTIVITY PROBLEM SOLVING

A. V. Seryakov, A. P. Alekseev

LLC «RUDETRANSSERVICE»

64, St. Petersburg Str., Veliky Novgorod, 173003, Russian Federation

E-mail: seryakovav@yandex.ru

The results of studies by solving the inverse thermal conductivity problem the heat capacity of short linear heat pipes (HP's evaporator) with a Laval nozzle – liked vapour channel and intended for cooling spacecraft and satellites with strict take-off mass regulation are presented.

Keywords: Inverse thermal conductivity problem (ITCP), evaporator heat capacity, thermal resistance of the short linear heat pipes (SLHP).

Вопросы повышения эффективности и увеличения коэффициента теплопередачи коротких низкотемпературных ЛТТ, предназначенных для охлаждения теплонапряженных конструкций космических аппаратов и спутников с жесткой регламентацией взлетной массы представляет собой большой практический интерес. Применение коротких линейных ТТ оправдано в случае конструктивной невозможности размещения контурных ТТ а также для повышения долговременной устойчивости и надежности систем охлаждения, в которых отсутствуют распределенные подводные и отводящие линии контурных ТТ.

Для исследования теплового сопротивления и теплоемкости [1; 2], характеризующих внутренние свойства, были изготовлены короткие ЛТТ с выполненным в виде сопла, близкого к соплу Лавала паровым каналом, подробное описание которых было дано ранее [3–5]. Все измерения тепловых характеристик в стационарном режиме проводились с использованием двух ЛТТ, измерительной и эталонной [3], рис. 1. Основная ЛТТ, называемая измерительной, левая на рис. 1, заполнена диэтиловым эфиром $C_4H_{10}O$, а эталонная, полностью идентичная основной, заполняется осушенным воздухом под давлением 1 бар с температурой точки росы ниже 233,15 К (–40 °С). Коэффициент теплопередачи $K_{ТТ2}$ второй ЛТТ не превышает 0,15 % от первой (измерительной) ЛТТ и не учитывается. Вторая ЛТТ, полностью идентичная первой, вы-

полняет опорную функцию при измерениях с помощью высокочастотных генераторов и емкостных датчиков толщины пленки конденсата в первой измерительной ЛТТ [4; 5].

Передачу тепла в короткой ЛТТ в адиабатическом вакуумном калориметре (10^{-3} мм. рт. ст.) можно оценить с помощью одномерного нелинейного уравнения теплопроводности, теплофизические коэффициенты в котором, а именно тепловое сопротивление $R_{ТТ}$ и теплоемкость $C_{ТТ}$ зависят от температуры. Распределение одномерного температурного поля $t(\bar{z}, \tau)$ в ЛТТ применяют для решения стандартного уравнения теплопроводности следующим образом [1; 2]:

$$\frac{\partial}{\partial \bar{z}} \frac{1}{R_{ТТ}(t)} \frac{\partial t(\bar{z}, \tau)}{\partial \bar{z}} = C_{ТТ}(t) \dot{t}(\bar{z}, \tau);$$

$$\bar{z} = \frac{z}{L_{ТТ}}; R_{ТТ}(t) = \frac{L_{ТТ}}{\lambda(t)F(\bar{z})_{ev}}, \frac{K}{W}; \quad (1)$$

$$C_{ТТ}(t) = \rho_{ТТ} c_{ТТ}(t) L_{ТТ} F(\bar{z}), \frac{1}{K},$$

где $R_{ТТ}(t)$ – тепловое сопротивление ТТ, К/В; $C_{ТТ}(t)$ – теплоемкость ТТ, J/К; $c_p(t)$ – удельная теплоемкость ТТ, J/kg·К; $\rho_{ТТ}$ – плотность ТТ, kg/m³; $L_{ТТ}$ – длина ТТ, m; $F(\bar{z})$ – площадь поперечного сечения ТТ, m²; $\bar{z} = z / L_{ТТ}$ – безразмерная координата; $\lambda(t)$ – коэффициент теплопроводности ТТ, W/m·К; \dot{t} – скорость роста температуры, К/s.

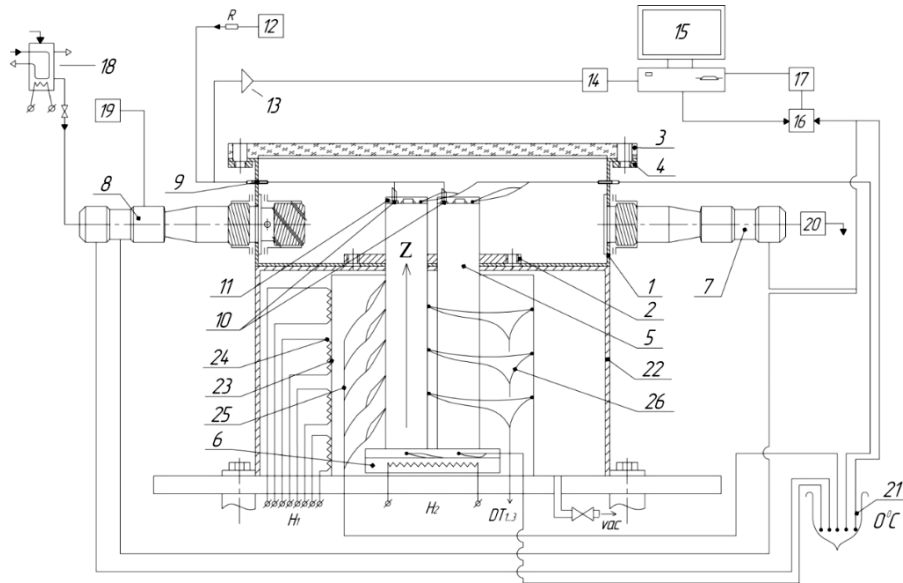


Рис. 1. Схема проведения измерений теплового сопротивления и теплоемкости коротких ЛТТ при монотонном нагреве в вакуумном адиабатическом калориметре, совмещенном с вихревым проточным калориметром:

1 – вихревой проточный калориметр; 2 – фланец крепления ТТ; 3 – стеклянная крышка; 4 – крепление крышки; 5 – опорная ТТ; 6 – плоский резистивный нагреватель; 7 – сливной штуцер калориметра; 8 – входной штуцер – завихритель калориметра; 9 – герметичный ввод измерительных проводов; 10 – емкостные датчики для измерения толщины пленки жидкого конденсата; 11 – измерительный и эталонный генераторы, расположенные на верхних торцевых крышках ТТ; 12 – внешний цифровой генератор; 13 – усилитель мощности; 14 – цифровой осциллограф; 15 – компьютер; 16 – управляемый переключатель; 17 – цифровой вольтметр; 18 – сосуд постоянного напора воды; 19 – генератор воздушных пузырьков; 20 – расходомер; 21 – сосуд Дьюара; 22 – вакуумная камера; 23 – адиабатическая оболочка; 24 – охранные нагреватели; 25 – дифференциальные термопары для измерения поверхностной температуры ТТ; 26 – дифференциальные термопары адиабатической системы ЛТТ

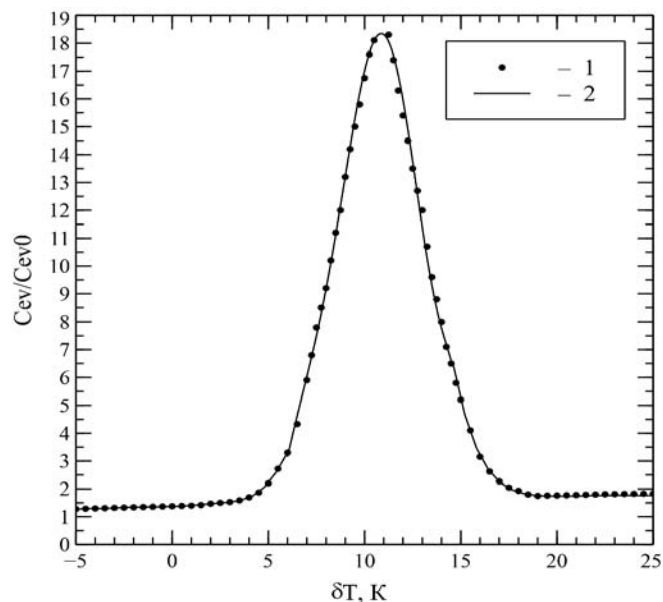


Рис. 2. Расчетное значение теплоемкости испарителя ТТ C_{ev} / C_{ev0} : C_{ev} – теплоемкость насыщенного диэтиловым эфиром испарителя, Дж/К; C_{ev0} – теплоемкость испарителя опорной ЛТТ, заполненного осушенным воздухом, Дж/К: 1 – черные точки, значения относительной теплоемкости нижнего фрагмента короткой ТТ (фрагмента испарителя) с выполненным в виде сопла Лавала паровым каналом, полученные путем решения обратной задачи теплопроводности с шагом по температуре $0,5 \text{ K } \delta t = T_{ev} - T_B$, при начинающемся процессе кипения диэтилового эфира; 2 – полином десятой степени для сглаживания полученных точек теплоемкости испарителя

Уравнение (1) распространения теплового потока $q_{ev}(\bar{z}, \tau_k)$ вдоль оси z может быть разделено и представлено в виде системы двух уравнений (2) для расчета теплоемкости $C_{ТТк}(t)$ и теплового потока $q_{ev}(\bar{z}, \tau_k)$, величина которых связана с тепловым сопротивлением $R_{ТТ}$ и для момента времени τ_k может быть представлено в следующем виде:

$$\begin{aligned} \bar{z}C_{ТТк}(t)\dot{t} + \frac{q_{ev}(\bar{z}, \tau_k)}{\delta\bar{z}} &= 0; \\ q_{ev}(\bar{z}, \tau_k) &= -\bar{z} \frac{L_{ТТ}}{R_{ТТ}F(\bar{z})} \frac{\delta\tau(\bar{z}, \tau)}{\delta\bar{z}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Используя опытные значения теплового сопротивления $R_{ТТ}(\delta t)$, представленные в виде полинома пятой степени величины перегрева испарителя относительно температуры кипения диэтилового эфира при атмосферном давлении $\delta t = T_{ev} - T_B$, удастся провести вычисления теплоемкости нижнего фрагмента, включая испаритель ЛТТ, см. рис. 2.

Библиографические ссылки

1. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука 1964. 488 с.
2. Платунов Е. С. Теплофизические измерения в монотонном режиме. Л.: Энергия. 1973. 144 с.
3. Seryakov A. V. Intensification of heat transfer processes in the low temperature short heat pipes with Laval

nozzle formed vapour channel//American Journal of Modern Physics. 2018. Vol. 7, № 1. P. 48–61.

4. Seryakov A. V. Numerical modeling of the vapour vortex // Journal of the high energy physics, gravitation. 2019. № 5. P. 218–234.

5. Seryakov A. V. Computer modeling of the vapour vortex orientation changes in the short low temperature heat pipes // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 140. P. 243–259.

References

1. Karslou G., Eger D. Teploprovodnost' tverdykh tel. M.: Nauka 1964. 488 p.
2. Platonov E. S. Teplofizicheskie izmereniya v monotonnom rezhime. L.: Energy. 1973. 144 p.
3. Seryakov A. V. Intensification of heat transfer processes in the low temperature short heat pipes with Laval nozzle formed vapour channel//American Journal of Modern Physics. 2018. Vol. 7, № 1. P. 48–61.
4. Seryakov A. V. Numerical modeling of the vapour vortex // Journal of the high energy physics, gravitation. 2019. № 5. P. 218–234.
5. Seryakov A. V. Computer modeling of the vapour vortex orientation changes in the short low temperature heat pipes // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 140. P. 243–259.

© Серяков А. В., Алексеев А. П., 2020

УДК62-278

РАЗРАБОТКА УПРУГИХ ШАРНИРОВ ДЛЯ РАСКРЫТИЯ МЕМБРАННЫХ АНТЕНН

Г. С. Терлецкий, А. О. Зыков, В. Б. Тайгин, И. С. Морозков, О. Б. Гоцелюк

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52*Представлены краткие результаты разработки зеркальной мембранной антенны с применением упругих шарнирных элементов для обеспечения надежного раскрытия рефлектора.**Ключевые слова: упругие шарнирные элементы, мембранные антенны, рефлектор, механизм раскрытия, космический аппарат, трансформируемые антенны.***DEVELOPMENT OF ELASTIC JOINTS FOR THE DEPLOYABLE MEMBRANE ANTENNAS.**

G. S. Terletsky, A. O. Zykov, V. B. Taigin, I. S. Morozkov, O. B. Gocelyuk

Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation*The article presents brief results of the development of the mirror membrane antennas using elastic hinged elements to ensure reliable deployment of the reflector.**Keywords: elastic hinge elements, membrane antennas, reflector, spacecraft, transformable antennas.*

При разработке современных спутников связи наиболее остро стоит вопрос компактного размещения антенно-фидерных устройств на антенной панели космического аппарата. Для компактного размещения применяется множество видов складывания и трансформации рефлекторов антенн. Одним из способов складывания рефлектора является гибко-шарнирное складывание.

Наиболее часто для трансформации рефлектора применяют зонтичный тип складывания, но данный вид складывания имеет ряд недостатков по отношению к гибко-шарнирному в частности коэффициент трансформации зонтичной антенны ограничен длиной спицы. В гибко-шарнирном методе за счет применения упругих шарниров на самой спице коэффициент трансформации увеличивается многократно.

При проектировании трансформируемой зеркальной антенны были приняты следующие исходные данные.

Формула параболоида вращения $X^2 + Y^2 = 4FZ$ (где F – фокусное расстояние равно 700 мм).

Апертура 1150 мм. Отверстие в рефлекторе 100–150 мм.

Габариты в транспортном положении 200×250 мм.

На основании исходных данных был разработан мембранный трансформируемый рефлектор с гибкими шарнирами (рис. 1). В данном мембранном рефлекторе представлено два вида шарниров, корневого высоко нагруженный шарнир состоящий из двух параллельных пластин с желобчатым профилем и двух диагональных пластин – подкосов, расположенных по краям шарнира. Для уменьшения напряжений при переводе шарнира из рабочего в сложенное пластины закреплены на металлических фитингах.

Концевой шарнир аналогичен корневому и состоит из двух параллельных пластин с желобчатым профилем.

Каждая спица состоит из одного корневого звена, одного концевой звена, Концевого шарнира, концевой шарнира. Спицы закрепляются на кольцевом основании рефлектора, по периметру спицы скреплены шпангоутом для большей прецизионности и размеростабильности в рабочем положении. При раскрытии рефлектора (рис. 2) спицы раскладываются под действием силы упругости шарниров и доходя до рабочего положения фиксируются за счет увеличения строительной высоты желобчатого профиля.

Необходимое и достаточное количество спиц рефлектора определяется требованиями жесткости, точностью профиля и данными о свойствах мембраны. В работе выполнен расчет собственных частот силовой конструкции рефлектора мембранной антенны в рабочем положении, выполненный из 30 и 16 спиц, соединенных концевым шпангоутом [1–3].

Анализ поведения конструкции при изменении количества спиц в силовом каркасе рефлектора показал, что увеличение угла между спицами приводит к колебаниям усиливающего обода как плоской полосы, а также указывает на необходимость детальной проработки концевой шпангоута и корневого гибкого шарнира при проектировании конструкции по заявляемым требованиям.

Концепция мембранного гибко-шарнирного рефлектора относится к категории инновационных разработок для перспективных космических аппаратов гражданского и оборонного назначения нового поколения.

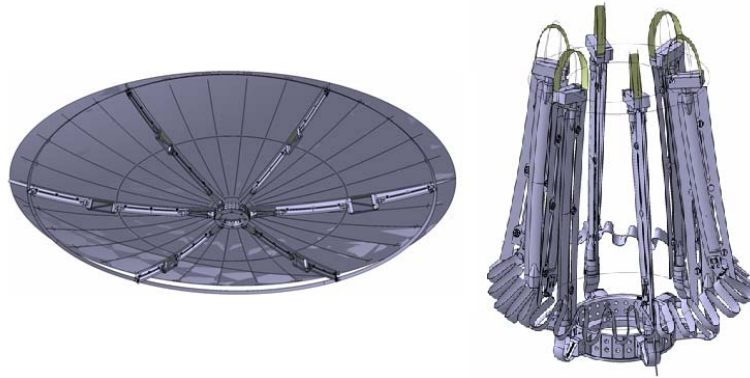


Рис. 1. Модель мембранного рефлектора в рабочем и сложенном положении

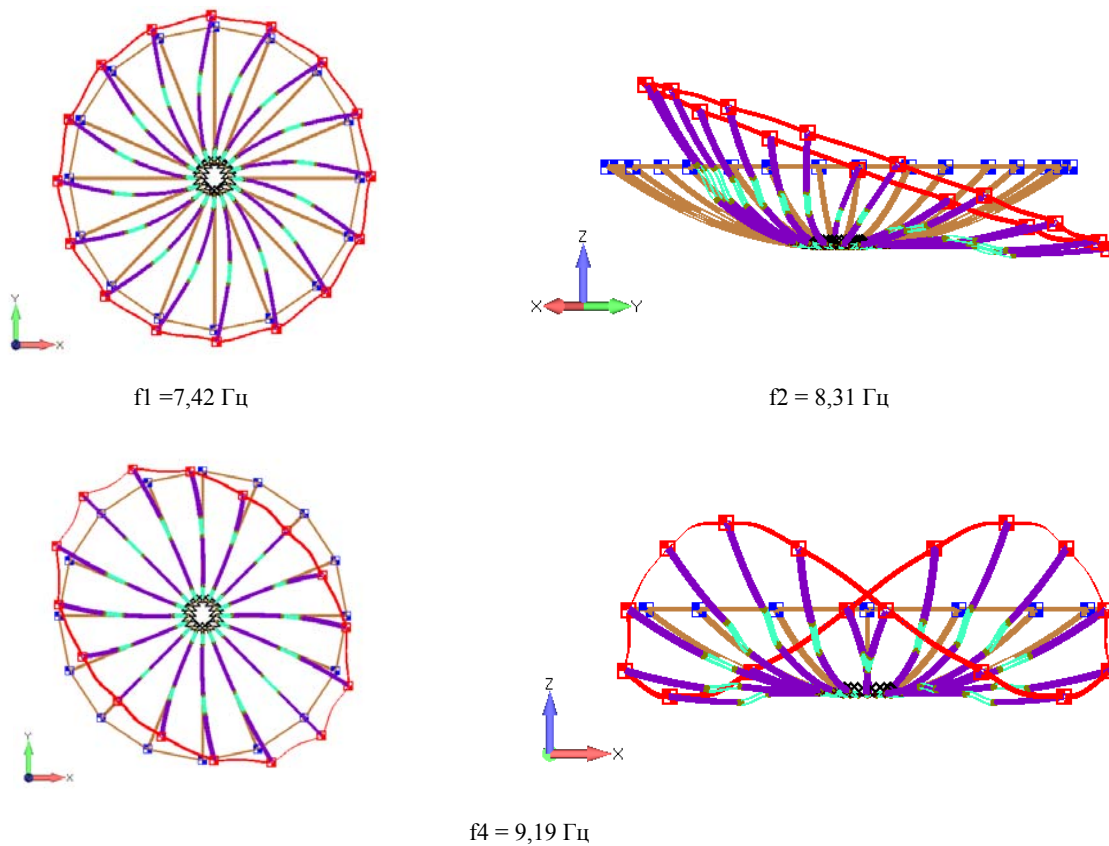


Рис. 2. Формы собственных колебаний каркаса мембранной антенны из 16 спиц

Предложенная конструкция обладает высокой технологичностью, низкими удельно массовыми характеристиками и обеспечивает высокий коэффициент трансформации при сохранении заданной точности рабочей поверхности антенны, что гарантирует более эффективную компоновку антенно-фидерной системы космического аппарата и повышение ее технических характеристик.

Библиографические ссылки

1. Nojima T. Origami modeling of functional structures based on organic patterns // Master's thesis,

Graduate School of Kyoto University, Kyoto, Japan, 2002.

2. Accommodating thickness in origami-based deployable arrays / S. A. Zirbel, R. J. Lang, M. W. Thomson et al. // *Journal of Mechanical Design*. 2013. Vol. 135. P. 111005.

3. Jiménez I. M. High-strain composites and dual-matrix composite structures // California Institute of Technology. 2014.

© Терлецкий Г. С., Зыков А. О., Тайгин В. Б., Морозков И. С., Гоцелюк О. Б., 2020



Секция

**«ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ПРОИЗВОДСТВО
И ИСПЫТАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ»**

РАСЧЕТ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Р. Н. Агаев, Р. М. Калинин, И. Д. Камбалин, А. В. Коротеев, А. Г. Ганжин

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

Необходимыми параметрами для расчета и оценки летно-технических характеристик проектируемого беспилотного летательного аппарата являются характеристики рассчитываемой силовой установки.

Ключевые слова: силовая установка, расчет, проточная часть.

CALCULATION OF THE FLOW PART OF THE POWER PLANT FOR AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

R. N. Agaev, R. M. Kalinin, I. D. Kambalin, A. V. Koroteev, A. G. Ganjin

Military educational scientific center air force «Air force academy named after
professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin»
54a, Old Bolsheviks Str., Voronezh, 394064, Russian Federation
E-mail: nurad@yandex.ru

The necessary parameters for calculating and evaluating the flight characteristics of the designed unmanned aerial vehicle are the characteristics of the calculated power plant.

Keywords: power plant, design, thrust, calculation, flow part.

Современные технологии и перспективы их развития позволяют беспилотным летательным аппаратам (БпЛА) успешно выполнять задачи, лежавшие ранее на других типов авиации.

Составляющие, которые позволяют оценить эффективность применения БпЛА, следующие: летно-технические характеристики (ЛТХ), стоимость обслуживания и эксплуатации, способы управления и передачи полученных данных, возможность автономного выполнения задач и др.

Необходимыми параметрами для расчета и оценки ЛТХ являются:

- геометрические параметры планера БпЛА, а также составных частей;
- характеристики рассчитываемой силовой установки (СУ);
- массовые весомости различных вариантов применения.

Для проведения расчетов характеристик СУ и параметров проточной части двигателя предполагается, что [1]:

- а) во всех проточных элементах газо-воздушного тракта течение является установившимся;
- б) отсутствует теплообмен между воздухом (газом), проходящим по тракту двигателя, и окружающей двигатель средой;
- в) воздух подчиняется уравнению состояния идеального газа с газовой постоянной $R = 287$ Дж/(кг*К)

и имеет показатель адиабаты $k = 1,4$, что соответствует теплоемкости $C_p = 1\,004,5$ Дж/(кг*К);

г) уравнению состояния идеального газа также подчиняются продукты сгорания в газотурбинных двигателях;

д) при постоянном давлении теплоемкость газа не зависит от температуры;

е) для процессов, протекающих в основной камере сгорания с использованием авиационного топлива (керосина), определение потребного количества теплоты, может быть произведено с использованием условной теплоемкости такого процесса;

ж) теплотворная способность топлива (керосина), равна $H_u = 43\,000$ кДж/кг.

Расчет проточной части СУ проводится для БпЛА с тягой двигателя на максимальном режиме равной $P = 32\,549$ Н.

Для создания такого двигателя были заданы исходные данные (см. таблицу) [2].

При расчетах характеристик двигателя и его проточной части с помощью ПЭВМ были получены следующие графические зависимости: рабочая линия компрессора низкого давления (КНД), рабочая линия компрессора высокого давления (КВД), запас газодинамической устойчивости КНД при изменении частоты вращения ротора низкого давления, запас газодинамической устойчивости КВД при изменении частоты вращения ротора высокого давления, изменение

степени повышения давления при изменении приведенной частоты вращения двигателя, линия предельных режимов работы двигателя (рис. 1) [3].

После проведения расчетов при помощи ЭВМ была получена программа управления (зависимость управляемых параметров от управляющих факторов) (рис. 2).

Исходные данные для проектирования силовой установки БЛА

Наименование	Значение	Наименование	Значение
Высота, км	0	Относительный расход воздуха, отбираемый на $g_{отб}$	0,03
Число Маха	0	КПД КНД	0,88
Степень повышения давления	17	КПД КВД	0,88
Температура газа перед турбиной, К	1550	КПД ТВД	0,91
Степень двухконтурности	1,2	КПД ТНД	0,92
Тяга, кН	36,5	КПД механический	0,99
Коэффициент восстановления полного давления во втором контуре, σ_{II}	0,98	Теплоемкость топлива, H_u , кДж/кг	43000
Коэффициент восстановления полного давления в ОКС, $\sigma_{КС}$	0,98	Коэффициент истечения газов из сопла, φ_c	0,99
Относительный расход воздуха, отбираемый на охлаждение турбины, $g_{охл}$	0,05	Количество валов	2

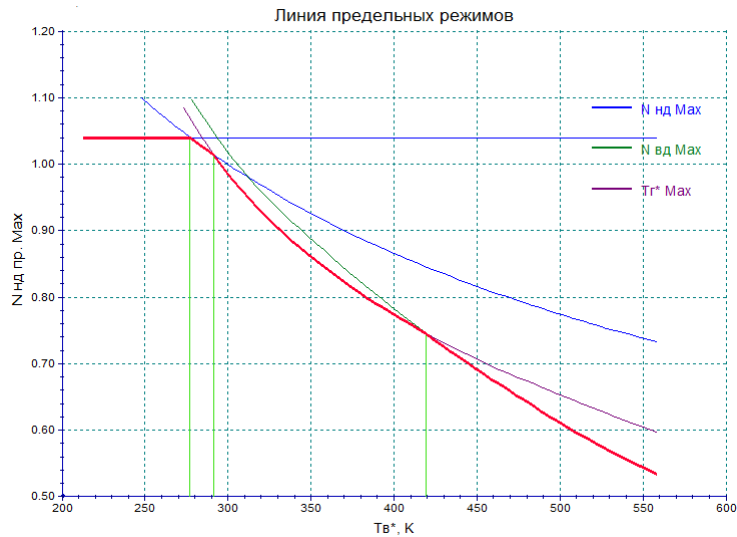


Рис. 1. Линия предельных режимов работы двигателя

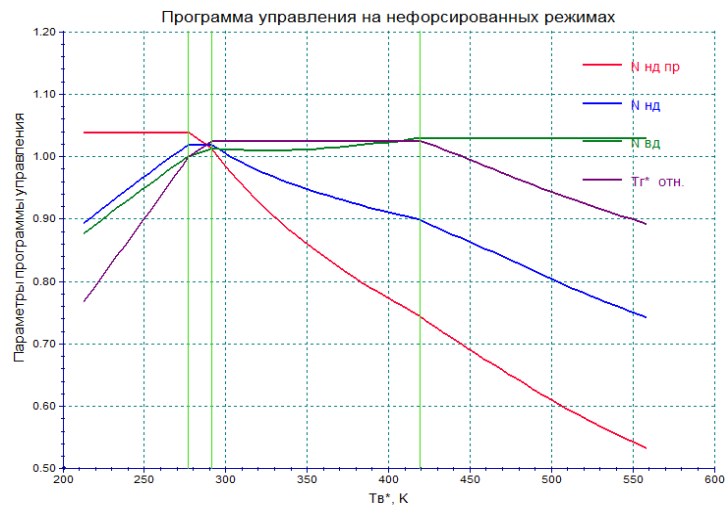


Рис. 2. Программа управления проектируемым двигателем

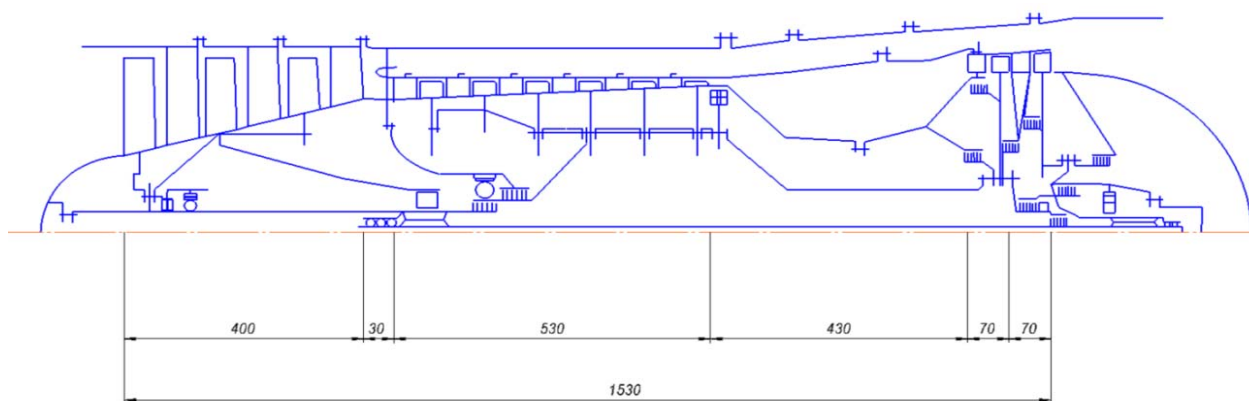


Рис. 3 Проточная часть проектируемого двигателя с указанием размеров основных элементов

По итогам расчетов были получены высотно-скоростные характеристики двигателя, которые характеризуют его эффективность (изменение удельного расхода топлива или тяги на высотах $H = 0$ км, 3 км, 7 км, 9 км и 11 км), а также проточная часть силовой установки (рис. 3).

Библиографические ссылки

1. Федоров Р. М., Полев А. С., Дрыгин А. С. Расчет параметров и характеристик ТРДД и ТРДДСМ. М. : Изд. ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2002.
2. Казанджан П. К., Тихонов Н. Д. Теория авиационных двигателей. Теория лопаточных машин. М. : Машиностроение, 1995. 316 с.
3. Теория авиационных двигателей: в 2 ч. / Ю. Н. Нечаев, Р. М. Федоров, В. Н. Котовский, А. С. Полев ; под ред. Ю. Н. Нечаева. М. : Изд. ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2012. Ч. 2.

References

1. Fedorov R. M., Polev A. S., Drygin A. S. Calculation of parameters and characteristics of turbofan engines and turbofan engines. M. : Publishing. VVIA them. prof. N. E. Zhukovsky, 2002.
2. Kazanjan P. K., Tikhonov N. D. Theory of aircraft engines. Theory of blade machines. M. : Mechanical Engineering, 1995. 316 p.
3. Theory of aircraft engines: in 2 hours / Y. N. Nechaev, R. M. Fedorov, V. N. Kotovsky, A. S. Polev ; under the ed. of Y. N. Nechaeva. M. : Publishing. VVIA them prof. N. E. Zhukovsky, 2012. Part 2.

© Агаев Р. Н., Калинин Р. М., Камбалин И. Д., Коротеев А. В., Ганжин А. Г., 2020

УДК 629.78(062)

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Д. С. Баленков, Д. А. Соколов, Н. С. Шестов, М. И. Толстопятов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: Kubik24rus@mail.ru

Рассмотрена актуальность применения аддитивных технологий при производстве жидкостных ракетных двигателей, определена цель проводимой работы, а также показаны результаты термодинамического расчёта камеры ЖРД.

Ключевые слова: аддитивные технологии, камера ЖРД, 3D-печать.

PROSPECTS FOR USING ADDITIVE TECHNOLOGIES IN MANUFACTURING LRE

D. S. Balenkov, D. A. Sokolov, N. S. Shestov, M. I. Tolstopyatov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: Kubik24rus@mail.ru

The text presents the relevance of the use of additive technologies in the production of liquid-propellant rocket engines, the purpose of the work being carried out is determined, and the results of thermodynamic calculation of the liquid-propellant engine chamber are shown.

Keywords: additivnyye tekhnologii, kamera ZHRD, 3D-pechat'.

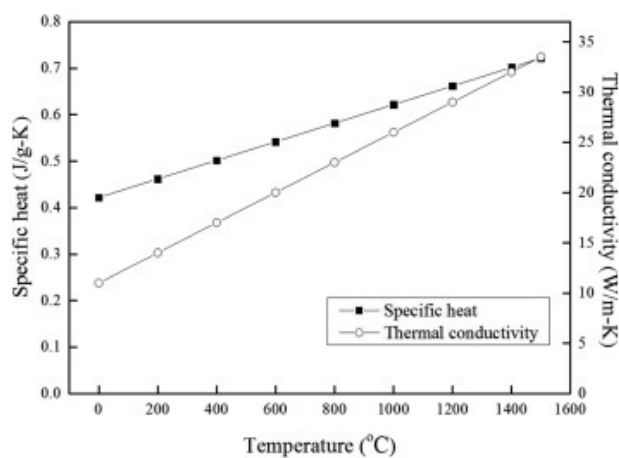
В настоящее время всё более широкое применение получают аддитивные технологии изготовления камер жидкостных ракетных двигателей. Аддитивные технологии – технологии послойного наращивания и синтеза объектов. Основным оборудованием данного метода является 3D-принтеры. Применение аддитивных технологий имеет ряд преимуществ перед классическими методами получения камер жидкостных ракетных двигателей, а именно:

- повышение скорости производства, за счёт практически полной автоматизации процесса изготовления и исключения необходимости поэтапного изготовления изделия;
- повышенная безопасность производства за счёт минимизации количества работников, участвующих в процессе производства изделия;
- повышение качества изготовления изделия;
- снижение конечной стоимости изготовления изделия.

Сейчас применение аддитивных технологий при производстве камер набирает популярность. Самым ярким примером является компания «Rocket Lab», производящая ракета-носитель «Electron». Целью, проводимой мною работы, является расчёт камеры жидкостного ракетного двигателя, изготовление которой будет производиться с применением аддитивных технологий.

Особенностью камеры является её габаритные размеры, которые позволяют изготовить существующие модели 3D-принтеров. Камера представляет со-

бой монолитное изделие, не требующие изготовления сужающейся и расширяющейся частей по отдельности и, как следствие, последующей сварки их между собой, что позволяет упростить технологический процесс. В качестве материала для камеры возможно применение инконеля, обладающего, однако, не самыми лучшими необходимыми для ракетно-космической техники термодинамическими и прочностными характеристиками (см. рисунок).



Термодинамические свойства инконеля

Первым этапом работы является термодинамический расчёт камеры. Результатом расчёта являются

габаритные размеры, контур камеры, графики зависимостей температуры, удельного импульса и т. д.

Следующим этапом в выполняемой работе является расчёт охлаждения. Особенностью расчёта является то, что при определении геометрических параметров охлаждающего тракта отсутствуют классические ограничения, связанные с размерами инструментов.

Библиографические ссылки

1. Шалобаев Е. В., Перепелица Ф. А., Красноручкая Н. С. Аддитивные технологии в машиностроении. Ижевск – Приборостроение в XXI веке – 2016. Интеграция науки, образования и производства, 2016. 319 с.

2. Все самое актуальное о мире 3D-печати: новости, блоги, обзоры и технички [Электронный ресурс]. URL: https://3dtoday.ru/wiki/SLM_print/ (дата обращения: 13.08.2020).

3. Современные технологии производства [Электронный ресурс]. URL: <https://extxe.com/3951/rynok-additivnyh-tehnologij/> (дата обращения: 14.08.2020).

References

1. Shalobaev. E. V., Perepelica F. A., Krasnoryckaja N. S. *Additivnye tehnologii v mashinostroenii* [Additive Technologies in mechanical engineering]. Izhevsk, Instrument making in the XXI century. 2016. 319 p.

2. All the most relevant about the world of 3D printing: news, blogs, reviews and technical papers [Electronic resource]. URL: https://3dtoday.ru/wiki/SLM_print/ (access: 08/13/2020).

3. Modern production technologies [Electronic resource]. URL: <https://extxe.com/3951/rynok-additivnyh-tehnologij/> (access: 08/14/2020).

© Баленков Д. С., Соколов Д. А., Шестов Н. С., Толстопятов М. И., 2020

УДК 621.45.018.2

СИСТЕМА ТАРИРОВОЧНЫХ ГРУЗОВ СПЕЦИАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ДЛЯ СИЛОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ СТЕНДОВ ИСПЫТАНИЙ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

А. М. Бегишев*, В. Ю. Журавлев

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

*E-mail: alex-beg95@mail.ru

Рассматривают один из путей совершенствования градуировочной системы силоизмерительных устройств (СИУ) стендов испытаний жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) имеющих в своем составе рычажно-градуировочное устройство (РГУ) с помощью внедрения в конструкцию РГУ системы тарировочных грузов специальной конфигурации. Разработана рабочая модель с учетом прочностных характеристик.

Ключевые слова: испытательный стенд ЖРД, силоизмерительное устройство, система градуировки, система тарировочных грузов.

SPECIAL CONFIGURATION OF CALIBRATION WEIGHT SYSTEM FOR THRUST MEASURING DEVICES OF FIRING TEST STAND FOR LIQUID ROCKET ENGINES

A. M. Begishev*, V. Y. Zhuravlev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: alex-beg95@mail.ru

The authors consider one of the ways to improve the calibration system of a thrust-measuring device of firing test stand for liquid rocket engines, which includes a lever-calibration device by introducing a system of calibration weights of a special configuration into the design. A working model was developed taking into account the strength characteristics.

Keywords: firing test stand, thrust measurement device, calibrate system, special configuration of calibration weight system.

Прямое измерение тяги ЖРД на испытательных стендах осуществляется с помощью специальной системы измерения усилий, которая включает в себя каналы передачи информации и СИУ [1]. В зависимости от типа стенда СИУ может представлять собой фундаментальную конструкцию, которая устанавливается в перекрытие огневого отсека и должно на протяжении всего срока эксплуатации обеспечивать точность измерения в условиях высоконапряженной работы [2]. В то же время СИУ может служить в качестве основания для подвода расходных топливных магистралей, технологических магистралей, разделительных емкостей (так называемых пусковых баков, обеспечивающих динамическое подобие системы) и другого технологического оборудования. В связи с этим глубокая модернизация систем СИУ возможна лишь при условии демонтажа всех элементов технологических систем находящихся в огневом отсеке, и в зависимости от цели модернизации будет представлять собой достаточно трудоемкий процесс.

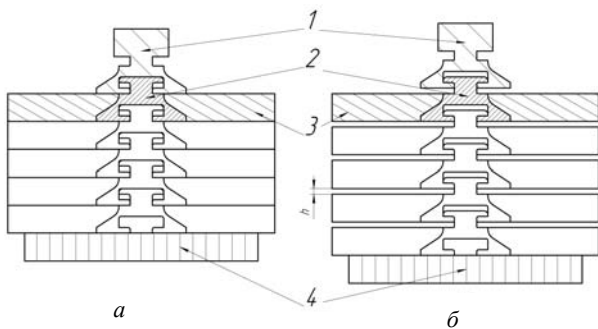
Повышение эффективности работы системы измерения усилий на огневых стендах может осуществляться путем улучшения основных составляющих СИУ: измерительной системы, градуировочной системы и непосредственно станка устройства, а также

за счет улучшения методик измерения и учета погрешностей. В данной работе предлагается путь оптимизации градуировочной системы схемы СИУ, распространенной в практике испытаний, как и ракетных двигателей малых тяг, так и маршевых ракетных двигателей, имеющих РГУ.

Конструкция РГУ, в зависимости от типа огневого стенда и СИУ включает в себя систему рычагов, с помощью которых градуировочное усилие от номинального веса тарировочных гирь подвергается увеличению в соответствии с передаточным отношением системы рычагов и прикладывается к измерительной системе в направлении соответствующему тяге двигателя. Обычно все соединения рычагов градуировочной системы осуществляются с помощью призмных опор, что обеспечивает точность передаточного отношения в процессе работы [3]. Решающим фактором целесообразности использования РГУ в системе СИУ является величина необходимого градуировочного усилия, от которого зависит, как и передаточное отношение рычагов, так и номинальная масса тарировочных грузов. В процессе градуировки подразумевается кратность градуировочного усилия от одного груза градуировочному шагу, а также то, что установка грузов на подвески производится усилиями работ-

ников проводящих операцию. В качестве практического примера применения данной схемы, согласно работе [4], можно привести СИУ стенда №1 производства «Испытательно-заправочный комплекс» АО «Красмаш», РГУ которого имеет две ветви с отдельной системой рычагов, каждая из которых оснащена рычагами первого и второго рода с суммарным передаточным отношением порядка 50. Применение СИУ с данной градуировочной системой на стендах испытаний мощных двигателей сопряжена с применением тарировочных грузов большой массы (20 кг, 50 кг и т. д.), что сказывается на трудоемкости процесса градуировки, в связи с чем встает вопрос об оптимизации данной системы, одним из вариантов которых будет применение предложенной системы тарировочных грузов специальной конфигурации.

Конструкция и принципиальная схема работы системы спецгрузов представлена на рисунке. Тарировочный груз состоит из двух элементов 2 и 3, один из которых является одновременно опорным и связующим элементом, за счёт конструкции которого производится сборка грузов между собой, а второй элемент отвечает за достижение номинальной массы груза в процессе проектирования и изготовления.



Принципиальная схема работы системы тарировочных грузов специальной конфигурации;

a – в условии полной разгрузки рычага; *б* – в условии полной нагрузки рычага (1 – крепление рычага РГУ; 2 – опорная часть спецгруза; 3 – весовая часть спецгруза; 4 – платформа силового привода)

Система грузов смонтирована в горизонтальной плоскости на двух опорах: верхняя опора является креплением рычага РГУ, на который в процессе градуировки прикладывается нагрузка, нижней опорой служит платформа силового привода, являющийся рабочим органом системы. В разгруженном состоянии рычага РГУ силовой привод принимает на себя всю массу системы спецгрузов, после чего плавным опусканием привода верхний спецгруз начинает опираться на крепление рычага, в то время как оставшийся комплект спецгрузов по-прежнему продолжает опираться на платформу привода образуя зазор *h*. Таким образом, в процессе регулирования высоты платформы силового привода происходит поочередное изменение приложения массы спецгруза с рычага РГУ на силовой привод. Разгрузка осуществляется в обратном направлении.

Для системы характерны ряд особенностей. Предполагается, что собранная система должна быть унифицирована для разных испытываемых двигателей. Система может являться дополнением к существующему РГУ, а внедрение не требует изменения конструкции основных элементов СИУ. Нет особых требований к точности силовому приводу, поскольку регулировка производится в ручном режиме. Для обеспечения точности работы необходимо проведение профилактических работ с разборкой системы. В процессе работы разработана общая модель и вид спецгрузов обеспечивающих сборку системы в штатное состояние. Разработка модели выполнена с учетом прочностного анализа в условиях предполагаемой нагрузки. Оценены достоинства и недостатки системы по сравнению с существующими методами, а также по сравнению с другими путями совершенствования градуировочной системы СИУ.

Библиографические ссылки

1. Яцуненко В. Г., Назаров В. П., Коломенцев А. И. Стендовые испытания жидкостных ракетных двигателей : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т ; Моск. авиац. ин-т. Красноярск, 2016. 248 с.
2. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей : учебник / А. П. Васильев, В. М. Кудрявцев, В. А. Кузнецов и др. М. : Высш. школа, 1983. 703 с.
3. 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.
4. Веселов А. В. Модернизация тягоизмерительного устройства на испытательных стендах жидкостных ракетных двигателей // Решетневские чтения : материалы XXII Междунар. науч. практ. конф. : в 2 ч. / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2018. С. 198–200.

References

1. Yacunenkov V. G., Nazarov V. P., Kolomencev A. I. Stendovye ispytaniya zhidkostnykh raketnykh dvigatelej: ucheb. posobie [Stand tests of liquid rocket engines: studies. allowance] / Sib. gos. aerokosmich. un-t ; Moscow aviation institute. Krasnoyarsk, 2016. P. 248.
2. Osnovy teorii i rascheta zhidkostnykh raketnykh dvigatelej : uchebnyk [Fundamentals of the theory and calculation of liquid rocket engines] / A. P. Vasil'ev, V. M. Kudryavcev, V. A. Kuznecov et al. M. : Vyssh. shkola, 1983. 703 p.
3. Ispytanie zhidkostnykh raketnykh dvigatelej [Test of liquid rocket engines] / A. E. Zhukovskij, V. S. Kondrusev, V. Ya. Levin et al. M. : Mashinostroenie, 1981. 199 p.
4. Veselov A. V. [Modernization of the load-measuring device on the test benches of liquid rocket engines] // Reshetnevskie chteniya : materialy XXII Mezhdunar. nauch. konf. : v 2 ch. / Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2018. P. 198–200.

© Бегисhev А. М., Журавлев В. Ю. 2020

УДК 621.454.2

БАЛАНС МОЩНОСТЕЙ МАЛОРАСХОДНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ И КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. А. Зуев^{1*}, А. А. Арнгольд², Н. А. Данилов¹

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

² Акционерное общество «Красноярский машиностроительный завод»
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 29
*E-mail: dla2011@inbox.ru

С учетом конструктивных, режимных особенностей и применяемых схем усовершенствована методика определения потерь мощности на дисковое трение для малорасходных центробежных насосов систем подачи летательных и космических аппаратов.

Ключевые слова: дисковое трение, баланс мощности, малорасходный центробежный насос, пограничный слой.

THE BALANCE OF POWER LOW MASS FLOW RATE OF CENTRIFUGAL PUMPS AND ENERGY SYSTEMS OF AIRCRAFT AND SPACECRAFT

A. A. Zuev ^{1*}, A. A. Arngold ², N. A. Danilov¹

¹ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

² Joint-Stock Company "Krasnoyarsk Machine-building plant"
29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation
*E-mail: dla2011@inbox.ru

Taking into account the design, operating features and applied schemes, the method for determining power losses for disk friction for low-flow centrifugal pumps of aircraft and spacecraft supply systems has been improved.

Keywords: disc friction, power balance, low-flow centrifugal pump, boundary layer.

Введение. Методикам расчета, моделирования и проектирования центробежных насосов жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) посвящено большое количество научно-исследовательских работ [1–6], в том числе и малорасходным центробежным насосам [1–3]. Несмотря на большой объем проведенных научно-исследовательских работ разработка методики проектирования малорасходных центробежных насосов, свысокими энергетическими и эксплуатационными параметрами для космических и летательных аппаратов остается актуальной задачей.

Малорасходные центробежные насосы в настоящее время находят широкое применение в системах топливоподдачи жидкостных ракетных двигателей малой тяги, двигателях коррекции и ориентации космических аппаратов, в составе бортовых источников мощности, в газогенераторных системах надува топливных баков, в системах терморегулирования летательных и космических аппаратов [1–3; 6].

Учитывая геометрические и режимные параметры, физико-механические характеристики рабочих тел для систем терморегулирования, определен диапазон для критерия Рейнольдса, который составляет $Re = 10^3 \dots 3 \cdot 10^5$, что соответствует ламинарному режиму течения.

Постановка задачи. Известные методики проектирования малорасходных центробежных насосов не обеспечивают условия подобия процессов, реализуемых в проточных частях энергетических агрегатов космических аппаратов и полноразмерных турбонасосных агрегатах (ТНА) ЖРД. В целях повышения достоверности расчета энергетических характеристик требуется уточнение используемых расчетных зависимостей и разработка методик проектирования для рассматриваемых типоразмеров.

Теория. При проведении анализа режимных параметров потока выявлено, что в исследуемых полостях реализуется ламинарное течение. Анализ проводился исходя из учета: используемых рабочих тел (водоглицериновые растворители, масла типа РМ, теплоноситель ЛЗ-ТК-2 и др.); температурного диапазона (от -90 до $+220$ °С, в зависимости от типа рабочего тела); возможных расходов рабочих тел; оборотов ротора насоса (от 3000 до 10 000 об/мин); конструктивных особенностей (диаметр рабочего колеса D_2 не превышает 0,05 м).

С учетом выявленных режимов, определен универсальный ламинарный профиль распределения скорости потока в динамическом пограничном слое на исследуемых конструктивных элементах.

В зависимости от степени профиля скорости переопределены зависимости для касательного напряжения трения около поверхности диска рабочего колеса в граничных условиях ламинарного пограничного слоя. При определении выражений для касательных напряжений трения использован подход, учитывающий распределения характерных динамических параметров в пространственном пограничном слое.

При рассмотрении случая течения потока рабочего тела в канале между вращающимся диском и неподвижной стенкой, учитывается угловая скорость ядра потока и диска с учетом окружной составляющей абсолютной скорости течения на стенке.

С учетом полученных выражений для толщин потери импульса в окружном направлении и касательных напряжений трения на стенке для ламинарного течения определены аналитические выражения для анализа коэффициентов трения для стенки корпуса и диска рабочего.

Для случая течения рабочего тела в боковой пазухе между рабочим диском и корпусом центробежного насоса принято допущение, что угловая скорость ядра потока равна половине скорости рабочего колеса насоса. С учетом принятых допущений и полученных выражений определена зависимость для расчета коэффициента потерь на дисковое трение при ламинарном тении

$$C_M = \left(1 / \left(0,5 Re_D \right)^{2/5} \right) \left(0,293 / (D1)^{0,5} + 0,293 / (D2)^{0,5} \right),$$

где $D1$ и $D2$ – численные коэффициенты определяемые в зависимости от режимов, по рекомендации [4; 6].

Максимальное отклонение параметра дискового трения не превышает 7 %. В целом все зависимости находятся в области доверительного интервала, определяемого различными авторами и находятся в области параметров для коэффициентов дискового трения от 0,113 до 0,027, в зависимости от критерия Re .

Выводы. Проведенный анализ режимных параметров малорасходных центробежных насосов показал преимущественно ламинарный режим течения в исследуемой полости.

С учетом конструктивных особенностей и применяемых схем разработана методика определения потерь мощности на дисковое трение рабочего колеса. Полученные выражения для ламинарного вращательного течения позволили определить математические зависимости для определения момента сопротивления и мощности дискового трения рабочего колеса малорасходного центробежного насоса.

Библиографические ссылки

1. Бобков А. В., Цветков О. Е. Повышение напорных качеств центробежного насоса системы терморегулирования // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2012. № 10. С. 110.

2. Совершенствование агрегатов для транспортировки тепла в космических аппаратах / В. В. Двирный, Г. Г. Крушенко, В. В. Голованова и др. // Исследования наукограда. 2016. № 3–4 (18). С. 12–16.

3. Обеспечение длительного ресурса малорасходных нагнетателей / В. В. Двирный, Г. В. Двирный, А. В. Хныкин и др. // Исследования наукограда. 2014. № 3 (9). С. 12–20.

4. The method of the disk friction determining of low mass flow centrifugal pumps / A. A. Zuev, V. P. Nazarov, A. A. Arngold, I. M. Petrov // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20, № 2. С. 219–227.

5. Resistance moment of a rotation surface of liquid rocket engines turbomachines elements / A. A. Zuev, V. P. Nazarov, D. A. Zhuikov et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. № 862. 022032.

6. Расчет полей линий уровня коэффициента быстросходности центробежного нагнетателя космического аппарата / А. В. Бобков, Н. И. Кatalажнова, А. А. Качалов // Успехи современного естествознания. 2004. № 4. С. 50–51.

References

1. Bobkov A. V., Tsvetkov E. O. [Improving the pressure qualities of the centrifugal pump thermal control system] // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy. 2012. № 10. P. 110 (In Russ.).

2. Improvement of units for heat transportation in spacecraft / V. V. Dvirnyy, G. G. Krushenko, V. V. Golovanova et al. // Issledovaniya naukograda. 2016. № 3–4 (18). P. 12–16 (In Russ.).

3. Providing long lasting resource of economical compressors / V. V. Dvirnyy, G. V. Dvirnyy, A. V. Khnykin et al. // Issledovaniya naukograda. 2014. № 3 (9). P. 12–20 (In Russ.).

4. The method of the disk friction determining of low mass flow centrifugal pumps / A. A. Zuev, V. P. Nazarov, A. A. Arngold, I. M. Petrov // Siberian Journal of Science and Technology. 2019. Vol. 20, № 2. P. 219–227 (In Russ.).

5. Resistance moment of a rotation surface of liquid rocket engines turbomachines elements / A. A. Zuev, V. P. Nazarov, D. A. Zhuikov et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. № 862. 022032.

6. Bobkov A. V., Katalazhnova N. I., Kachalov A. A. TCalculation of field lines ratio specific speed centrifugal blower spacecraft // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2004. № 4. P. 50–51 (In Russ.).

© Зуев А. А., Арнольд А. А., Данилов Н. А., 2020

УДК 621.454.2

К МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ В ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЯХ ТУРБОНАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ПРИ ТУРБУЛЕНТНЫХ РЕЖИМАХ

А. А. Зуев^{1*}, А. А. Арнгольд², Н. А. Данилов¹, Е. В. Фалькова¹

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

² Акционерное общество «Красноярский машиностроительный завод»
Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 29

*E-mail: dla2011@inbox.ru

При проектировании агрегатов и систем топливоподдачи жидкостных ракетных двигателей необходимо корректно определять энергетические параметры. Рассмотрен методологический подход к определению характерных параметров в проточных частях.

Ключевые слова: начальный участок, тракт подачи, толщина пограничного слоя.

ON THE METHOD OF DETERMINING CHARACTERISTIC PARAMETERS IN THE FLOW PARTS OF TURBOPUMP UNITS UNDER TURBULENT CONDITIONS

A. A. Zuev^{1*}, A. A. Arngold², N. A. Danilov¹, E. V. Falkova¹

¹ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

² Joint-Stock Company "Krasnoyarsk Machine-building plant"
29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation

*E-mail: dla2011@inbox.ru

When designing units and systems for liquid-propellant rocket engines, it is necessary to correctly determine the energy parameters. The methodological approach to determining the characteristic parameters in the flow parts is considered.

Keywords: the initial part of the feed path, the thickness of the boundary layer.

Введение. При решении задачи достоверного определения параметров потока и гидравлических потерь на начальных динамически нестабилизированных участках, характерных проточным частям ТНА, необходимо определить выражения для относительных характерных величин динамического пространственного пограничного слоя: толщины пограничного слоя, толщины вытеснения и толщины потери импульса, с учетом влияния распределения эпюры профиля скорости в пограничном слое.

Турбулентный пограничный слой. При рассмотрении турбулентного пограничного слоя, на начальных динамически нестабилизированных участках каналов гидравлического тракта турбонососного агрегата, аппроксимируем распределение турбулентного динамического пограничного слоя степенной функцией, с учетом полученного выражения для толщины потери импульса для продольного потока случая турбулентного течения в пограничном слое [1–3] можно записать уравнение для интеграла количества движения:

$$I = \rho U^2 \delta^{**} = \rho U^2 \frac{\delta m}{(m+1)(m+2)}. \quad (1)$$

Воспользуемся законом трения на пластине для турбулентного пограничного слоя согласно [4] и учитывая уравнение количества движения (1) и закон трения, уравнение количества движения приводится к дифференциальной форме

$$\rho U^2 \frac{m}{(m+1)(m+2)} \frac{d\delta}{dx} = 0,0225 \rho U^2 \left(\frac{v}{U\delta} \right)^4.$$

Произведя сокращение и разделив переменные, получим:

$$\frac{1}{\delta^4} d\delta = \frac{0,0225}{m} \left(\frac{v}{U} \right)^4 dx. \quad (2)$$

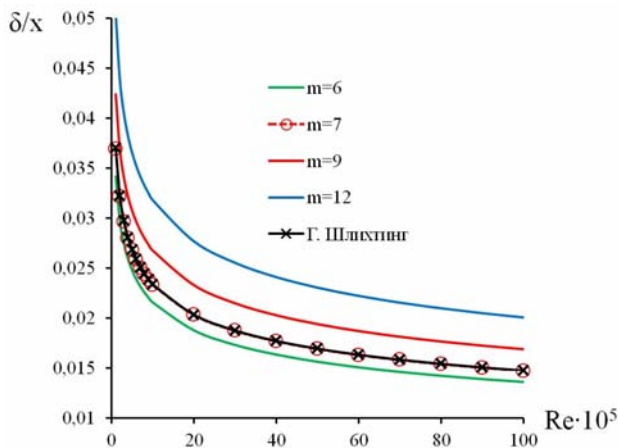
После интегрирования уравнения (2) и проведения дальнейшего преобразования, получим выражение для определения толщины турбулентного пограничного слоя в зависимости от расстояния от входной кромки.

Если реализуется турбулентный пограничный слой сразу от переднего края, то исходя из граничных условий при $x=0$ соответственно $C=0$, тогда опре-

делим толщину пограничного слоя на некотором расстоянии от входа в канал:

$$\delta = \frac{0,0572}{\left(\frac{m}{(m+1)(m+2)}\right)^{\frac{4}{5}}} \left(\frac{v}{U}\right)^{\frac{1}{5}} x^{\frac{4}{5}} =$$

$$= \frac{0,0572}{\left(\frac{m}{(m+1)(m+2)}\right)^{\frac{4}{5}}} \left(\frac{1}{Re_x}\right)^{\frac{1}{5}} x. \quad (3)$$



Зависимость толщины турбулентного динамического слоя от степени профиля и координаты поверхности

Отметим, что турбулентный пограничный слой образуется только на каком-то критическом расстоянии от переднего края. В этой критической точке пограничный слой уже имеет определенную толщину, так как он реализуется при переходе от ламинарного пограничного слоя.

На рисунке приведена графическая зависимость, определенная по выражению (3) для различных значений степеней распределения профиля динамического турбулентного пограничного слоя.

Отметим, что зависимость, полученная по уравнению (3), совпадает с выражением, полученным Г. Шлихтингом. Но, как было отмечено, в проточных частях агрегатов подачи ЖРД параметры потока могут существенно различаться и, соответственно, меняется профиль эпюры динамического пограничного слоя, что влечет изменение основных характерных параметров пространственного пограничного слоя.

Выводы. Полученное выражение для определения толщины турбулентного динамического пограничного слоя, для начальных участков нестабилизированных течений, характерных проточным частям турбонасосных агрегатов жидкостного ракетного двигателя необходимо использовать при определении относительных характерных толщин динамического пространственного пограничного слоя в целях корректного определения энергетических параметров.

Библиографические ссылки

1. Дисковое трение при определении баланса мощностей турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей / А. А. Зуев, В. П. Назаров, А. А. Арнгольд, И. М. Петров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2019. № 57. С. 17–31.
2. Методика определения дискового трения малорасходных центробежных насосов / А. А. Зуев, В. П. Назаров, А. А. Арнгольд, И. М. Петров // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20, № 2. С. 219–227.
3. Определение локального коэффициента теплоотдачи с использованием модели температурного пограничного слоя в полостях вращения газовых турбин / А. А. Зуев, В. П. Назаров, А. А. Арнгольд // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26, № 2. С. 99–115.
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М. : Наука, 1974. 712 с.

References

1. Disk friction in determining the balance of power turbopump rocket engine / A. A. Zuev, V. P. Nazarov, A. A. Arngold, I. M. Petrov // PNRPU Aerospace Engineering Bulletin. 2019. № 57. P. 17–31 (In Russ.).
2. The method of the disk friction determining of low mass flow centrifugal pumps / A. A. Zuev, V. P. Nazarov, A. A. Arngold, I. M. Petrov // Siberian Journal of Science and Technology. 2019. Vol. 20, № 2, P. 219–227 (In Russ.).
3. Zuev A. A., Nazarov V. P., Arngol'd A. A. [Determining local heat transfer coefficient by a model of temperature boundary layer in gas turbine cavity of rotation] // Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta. 2019. Vol. 26, № 2. P. 99–115 (In Russ.).
4. Shlikhting G. Teoriya pogranychogo sloya [The theory of the boundary layer]. M. : Science, 1974. 712 p.

© Зуев А. А., Арнольд А. А.
Данилов Н. А., Фалькова Е. В., 2020

УДК 629.7.063.6

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ДИАФРАГМ-РАЗДЕЛИТЕЛЕЙ ТОПЛИВНЫХ БАКОВ

Д. А. Климовский, В. Ю. Журавлев

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

Рассматриваются основные требования к металлическим выварачивающимся диафрагмам-разделителям топливных баков космических аппаратов для обеспечения запуска жидкостных ракетных двигателей в условиях невесомости.

Приводятся актуальные вопросы исследования металлических диафрагм-разделителей.

Ключевые слова: диафрагма-разделитель, топливный бак, надежность.

CONSTRUCTIVE AND TECHNOLOGICAL ENSURING RELIABILITY OF DIAPHRAGM-SEPARATORS FOR FUEL TANKS

D. A. Klimovskiy, V. Yu. Zhuravlev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: Klinsky92@yandex.ru

The paper considers the basic requirements for metallic reversible diaphragm-separators of spacecraft fuel tanks to ensure the launch of liquid-propellant rocket engines in zero gravity.

Topical issues for research of metallic diaphragm-separators are presented.

Keywords: diaphragm-separator, fuel tank, reliability.

Одним из актуальных исследований в области проектирования космических аппаратов (КА) является обеспечение надежной работы жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) в условиях невесомости [1; 2]. Запуск ЖРД в условиях невесомости невозможен без гарантированного разделения жидкой и газовой фазы в топливном баке космического аппарата. Решение данной задачи возможно с применением металлических выварачивающихся диафрагм-разделителей (см. рисунок) [3–5]. Исследование процесса выварачивания диафрагм-разделителей является актуальной задачей.

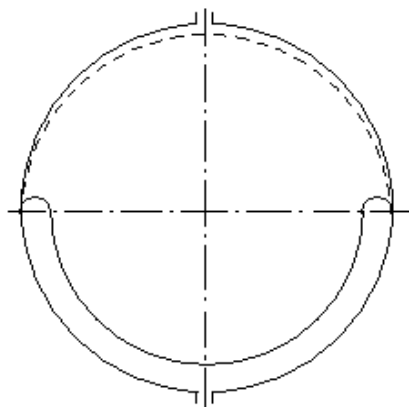


Схема однокомпонентного сферического бака с металлической диафрагмой-разделителем

К топливным бакам ЖРД КА предъявляются весьма жесткие требования. Это объясняется, прежде всего, необходимостью многократного включения двигателей, как в условиях невесомости, так и в условиях осевых и боковых перегрузок, а так же импульсным режимом работы с высокими динамическими характеристиками. Особенности эксплуатации КА накладывают следующие требования, которые необходимо учитывать при проектировании и изготовлении для обеспечения надежной работы металлических диафрагм-разделителей [3–5]:

1. Выбор материала осуществляется с учетом степени агрессивности топлива. Для современных топлив это в основном нержавеющие стали, сплавы на основе титана и алюминия.

2. Минимальное значение разницы перепадов давлений между газовой и жидкой фазами во время вытеснения компонентов. Это требование сужает номенклатуру алюминиевых сплавов для разделителей до чистых и технически чистых алюминиевых сплавов типа АД.

3. Высокая герметичность при использовании сварных соединений.

4. Высокая чистота внутренних полостей баков, гарантирующая отсутствие загрязнений.

5. Максимально возможное применение автоматических и механических способов сварки. Для этого соединения в конструкции должны быть прямолинейными или с постоянным радиусом кривизны.

6. Простота сборки и подгонки кромок сопрягаемых деталей под сварку.

7. Доступность сварных соединений для выполнения сварки и для осуществления контроля.

8. Недопустимость в конструкции баков перекрывающихся сварных швов и перекрытия сварных швов нахлесточными соединениями.

9. Недопустимость расположения рядом большого числа из-за возникновения значительных короблений.

10. Отсутствие в полости баков глухих карманов и щелей, затрудняющих очистку бака.

11. Применение соединений встык. Они обеспечивают наибольшую прочность сварных соединений и повышают коррозионную стойкость изделий.

Исследование процесса выворачивания металлических диафрагм-разделителей, в частности исследования напряженно-деформированного состояния торовой зоны перекачивания для уточнения границ зоны пластического деформирования, позволяет проектировать их для топливных баков различного размера и формы по заданным параметрам вытеснения компонента и является актуальным объектом исследования.

Библиографические ссылки

1. Краев М. В., Назаров В. П., Яцененко В. Г. Основы теории и расчета надежности ракетных двигателей : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2008. 192 с.

2. 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.

3. Технология сборки и испытаний космических аппаратов : учебник / И. Т. Беляков, И. А. Зернов, Е. Г. Антонов и др. ; под общ. ред. И. Т. Белякова, И. А. Зернова. М. : Машиностроение, 1990. 352 с.

4. Ефремов В. Н. Разделители топливных баков с отрицательной деформацией параллели : монография / В. Н. Ефремов, В. Ю. Журавлев, О. П. Якубович ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2005. 76 с.

5. Кубриков М. В., Журавлев В. Ю. Проектирование диафрагм-разделителей удлиненных топливных баков // Вестник СибГАУ. Вып. 4(30). Красноярск, 2010. С. 105–107.

References

1. Krayev M. V., Nazarov V. P., Yatsunenkov V. G. Osnovy teorii i rascheta nadezhnosti raketnykh dvigateley [Foundation of the theory and calculation for the reliability of rocket engines] : uchebnoe posobie / Sib. gos. azerokosmich. un-t. Krasnojarsk, 2008. 192 p.

2. Ispytanie i obespechenie rascheta nadezhnosti raketnykh dvigateley [Testing and ensuring reliability for rocket engines] : ucheb. / A. I. Kolomentsev, M. V. Krayev, V. P. Nazarov et al. ; Sib. gos. azerokosmich. un-t ; Mosk. aviats. in-t. Krasnojarsk, 2006. 336 p.

3. Tehnologija sborki i ispytaniy kosmicheskikh apparatov [Spacecraft assembly and testing technology] : uchebnik / I. T. Beljakov, I. A. Zernov, E. G. Antonov et al. ; pod obshh. red. I. T. Beljakova, I. A. Zernova. M. : Mashinostroenie, 1990. 352 p.

4. Razdeliteli toplivnykh bakov s otricatel'noj deformaciej paralleli [Parallel deformation fuel tank dividers] : monogr. / V. N. Efremov, V. Ju. Zhuravlev, O. P. Jakubovich ; Sib. gos. azerokosmich. un-t. Krasnojarsk, 2005. 76 p.

5. Kubrikov M. V., Zhuravlev V. Ju. Proektirovanie diafragm-razdelitelej udlinennykh toplivnykh bakov [Design of diaphragm-separators for elongated fuel tanks] // Vestnik SibGAU. Vyp. 4(30). Krasnojarsk, 2010. P. 105–107.

© Климовский Д. А., Журавлев В. Ю., 2020

УДК 681.3

ПЕРЕДОВОЙ ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

С. А. Кожемякин, К. Ф. Голиковская

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: Kozhemyakin_98@mail.ru

В настоящее время, пути совершенствования жидкостных ракетных двигателей в значительной мере зависят от космической политики мировых и региональных держав. На основе анализа научно-технической литературы и результатов экспериментальных исследований можно говорить о том, что сразу несколько стран занимаются научными разработками в сфере жидкостных ракетных двигателей. Публикации специалистов отражают опыт исследований в США, Китае, России, а также в ряде региональных держав: Иране, Индии, Японии, Израиле и Северной Корее. В статье представлены основные направления повышения эффективности существующих и перспективных направлений проектирования жидкостных ракетных двигателей.

Ключевые слова: программы пилотируемых полетов, освоение космического пространства, жидкостный ракетный двигатель, взрывные процессы, добавки в топливо, жидкое топливо.

BEST PRACTICES IN THE USE OF LIQUID ROCKET ENGINES

S. A. Kozhemyakin, K. F. Golikovskaya

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: Kozhemyakin_98@mail.ru

Currently, the ways to improve liquid rocket engines largely depend on the space policy of world and regional powers. Based on the analysis of scientific and technical literature and the results of experimental studies, we can say that several countries are engaged in scientific developments in the field of liquid rocket engines. The experts' publications reflect research experience in the United States, China, Russia, as well as in a number of regional powers: Iran, India, Japan, Israel, and North Korea. The article presents the main directions of improving the efficiency of existing and future directions of designing liquid rocket engines.

Keywords: manned flight programs, space exploration, liquid rocket engine, explosive processes, fuel additives, liquid fuel.

Качественный скачок в развитии космических транспортных средств может быть достигнут путем разработки и внедрения принципиально новых двигателей, использующих быстропотекающие (взрывные) процессы, например пульсирующих детонационных двигателей. Для такого типа двигателей характерны:

- детонационный механизм преобразования энергии,
- высокая (вплоть до ультразвуковой) частота рабочих циклов,
- отсутствие механической клапанной решетки,
- возможность работы как в ракетном, так и воздушно-реактивном режимах [1].

Однако, исследования российских ученых, проводимые на базе отраслевых НИИ и конструкторских бюро соответствующего профиля, показали, что жидкостные ракетные двигатели остаются основными для перспективных средств выведения летательных аппаратов на орбиту в ближайшие 20 лет. Необходимо отметить, что в основе действия жидкостного ракет-

ного двигателя лежит химическая реакция жидкого топлива, в качестве которого выступает, например, сжиженный газ. Перспективные разработки в сфере разработки новых современных конструкций в полной мере основаны на жидкостных ракетных двигателях. Однако, такие исследования не всегда завершаются успешными испытаниями и внедрением, что связано с огромными затратами на финансирование как со стороны государства, так и со стороны частных инвесторов.

В настоящее время российская компания «Лин Индастриал» разрабатывает ракету «Таймыр» с диапазоном полезных нагрузок от 10 килограмм до 180-ти при выводе на низкую околоземную орбиту. Еще в 2016 году «Лин Индастриал» провела огневые испытания жидкостного ракетного двигателя РДЛ-100С «Атар», предназначенного для носителя, а также испытала дозвуковой «летающий стенд» с целью отработки одного из вариантов системы управления. В настоящее время проект не закончен по причине его остановки руководством – «Роскосмос» не проявил

большого интереса к инвестированию, а денег частных инвесторов оказалась недостаточно.

Такая ситуация характерна не только для российской космонавтики, где ЖРД все же являются основной. Ученые-конструкторы других стран неустанно совершенствуют конструкции ЖРД. Так, например, Китай обладает независимыми надёжными средствами для доступа в космическое пространство, обеспечив себе конкурентные преимущества на мировом рынке [2]. Совершенствуя свои конструкторские разработки в разных направлениях освоения космического пространства китайские ученые основываются на использовании ЖРД.

Ракета легкого класса Newline-1, разрабатываемая частной компанией Linkspace, будет состоять из двух ступеней, первая из которых сможет возвращаться на Землю и использоваться повторно, подобно американской Falcon 9. RLV-T5, имеющая длину 8,1 метров и диаметр 65 см., укомплектована пятью жидкостными двигателями. В качестве горючего используется этанол и сжиженный кислород.

Необходимо отметить конструктивные разработки в Иране. В основе самых современных проектов страны лежит создание ракеты-носителя (РН) Сафир. В настоящее время эта серия достаточно успешно эксплуатируется правительством с научных целей и имеет место несколько вариантов модернизаций ракеты-носителя. Все они представляет собой двухступенчатую жидкостную ракету.

Стартовая масса РН составляет около 25 т, длина – 25–30 м. В двигательных установках в качестве компонентов топлива используется окислитель АК-27И (на основе азотной кислоты) и углеводородное горючее – ТМ-185 [2].

Современные ЖРД – визитная карточка японской космонавтики. В 2020 году закончено строительство новой ракеты компанией Mitsubishi Heavy Industries. Базовая структура ракеты включает усовершенствованный жидкостной двигатель.

В целом, в качестве перспективных направлений использования ЖРД ученые Исследовательского центра им. М. В. Келдыша совместно с ЦНИИМаш выделили следующие технологии [3]:

– использование сжиженных природных газов (СПГ) в качестве универсального, экологически чистого горючего;

– применение новых схем двигателя, в частности с дожиганием восстановительного генераторного газа, и эффективных систем охлаждения камер сгорания;

– использование высокоэффективных систем контроля качества и надежности двигателей в производстве;

– применение новых рациональных схем трехкомпонентных ЖРД.

Эти технологии характеризуют три типа перспективных ЖРД:

1. Кислородно-метановые ЖРД. Создание такого двигателя может рассматриваться как составная часть общероссийской программы расширения и повышения эффективности использования сжиженных природных газов на автомобильном, железнодорожном,

авиационном транспорте и в ракетно-космической технике. Необходимость реализации такой программы может быть обусловлена дефицитом вырабатываемых из нефти топлив, большими запасами, доступностью и относительной дешевизной природного газа, а также экологическими преимуществами его применения.

2. Трехкомпонентный двигатель. Для разработки в дальнейшем наиболее эффективных одноступенчатых систем выведения необходимо создание ЖРД нового поколения, работающих при использовании с жидким кислородом двух горючих – водорода и УВГ. Основным преимуществом трехкомпонентных ЖРД по сравнению с двухкомпонентными кислородно-водородными двигателями является уменьшение потребных запасов водорода в 1,5...2 раза, что позволит сократить затраты на выведение ПН. Это обеспечит также уменьшение «сухой» массы конструкции носителя. Проведенные исследования показали конкурентоспособность и значительную эффективность ЖРД, работающих на трехкомпонентном топливе.

3. Жидкостно-воздушный ракетный двигатель (ЖВРД). Разработка двигателей, работающих с использованием атмосферного воздуха, связана с решением ряда новых научно-технических проблем, что, как показывает анализ, отодвигает возможность создания ЖВРД на более отдаленное будущее. ЖВРД следует рассматривать в первую очередь как перспективный двигатель для одноступенчатых многоуровневых воздушно-космических систем [4].

Кроме того, необходимо отметить возможности использования различных добавок и присадок для повышения эффективности жидких ракетных горючих. Их внедряют на нефтеперерабатывающих заводах. Литий и бериллий – представители таких добавок [5].

В заключение следует говорить о том, что на настоящем этапе развития космических транспортных средств сложилась ситуация, когда возможности по совершенствованию химических ракетных двигателей традиционных типов (на основе стационарных или медленно протекающих рабочих процессов) практически полностью исчерпаны и ограничены незначительным улучшением энергомассовых характеристик, достигаемым, как правило, в ущерб надежности, безопасности и экологичности. Качественный скачок в развитии космических транспортных средств может быть достигнут путем разработки и внедрения принципиально новых двигателей, использующих быстропротекающие (взрывные) процессы, например пульсирующих детонационных двигателей.

Библиографические ссылки

1. Россия и международная безопасность в космосе / отв. ред. А. А. Кокошин ; научн. ред. А. Д. Богатуров. М. : КРАСАНД, 2013. С. 25–31.

2. Ганиев Т. А., Карякин В.В. Космическая политика мировых и региональных держав : монография. М. : Архонт, 2020. С. 55.

3. Некоторые пути повышения эффективности жидких и газообразных углеводородных и азотосо-

державных горючих для двигателей летательных аппаратов / В. А. Алтунин, К. В. Алтунин, И. Н. Алиев и др. // Тепловые процессы в технике. 2019. Т. 11, № 10. С. 453–479.

4. Некоторые пути повышения эффективности углеводородных и азотосодержащих горючих космического применения / В. А. Алтунин, Н. Б. Давлатов, М. А. Зарипова и др. // Журнал «Военмех. Вестник БГТУ». 2019. № 55. С. 424–429.

5. Алтунин В. А., Давлатов Н. Б., Заипова М. А. Анализ путей повышения эффективности жидких горючих двигателей и энергоустановок. 2018. С. 326–330.

References

1. Rossiya i mezhdunarodnaya bezopasnost v kosmose / otv. red. A. A. Kokoshin ; nauchn. red. A. D. Bogaturov. M. : KRASAND, 2013. P. 25–31.

2. Ganiev T. A., Karyakin V. V. Kosmicheskaya politika mirovyyh i regional'nyh derzhav : monografiya. M. : Arhont, 2020. P. 55.

3. Nekotorye puti povysheniya effektivnosti zhidkih i gazoobraznye uglevodorodnyh i azotosoderzhashchih goryuchih dlya dvigatelej letatel'nyh apparatov / V. A. Altunin, K. V. Altunin, I. N. Aliev et al. // Teplovye processy v tekhnike. 2019. Т. 11, № 10. P. 453–479.

4. Nekotorye puti povysheniya effektivnosti uglevodorodnyh i azotosoderzhashchih goryuchih kosmicheskogo primeneniya / V. A. Altunin, N. B. Davlatov, M. A. Zaripova et al. // Zhurnal «Voennmekh. Vestnik BGTU». 2019. № 55. P. 424–429.

5. Altunin, V. A., Davdatov N. B., Zaipova M. A. Analiz putej povysheniya effektivnosti zhidkih goryuchih dvigatelej i energoustanovok. 2018. P. 326–330.

© Кожемякин С. А., Голиковская К. Ф., 2020

УДК 621.454.2

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАВНОВЕСНОГО ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ РЕАКЦИИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В КАМЕРЕ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

В. Д. Нестеров, Д. А. Жуйков

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

Проведено исследование и разработка алгоритма определения равновесного термодинамического состояния окислительно-восстановительной реакции продуктов сгорания в камере ЖРД являющегося ключевым для дальнейшего газодинамического расчета и численного моделирования.

Ключевые слова: термодинамический расчет, константа химического равновесия, камера двигателя, жидкостный ракетный двигатель.

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR DETERMINING THE EQUILIBRIUM THERMODYNAMIC STATE IN THE OXIDATIVE-REDUCING REACTION OF COMBUSTION PRODUCTS IN THE LRE CHAMBER

V. D. Nesterov, D. A. Zhuikov

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

The research and development of an algorithm for determining the equilibrium thermodynamic state of the redox reaction of combustion products in the LPRE chamber, which is key for further gas-dynamic calculation and numerical modeling, has been carried out.

Keywords: thermodynamic calculation, chemical equilibrium constant, engine chamber, liquid propellant rocket engine.

Проектирование жидкостного ракетного двигателя сложный и трудоемкий процесс, включающий в себя множество многоуровневых и итерационных расчетов, требующих многократного возврата и пересчета на различных стадиях проектирования.

Определения равновесного термодинамического состояния при окислительно-восстановительной реакции продуктов сгорания в камере двигателя является ключевым расчетом при проектировании и численного моделирования ЖРД в целом. Целью расчета является определение температуры и состава продуктов сгорания, которые в дальнейшем используются в газодинамическом расчете камеры двигателя и расчете ее охлаждения.

Основными исходными данными для расчета являются: полное давление в камере сгорания; давление на срезе сопла; наружное давление; энтальпия компонентов топлива.

Характерным стартовым параметром для расчета могут являться: температура или коэффициент избытка окислителя.

Вследствие сложности термодинамического расчета вводятся ряд допущений:

– соотношение компонентов постоянно по поперечному сечению камеры сгорания;

– физическая неполнота сгорания топлива отсутствует;

– отдача тепла от газа в стенки камеры сгорания отсутствует;

– состояние продуктов сгорания на выходе из камеры сгорания является химически и энергетически равновесным, т.е. химический состав и теплоемкость продуктов сгорания полностью соответствуют их температуре [1; 2].

В общем случае термодинамический расчет использует метод последовательных итераций с последовательным подбором температуры или коэффициента избытка окислителя с учетом равенства энтальпий или суммы парциальных давлений продуктов сгорания с энтальпией топлива или давлением в камере.

Данный процесс занимает достаточно много времени при перерасчете в следствии изменения начальных параметров, поэтому был разработан алгоритм определения равновесного термодинамического состояния при окислительно-восстановительной реакции продуктов сгорания в камере двигателя, с использованием программной среды Smath Studio [3].

Разработанный алгоритм подходит для четырех-элементного топлива (H, C, N, O) и учитывает 17 газов. Для данного алгоритма были использованы следующие уравнения:

Уравнения баланса химического состава

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu \cdot P \cdot A_H = 2 \cdot P_{H_2O} + 2 \cdot P_{H_2} + P_{OH} + P_H + 4 \cdot P_{CH_4} + \\ + 3 \cdot P_{NH_3} + P_{HO_2} + 2 \cdot P_{C_2H_2} + 4 \cdot P_{C_2H_4} + P_{HCN}, \\ \mu \cdot P \cdot A_C = 2 \cdot P_{CO_2} + P_{CO} + P_{CH_4} + 2 \cdot P_{C_2H_2} + \\ + 2 \cdot P_{C_2H_4} + P_{HCN}, \\ \mu \cdot P \cdot A_N = 2 \cdot P_{N_2} + P_{NO} + P_{NH_3} + P_{NO_2} + P_{HCN}, \\ \mu \cdot P \cdot A_O = P_{H_2O} + 2 \cdot P_{CO_2} + P_{CO} + P_{OH} + 2 \cdot P_{O_2} + \\ + P_O + P_{NO} + 2 \cdot P_{HO_2} + 2 \cdot P_{NO_2}, \end{array} \right.$$

где μ – молекулярная масса продуктов сгорания; P – полное давление в камере; A_i – индексы элементов из удельной формулы топлива.

Уравнения химического равновесия [4; 5]

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{P_{CO} \cdot \sqrt{P_{O_2}}}{P_{CO_2}}, \quad K_2 = \frac{P_{H_2} \cdot \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}}, \quad K_3 = \frac{P_{OH} \cdot \sqrt{P_{H_2}}}{P_{H_2O}}, \\ K_4 &= \frac{P_{NO}^2}{P_{N_2} \cdot P_{O_2}}, \quad K_5 = \frac{P_H^2}{P_{H_2}}, \quad K_6 = \frac{P_O^2}{P_{O_2}}, \\ K_7 &= \frac{P_{CH_4} \cdot P_{H_2O}}{P_{H_2}^3 \cdot P_{CO}}, \quad K_8 = \frac{P_{H_2}^2}{P_{CH_4}}, \quad K_9 = \frac{P_{NH_3}^2}{P_{H_2}^3 \cdot P_{N_2}}, \\ K_{10} &= \frac{P_{H_2O} \cdot P_{O_2}^{1.5}}{P_{HO_2}^2}, \quad K_{11} = \frac{P_{O_2} \cdot \sqrt{P_{N_2}}}{P_{NO_2}}, \quad K_{12} = \frac{P_{CH_4}^2}{P_{C_2H_2} \cdot P_{H_2}^3}, \\ K_{13} &= \frac{P_{CH_4}^2}{P_{C_2H_4} \cdot P_{H_2}^2}, \quad K_{14} = \frac{P_{CH_4} \cdot P_{NH_3}}{P_{HCN} \cdot P_{H_2}^3}, \end{aligned}$$

где K_i – константы химического равновесия.

Закон Дальтона

$$P = P_{H_2} + P_H + P_{H_2O} + P_{OH} + P_{O_2} + P_O + P_{CO_2} + P_{CO} + P_{NO} + P_{N_2} + P_{CH_4} + P_{HCN} + P_{NO_2} + P_{C_2H_4} + P_{NH_3} + P_{HO_2} + P_{C_2H_2}.$$

В основе алгоритма лежит последовательное решение системы уравнений, описанных выше, с использованием цикла *while* (циклических расчетов), в котором в качестве условия выхода из цикла указана равенство полной энтальпии топлива и продуктов сгорания с заданной точностью.

Созданный алгоритм позволяет с необходимой точностью определять состав и температуру продуктов сгорания, а также соответствует данным полученным различными методиками расчета [6]. Однако в диапазонах коэффициента избытка окислителя от 0,001 до 0,4 и от 1 до 20 состав продуктов сгорания отличается от экспериментальных данных. В дальнейшем предусматривается создание программы на языке Python 3, использующей данный алгоритм с дополнительными расчетно-управляющими программными блоками, устраняющими проблему неточного состава продуктов сгорания.

Таким образом, рассмотренный алгоритм позволит определять равновесное термодинамическое состояние при окислительно-восстановительной реакции продуктов сгорания в камере двигателя при проектировании ЖРД и численном моделировании двигателя в целом.

Библиографические ссылки

1. Горностаев В. И. Термодинамический расчет двигателя: учеб. пособие / Сиб. аэрокосмич. акад. Красноярск, 1994. 39 с.
2. Николаев Б. А. Термодинамический расчет ракетных двигателей. М.: Оборонгиз, 1960. 148 с.
3. SMATH Studio – математическая программа с графическим редактором и полной поддержкой единиц измерения [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.smath.com> (дата обращения: 07.09.2020).
4. Глушко В. П. Термодинамические свойства индивидуальных веществ : справ. изд. : в 4 т. / Акад. наук СССР ; Ин-т высоких температур ; Ин-т приклад. химии. 3-е изд., перераб. и расш. М. : Наука, Т. 1, кн. 2: Элементы O, H (D,T), F, Cl, Br, I, He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn, S, N, P и их соединения. Вычисление термодинамических свойств. 1978. 328 с.
5. Глушко В. П. Термодинамические свойства индивидуальных веществ : справ. изд. : в 4 т. / Акад. наук СССР ; Ин-т высоких температур ; Ин-т приклад. химии. 3-е изд., перераб. и расш. М. : Наука, Т. 2, кн. 1: Элементы C, Si, Ge, Sh, Pb и их соединения. Вычисление термодинамических свойств. 1979. 328 с.
6. Остапенко Д. В., Зайцев М. А., Толстопятков М. И. Анализ методик термодинамического расчета жидкостных ракетных двигателей // Решетневские чтения : материалы XXII Междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 1 ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2018. С. 212–214.

References

1. Gornostaev V. I. Thermodynamic calculation of the engine : textbook. allowance / Sib. aerokosmich. akad. Krasnoyarsk, 1994. 39 p.
2. Nikolaev B. A. Thermodynamic calculation of rocket engines. M. : Oborongiz, 1960. 148 p.
3. SMATH Studio is a mathematical program with a graphic editor and full support for units of measurement [Electronic resource]. URL: <https://ru.smath.com> (access: 07.09.2020).
4. Glushko V. P. Thermodynamic properties of individual substances : ref. ed. : in 4 vol. / Acad. sciences of the USSR ; Institute of high temperatures ; Institute of butt. chemistry. Ed. 3rd, rev. and extended. M. : Science T. 1, book. 2: Elements O, H (D, T), F, Cl, Br, I, He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn, S, N, P and their compounds. Calculation of thermodynamic properties. 1978. 328 p.
5. Glushko V. P. Thermodynamic properties of individual substances : ref. ed. : in 4 vol. / Acad. sciences of the USSR ; Institute of high temperatures ; Institute of butt. chemistry. Ed. 3rd, rev. and extended. M. : Science T. 2, book. 1: Elements C, Si, Ge, Sh, Pb and their compounds. Calculation of thermodynamic properties. 1979. 328 p.
6. Ostapenko D. V., Zaitsev M. A., Tolstopyatov M. I. Analysis of methods for thermodynamic calculation of liquid-propellant rocket engines // Reshetnevskiy chteniya : materialy XXII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. ; Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2018. P. 212–214.

УДК 621.675

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ В МЕЖЛОПАТОЧНОМ КАНАЛЕ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОЛЕСА НАСОСА

В. А. Новак¹, Д. А. Жуйков²

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

Рассмотрены экспериментальные исследования течения в межлопаточном канале центробежного колеса насоса. Представлена схема установки, графики экспериментальных исследований.

Ключевые слова: ТНА, центробежный насос, рабочее колесо.

EXPERIMENTAL STUDIES OF FLOW IN THE INTER-BLADE CHANNEL OF THE CENTRIFUGAL PUMP WHEEL

V. A. Novak¹, D. A. Zhuikov²

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

The article deals with experimental studies of the flow in the inter-blade channel of the centrifugal pump wheel. The installation diagram and experimental research schedules are presented.

Keywords: TNA, centrifugal pump, impeller.

Как мы знаем, турбонасосный агрегат является «сердцем» ракетного двигателя, которое осуществляет подачу компонентов топлива в камеру сгорания [1]. ТНА применяются в жидкостных ракетных двигателях, а также в некоторых авиационных двигателях. ТНА состоит из турбины и нескольких насосов. Одним их основных элементов в насосе является рабочее колесо. Суть его работы заключается в передаче энергии от вращающегося вала к жидкости [2].

На рис. 1 представлена схема установки. Центробежный насос 1 соединен с помощью упругой муфты с асинхронным электродвигателем 2. Вода всасывается насосом из питательного бака 3, свободная поверхность воды в котором выше уровня насоса. На всасывающем трубопроводе установлена задвижка 4, служащая для создания дополнительного сопротивления на всасывающей линии, а также для отключения насоса от сети во время ремонта. На нагнетательном трубопроводе установлены задвижка 5 для регулирования производительности насоса и счетчик 11 для измерения подачи. Гидравлическая система замкнута, т. е. насос всасывает воду из питательного бака 3 и подает её в тот же бак. На пульте управления насосной установкой смонтированы манометр 7, вакуумметр 10, амперметр 9, вольтметр 6, тахометр 8, секундомер [3].

Рассмотрим экспериментальные исследования (рис. 2–4).

Производительность насоса определяется по формуле:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Напор H , развиваемый насосом, находится следующим образом:

$$H = \frac{P_M + P_E}{\rho g} + Z + Z_M$$

Мощность, потребляемая насосом, определяется из зависимости, кВт:

$$N = \frac{\sqrt{3}UI \cos \varphi - N_M}{1000}$$

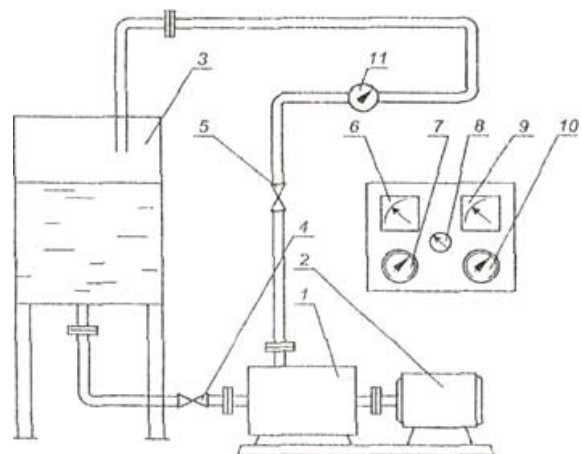


Рис. 1. Схема установки

Полный КПД насоса вычисляется по формуле (в СИ)

$$\eta = \frac{\rho g \cdot Q \cdot H}{N \cdot 1000}$$

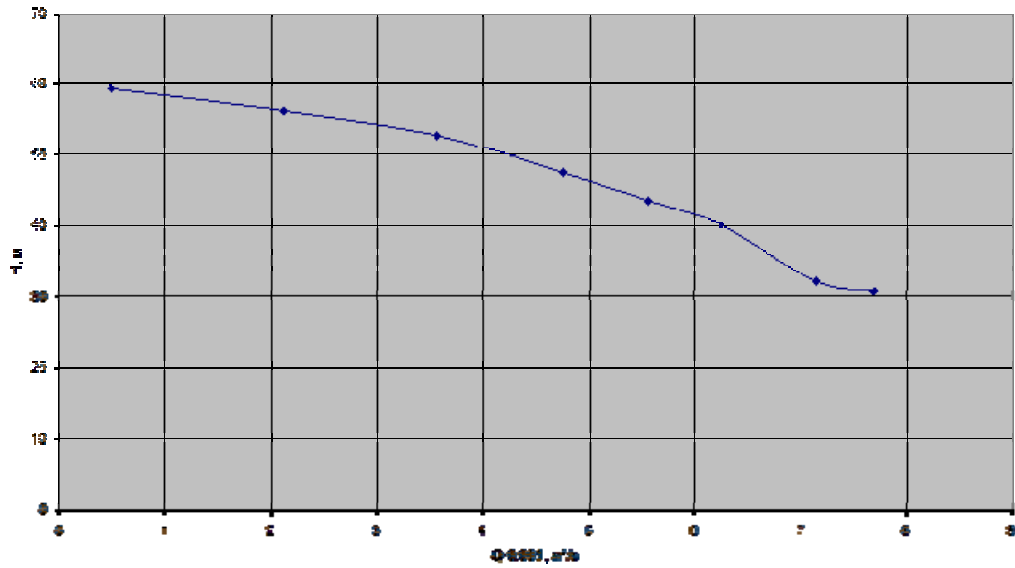


Рис. 2. Зависимость $H = f(Q)$

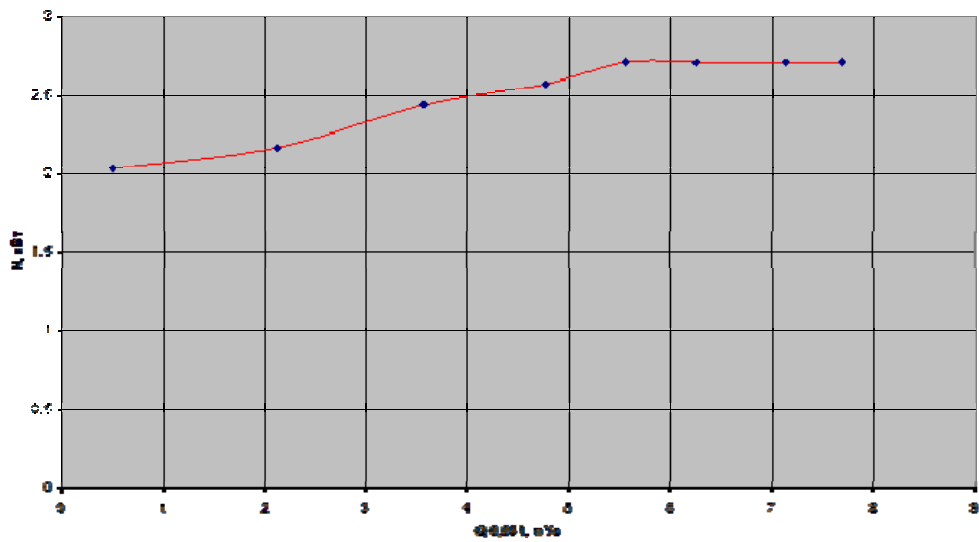


Рис. 3. Зависимость $N = f_2(Q)$

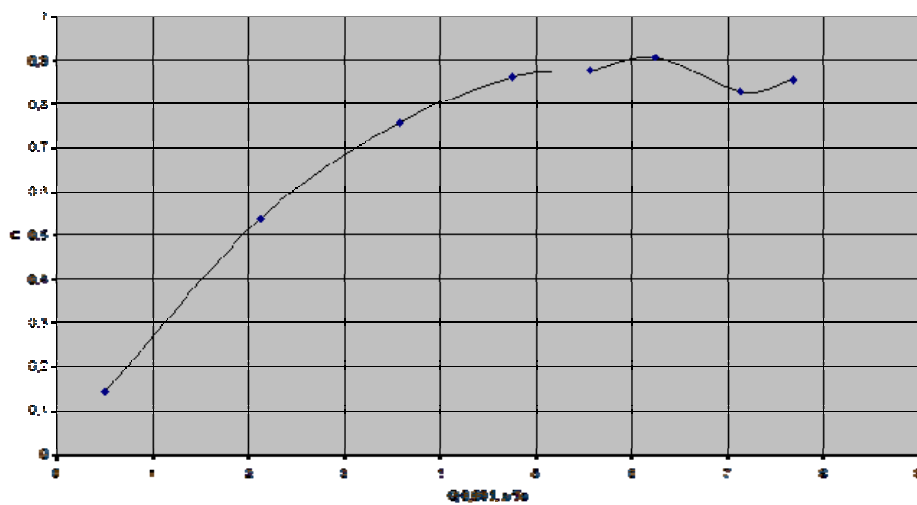


Рис. 4. Зависимость $n = f_3(Q)$

При увеличении подачи насоса нагрузка на электродвигатель также увеличивается, это приводит к уменьшению числа оборотов электродвигателя. При заметном изменении числа оборотов насоса найденные значения параметров насоса (Q , H , M) необходимо пересчитать на одно и то же число оборотов n_p [4].

Результаты можно визуализировать и построить графические зависимости для наглядного представления результатов.

По результатам экспериментальных исследований можно сделать вывод о наиболее эффективном режиме работы, при котором значения напора, расхода и КПД будут оптимальными и сбалансированными.

Библиографические ссылки

1. Шапиро А. С. Структура реального течения в центробежных и осевых насосах. М. : Изд-во МГИУ, 2004. 280 с.
2. Dslib.net [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dslib.net/gidravl-mashiny/teoreticheskie-osnovy-i-jeksperimentalnye-issledovaniya-s-celju-sozdaniya-protoc-hnyh.html> (дата обращения: 15.07.2020).
3. HELPIKS.ORG [Электронный ресурс]. URL: <https://helpiks.org/4-43301.html> (дата обращения: 16.07.2020).

4. Байбаков О. В., Руднев С. С. Расчет рабочего колеса и подвода лопастного насоса : учеб. пособие / под ред. И. В. Матвеева. М. : МВТУ, 1983. 46 с.

5. ByreniePro.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://byreniepro.ru/nasosy/rabochee-koleso.html> (дата обращения: 17.07.2020).

References

1. Shapiro A. S. structure of real flow in centrifugal and axial pumps. M. : MGIU Publishing house, 2004. 280 P.
2. Dslib.net [Electronic resource]. URL: <http://www.dslib.net/gidravl-mashiny/teoreticheskie-osnovy-i-jeksperimentalnye-issledovaniya-s-celju-sozdaniya-protoc-hnyh.html> (access: 15.07.2020).
3. HELPIKS.ORG [Electronic resource]. URL: <https://helpiks.org/4-43301.html> (access: 16.07.2020).
4. Baibakov O. V., Rudnev S. S. Calculation of the impeller and supply of the blade pump : a textbook / ed. by I. V. Matveev. M. : MVTU, 1983. 46 p.
5. ByreniePro.ru [Electronic resource]. URL: <https://byreniepro.ru/nasosy/rabochee-koleso.html> (access: 17.07.2020).

© Новак В. А., Жуйков Д. А., 2020

УДК 621.45.01:004.942

НАЧАЛЬНЫЙ ЭТАП ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА ДАЛЬНЕМАГИСТРАЛЬНЫХ САМОЛЕТАХ

Н. Д. Пашкова*, К. В. Безбородова, Е. А. Боброва

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

*E-mail: pashkova-2000@mail.ru

Определены оптимальные параметры двигателя со взлетной тягой 235 кН для использования на дальнемагистральных самолетах. Новизна исследования – непосредственная связь реально существующих самолетов с предложенным двигателем.

Ключевые слова: проектирование, тяга, критерии эффективности, двигатель, самолет.

THE INITIAL DESIGN OF A GAS TURBINE ENGINE FOR USE ON LONG-HAUL AIRCRAFT

N. D. Pashkova*, K. V. Bezborodova, E. A. Bobrova

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

*E-mail: pashkova-2000@mail.ru

Determine the optimal parameters of the engine with a take-off thrust of 235 kN for further use on long-haul aircraft. The scientific novelty of the research is a direct connection between real-life aircraft and the designed gas turbine engine.

Keywords: design, thrust, working process parameters, engine, aircraft.

Введение. Одной из важнейших и актуальных задач современного проектирования является выбор оптимальных значений параметров рабочего процесса авиационных газотурбинных двигателей (в дальнейшем ГТД). Исходя из них, а также некоторых основных параметров самолетов произведено исследование, которое позволит снизить стоимость всех этапов жизненного цикла газотурбинного двигателя и трудность при его проектировании.

Анализ рынка самолетов. Проведено изучение рынка летательных аппаратов. Согласно данным РБК [1]. ДМС в России 130 единиц. Во всем мире на данный момент используют Boeing 777 (в 9 модификациях), Ил-96 (в 2 модификациях), Airbus A-340 (в 2 модификациях), Boeing 747 (в 3 модификациях), Gulfstream G550, Bombardier Global Express, Falcon 7X, Airbus A380, CRJ929 (в 3 модификациях), Boeing 787 (в 3 модификациях) и Airbus A350-900.

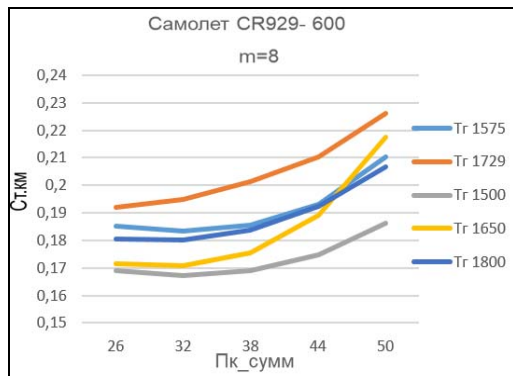
Выбор количества двигателей. Важным этапом работы является рассмотрение количества необходимых двигателей для самолета. Выбран вариант газотурбинного двигателя с необходимым и благоприятным количеством двигателей. Таким летательным аппаратом стал самолет с двумя газотурбинными двигателями.

Вариант с использованием одного двигателя небезопасен, так как иногда происходит отказ во время полета, а современный авиалайнер должен продолжать полет при данной нештатной ситуации (чего он сделать не может при наличии лишь одного силового агрегата). Наличие трех двигателей в авиалайнере

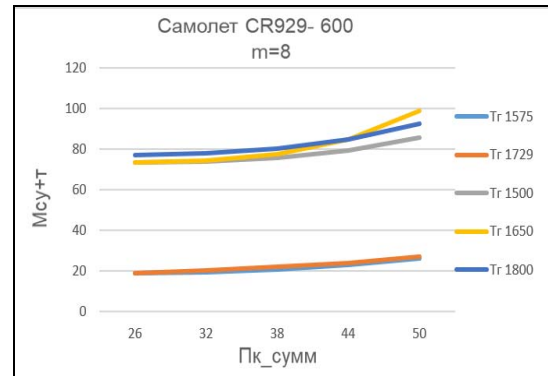
крайне нежелательно, они располагаются сзади, что уменьшает шум в салоне и разворачивающий момент при отказе двигателя, но создает проблемы с «затенением» стабилизатора и двигателей на больших углах атаки и с задней центровкой, что приводит первоначально к помпажу и отказу боковых двигателей, затем отказу среднего, и к резкому уменьшению эффективности руля высоты (самолет попадает в режим глубокого сваливания и далее – плоского штопора, из которого без специального оборудования не выводится) [2].

Вариант расположения двигателей. Нами был рассмотрен не только классический вариант установки двигателя под крылом на пилонах, но и расположение авиаагрегата в хвостовой части и над крылом. Самым оптимальным на данный момент вариантом расположения являются самолеты с авиаагрегатами под фюзеляжем.

Параметры рабочего процесса. Величины параметров рабочего процесса определяют технико-экономические показатели летательного аппарата, поэтому их нужно выбирать такими, чтобы они обеспечивали максимальную эффективность самолета. В качестве критериев анализа выбраны: суммарная масса силовой установки и топлива, потребного на полет на заданную дальность $M_{сy+т}$, удельный расход топлива двигателя – на крейсерском режиме полета и затраты топлива (в кг) на 1 тонна-километр перевезенного груза. Наиболее выгодными будут являться наименьшие значения вышеперечисленных критериев [3].



а



б

График зависимости критериев анализа от m для самолета CR929-600:

$a - C_{т.км}$; $b - M_{сy+т}$

Для их оценки произведено моделирование в САЕ-системе «АСТРА», разработанной в Самарском национально-исследовательском университете имени академика С. П. Королёва, так как погрешность расчетов в данной программе минимальна (менее 1 % по отношению к реальным значениям) [4]. Для дальнейшего моделирования были выбраны Boeing 747, CR 929 и Airbus A340, с модификациями 400ER, 600 и 500 соответственно из-за оптимального количества двигателей и требуемой тяги. Меняя основные параметры рабочего процесса (температуру газа, суммарную степень повышения давления и степень двухконтурности m), построены графические зависимости критериев эффективности для выбранных самолетов. Наиболее подходящим летательным аппаратом для установки проектируемого в данной работе двигателя является самолет CR929-600. График зависимости основных критериев эффективности для данного самолета представлен на рисунке. Наиболее выгодные значения наблюдаются при $m = 8$, $T_r = 1575$ К и 26, является приблизительно равной величиной (58,022 кг/кН·ч), поэтому не учитывается при рассмотрении, а $M_{сy+т}$ и минимальны для самолета CR 929-600 (18,885 и 0,185 соответственно).

Графические соотношения рассматриваемых величин совпадают с идеальными теоретическими с достаточно большой точностью (менее 3 %) [5], что показывает высокие характеристики проектируемого двигателя.

Библиографические ссылки

1. Исследование РБК: на чем летает Россия [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rbc.ru/research/society/27/11/2015/564de81a9a79472dab71463a> (дата обращения: 12.06.2020).
2. ТУ-154 [Электронный ресурс]. URL: <https://russianplanes.net/planelist/Tupolev/Tu-154> (дата обращения: 15.06.2020).

3. Иноземцев А. А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В. Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. В 5 т. Т. 1. Общие сведения. Основные параметры и требования. Конструктивные и силовые схемы. М. : Машиностроение, 2008. 208 с.

4. Формирование математической модели выполненного ГТД различных типов и схем в САЕ-системе АСТРА : метод. указания / сост.: В. В. Кулагин и др. Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосмич. ун-та, 2012. 25 с.

5. Юнаков Л. П. Основы теории авиационных газотурбинных двигателей : учеб. пособие / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2013. 90 с.

References

1. Issledovanie RBK: na chem letaet Rossija [Electronic resource]. URL: <https://www.rbc.ru/research/society/27/11/2015/564de81a9a79472dab71463a> (access: 12.06.2020).
2. TU-154 [Electronic resource]. URL: <https://russianplanes.net/planelist/Tupolev/Tu-154> (access: 15.06.20).
3. Inozemcev A. A., Nihamkin M. A., Sandrackij V. L. Osnovy konstruirovaniya aviacionnyh dvigatelej i jenergeticheskikh ustanovok. V 5 t. T. 1. Obshhie svedeniya. Osnovnye parametry i trebovaniya. Konstruktivnye i silovye shemy. M. : Mashinostroenie, 2008. 208 p.
4. Formirovanie matematicheskoy modeli vypolnenogo GTD razlichnyh tipov i shem v CAE-sisteme ASTRA: jel. metod. ukazaniya / sost.: V.V. Kulagin et al. Samara : Izd-vo Samar. gos. ajerokosm. un-ta, 2012. 25 p.
5. Junakov L. P. Osnovy teorii aviacionnyh gazoturbinnnyh dvigatelej: uchebnoe posobie / Balt. gos. tehn. un-t. SPb., 2013. 90 p.

© Пашкова Н. Д., Безбородова К. В.,
Боброва Е. А., 2020

УДК 681.3

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. А. Пилипенко, К. Ф. Голиковская, С. И. Ньюкалова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: artem-pilipenko-1998@mail.ru

В настоящее время специалисты отмечают несомненные преимущества трехмерного моделирования при проектировании жидкостных ракетных двигателей. 3D-моделирование имеет значительные преимущества, к которым можно отнести возможности визуализации проектируемых деталей, расчета различных вариантов их компоновки. Рассмотрены примеры проектирования деталей ЖРД с использованием трехмерного моделирования.

Ключевые слова: визуализация, этапы проектирования, проектная документация, жидкостный ракетный двигатель.

DESIGN OF LPRE PARTS USING THREE-DIMENSIONAL SIMULATION

A. A. Pilipenko, K. F. Golikovskaya, S. I. Nyukalova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: artem-pilipenko-1998@mail.ru

Currently, experts note the undoubted advantages of digital modeling in the design of liquid rocket engines. 3D-modeling has significant advantages, which include the ability to visualize the projected parts, calculate various options for their layout. The article discusses examples of designing parts of a liquid-propellant engine using 3D-modeling.

Keywords: visualization, design stages, project documentation, liquid rocket engine.

Введение. Проектирование ракетного двигателя – сложный и длительный процесс. В настоящее время специалисты отмечают явные преимущества трехмерного моделирования при проектировании жидкостных ракетных двигателей. Несомненно, использование технологий цифрового моделирования имеет перспективы использования на этапах проектирования в различных отраслях [1]. Это связано с возможностями данной технологии, при которой моделирование воспринимается заказчиком как 3D-модель для визуализации проекта и создания проектной документации. Например, известнейший концерн Boeing, лидер в сфере производства авиационной, космической и военной техники, еще в 1997 году обратился к сфере цифрового моделирования при создании конструктивных особенностей проекта Boeing 777. Были использованы практики DBD (digital product definition) и MBD (model based definition) для решения задач долговременного хранения, поиска и доступа к цифровому определению продукта, что привело в итоге к созданию стандарта под обозначением SAE ARP-9034 в 2003 г. [2].

Переход на трехмерное моделирование в отрасли позволяет преодолевать множество барьеров в производственном процессе.

К преимуществам можно отнести возможности визуализации проектируемых деталей, расчета различных вариантов их компоновки. Кроме того, можно осуществлять автоматизированный контроль коллизий при пересечении смежных разделов в проектах и исключать ошибочную интерпретацию данных [3].

Трехмерное моделирование – это поэтапный процесс, включающий:

- 1) моделирование (формирование математической базы);
- 2) текстурирование (определение и введение свойств объектов);
- 3) симуляция динамики (используется при необходимости оценки взаимодействия частиц или каких-либо объектов);
- 4) рендеринг (проеекционное построение);
- 5) компоновка (завершающий этап для коррекции полученной модели).

В качестве преимуществ трехмерного моделирования специалистами выделены [4]:

- 1) наглядность изделия;
- 2) не требуется дополнительная физическая модель;
- 3) относительно быстрое получение чертежей и макетов изделий. Благодаря трёхмерным методам

можно избавиться от трудоёмких и рутинных занятий. Все построения чертежей происходят автоматически (по желанию пользователя);

4) функциональность. Возможность использования трехмерных моделей в различных программных продуктах и устройствах;

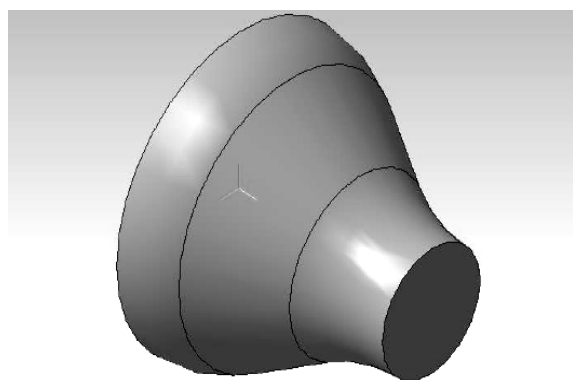
5) пункт «функциональность» тесно связан с возможностью автоматизированного расчета различных свойств изделия, таких как расчет распределения тепла, масс-инерционные характеристики и т. д.

6) гибкость изменения модели. Значительно упрощенное корректирование чертежа или модели.

Так, например, группа специалистов рассматривает возможность использования комплексов программного моделирования для проектирования систем питания и управления ЖРД [5]. Авторами отмечены высокие требования по прочности, жесткости, герметичности, коррозионной стойкости, предъявляемые к трубопроводам.

Проектирование узлов трубопроводов предполагает несколько стадий, закрепленных определенными отраслевыми стандартами (ОСТ 92-1600–84, ОСТ 92-1601–84, ОСТ 92-1602–92) и подразделяется на несколько этапов [6], включающие использование большого количества ручного труда при отсутствии гарантии оптимальной конфигурации трубопровода. В качестве пути решения проблем специалисты называют возможности автоматизации процессов проектирования с применением трехмерного моделирования, что в свою очередь позволит исключить сложный, дорогостоящий и трудоемкий процесс проектирования.

Использование трехмерной модели при проектировании используется при расчетах и других узлах ЖРД. Так, в своей публикации В. С. Комкова и И. В. Ушаков рассмотрели проектирование камеры жидкостного ракетного двигателя [7]. Авторы в своей работе рассмотрели возможности 3D модели для профилирования дозвуковой части сопла и проектировании сопла с конической сверхзвуковой частью и оптимальным углом раскрытия. Математические расчеты и чертежи позволяют построить модель, которая, затем, оптимизируется в части угла наклона образующей расширяющейся части сопла (см. рисунок).



3D-модель для профилирования дозвуковой части сопла

Опираясь на исходные данные построенной модели, были определены необходимые геометрические параметры камеры сгорания и выбран оптимальный угол раскрытия конического сопла.

Другая группа специалистов [8], рассмотрев моделирование газодинамического тракта тарельчатого сопла жидкостного ракетного двигателя с обратным потоком в кольцевой камере сгорания, в полной мере использовали возможности трехмерного моделирования. При проектировании камеры авторами были учтены газодинамические особенности течения и генерируемые тепловые потоки. Была проведена отработка передовых методов проектирования на основе современных цифровых технологий, результатом которой является оптимальная трехмерная модель полученной камеры.

В целом, практически все элементы ЖРД при проектировании подвергаются процедуре трехмерного моделирования. Современные технические решения процессов проектирования позволяют сократить долю ручного труда, оптимизировать рабочие процессы, повысить точность проектирования, что позволит увеличить эффективность работы двигателя в дальнейшем.

Библиографические ссылки

1. Мильников Д. BIM-технологии в системе координат жизненного цикла здания // Connect. 2017. № 3. С. 64–68.
2. Скворцов А. В. Обзор международной нормативной базы в сфере BIM // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2016. № 2. С. 4–48.
3. Ефанов Д. В., Осадчий Г. В. Энергоэффективные решения для систем управления на железнодорожном транспорте // Транспорт РФ. 2019. № 2. С. 16–21.
4. Землянов Г. С., Ермолаева В. В. 3D-моделирование // Молодой ученый. 2015. № 11 (91). С. 186–189.
5. Ярцев Е. Н., Назаров В. П., Теряев Н. С. Реализация автоматизированной системы изготовления трубопроводов в производстве ракетных двигателей // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 3. С. 658–662.
6. Технология производства жидкостных ракетных двигателей / В. А. Моисеев и др. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 381 с.
7. Комкова В. С., Ушков И. В. проектирование камеры жидкостного ракетного двигателя // Точная наука. 2020. № 69. С. 37–41.
8. Косовягин К. В., Скоморохов Г. И. Моделирование газодинамического тракта тарельчатого сопла жидкостного ракетного двигателя с обратным потоком в кольцевой камере сгорания // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15, № 1. С. 100–106.

References

1. Myl'nikov D. BIM-tekhnologii v sisteme koordinat zhiznennogo cikla zdaniya // Connect. 2017. № 3. P. 64–68.

2. Skvorcov A. V. Obzor mezhdunarodnoj normativnoj bazy v sfere BIM // SAPR i GIS avtomobil'nyh dorog. 2016. № 2. P. 4–48.

3. Efanov D. V., Osadchij G. V. Energoeffektivnye resheniya dlya sistem upravleniya na zhelezнодорожном транспорте // Transport RF. 2019. № 2. P. 16–21.

4. Zemlyanov G. S., Ermolaeva V. V. 3D-modelirovanie // Molodoy uchenyj. 2015. № 11 (91). P. 186–189.

5. Yarcev E. N., Nazarov V. P., Teryaev N. S. Realizatsiya avtomatizirovannoy sistemy izgotovleniya truboprovodov v proizvodstve raketnyh dvigatelej // Sibirskij zhurnal nauki i tekhnologij. 2017. T. 18, № 3. P. 658–662.

6. Tekhnologiya proizvodstva zhidkostnyh raketnyh dvigatelej / V. A. Moiseev i dr. M. : Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2008. 381 p.

7. Komkova V. S., Ushkov I. V. proektirovanie kamery zhidkostnogo raketnogo dvigatelya // Tochnaya nauka. 2020. № 69. P. 37–41.

8. Kosovyagin K. V., Skomorohov G. I. Modelirovanie gazodinamicheskogo trakta tarel'chatogo sopla zhidkostnogo raketnogo dvigatelya s obratnym potokom v kol'cevoj kamere sgoraniya // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2019. T. 15. № 1. P. 100–106.

© Пилипенко А. А., Голиковская К. Ф.,
Нюкалова С. И., 2020

УДК 629.7.03

НОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ ВЫХЛОПНОЙ СИСТЕМЫ «КОЛЬЦЕВОЙ РЕЗОНАТОР» ДЛЯ ДВУХТАКТНЫХ ОППОЗИТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

М. А. Рутковская, В. О. Рутковский*

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

*E-mail: jbiplane@gmail.com

Низкоскоростные беспилотные воздушные суда (БВС) используют малогабаритные двухтактные поршневые двигатели внутреннего сгорания с упрощенной выхлопной системой. Классические спортивные резонаторы обеспечивают почти 40 % повышение мощности и существенную экономию топлива, но слишком тяжелы и громоздки для применения в БВС. Авторами статьи изобретены, спроектированы, изготовлены и протестированы четыре различных конструкции компактных резонаторов для оппозитных двухтактных двигателей БВС. Один из вариантов системы «Кольцевой резонатор» показан в данной работе.

Ключевые слова: резонатор двигателя, акустический наддув, топливная экономичность.

NEW DESIGN OF EXHAUST SYSTEM “RING EXHAUST” FOR TWO-STROKE BOXER TYPE ENGINES

M. A. Rutkovskaya, V. O. Rutkovskiy*

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: jbiplane@gmail.com

Low-speed unmanned aircraft (UAV) use small-sized two-stroke piston internal combustion engines with a simplified exhaust system. Classic sports resonators provide almost 40 % power increase and significant fuel savings, but are too heavy and bulky for use in BVS. The authors of the article invented, designed, manufactured and tested four versions of compact resonators for UAV boxer type engines. One designs named “Ring resonator” described in this article.

Keywords: engines resonator, acoustic discharge, fuel efficiency.

Введение. Выхлопной резонатор одноцилиндрового двигателя представляет из себя цилиндрическую начальную часть, конический расширительный элемент, конический отражатель и выхлопной стингер – трубу малого диаметра [1–3]. Для двухцилиндрового двигателя необходимо ставить два резонатора, либо осуществлять выхлоп в общий для двух цилиндров

резонатор увеличенного объема. В предложенной конструкции выхлоп обеих цилиндров направлен в общую симметричную камеру. Расширительный конус одного цилиндра используется как отражательный конус другого (рис. 1), что позволяет практически в два раза уменьшить вес и габариты выхлопной системы двухцилиндрового двигателя.



Рис. 1. Спроектированная и изготовленная оптимизированная выхлопная система

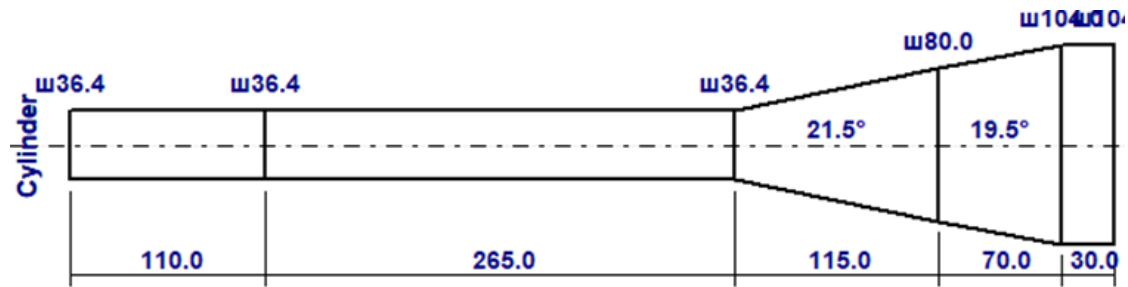


Рис. 2. Редактирование параметров впускной и выпускной системы в EngMod2t

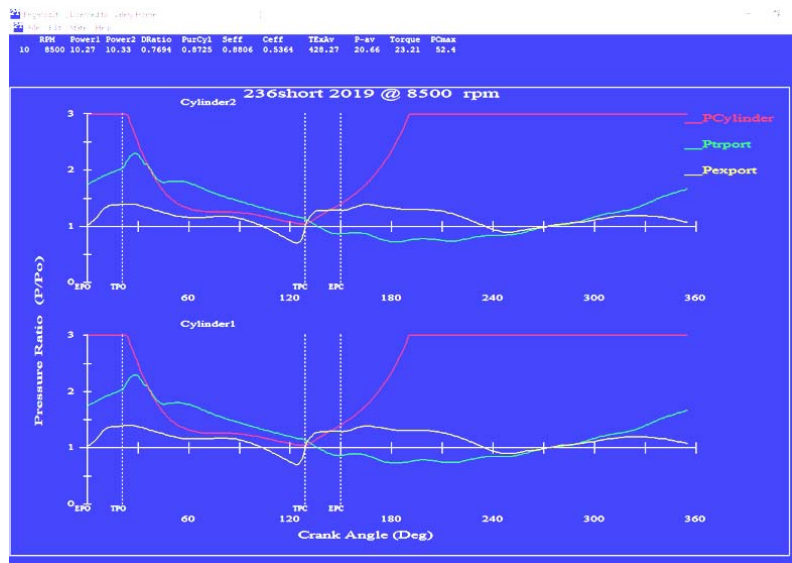


Рис. 3. Процесс расчёта газодинамических процессов и мощности двигателя для заданной частоты вращения коленчатого вала ДВС в программном обеспечении EngMod2t

Расчёт был произведён в системе одномерного анализа параллельно-последовательных каналов двухтактных двигателей внутреннего сгорания EngMod2T <https://vannik.co.za> [3]. Задаем параметры каналов цилиндров двигателя, а также механические характеристики лепестковых клапанов. Программа попытается автоматически подобрать геометрию впускной и выпускной системы, основываясь на встроенных инженерных методиках и моделях сгорания топлива и теплообмена.

Приведём в качестве примера проектирования элемента навесного оборудования проектирование одной из наиболее влияющих на параметры двигателя выпускной системы. EngMod2t позволяет, меняя параметры, в пакетном режиме, итерационно произвести множество расчётов (рис. 2, 3), добываясь нужных характеристик двигателя (мощность, экономичность).

Библиографические ссылки

1. Bell A. G. Two-Stroke Performance Tuning (2nd Edition). HAYNES MANUALS INC, Newbury Park, United States, 1999. 271 p.

2. Двигатели внутреннего сгорания : сборник статей / под общ. ред. А. С. Орлина ; Московское высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана. М. : Машигиз, 1954. 148 с.

3. Niekerk V., Johannes C. G. Effect of the tailpipe entry geometry on a two-stroke engine's performance prediction [Электронный ресурс]. URL: <http://hdl.handle.net/2263/29152> (дата обращения: 06.09.2020).

References

1. Bell A. G. Two-Stroke Performance Tuning (2nd Edition). HAYNES MANUALS INC, Newbury Park, United States, 1999. 271 p.

2. Internal combustion engines / pod obshch. red. A. S. Orlina ; Moscow Higher Technical School. M. : Mashgis. 1954. 148 p. (In Russ.)

3. Niekerk V., Johannes C. G. Effect of the tailpipe entry geometry on a two-stroke engine's performance prediction [Electronic resource]. URL: <http://hdl.handle.net/2263/29152> (access: 06.09.2020).

© Рутковская М. А., Рутковский В. О., 2020

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Д. А. Савчин, В. П. Назаров

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

Рассмотрены вопросы моделирования процесса кавитационных испытаний насосов ЖРД. Представлены модели автоматизированного и неавтоматизированного процессов испытаний, проведен сравнительный анализ результатов.

Ключевые слова: шнекоцентробежный насос, кавитация, моделирование.

THE MODELING PROCESS OF CAVITATION CHARACTERISTIC DETERMINATION OF LIQUID-PROPELLANT ROCKET ENGINE PUMPS

D. A. Savchin, V. P. Nazarov

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

The paper describes the modeling of cavitation characteristic determination. It contains the models of automated and non-automated test processes as well as the analysis of results.

Keywords: centrifugal pump, cavitation, modeling.

Одним из основных показателей эксплуатационной надежности ЖРД является обеспечение точности и достоверности результатов испытаний, которые проводятся в процессе производства узлов и агрегатов двигателя [1]. Гидродинамические испытания центробежных насосов системы подачи топлива относятся к категории наиболее сложных и трудоемких видов технологических испытаний, поскольку сопровождаются быстропротекающими гидравлическими явлениями и высокой динамикой изменения контролируемых параметров. В первую очередь это относится к кавитационным испытаниям, целью которых является определение кавитационных характеристик (КХ) каждого конкретного насоса [2].

В связи с этим совершенствование методики кавитационных испытаний представляет собой актуальную научно-техническую задачу. Для решения данной задачи предлагается использовать методы моделирования системы измерения параметров, работы технологического оборудования и всего процесса испытаний в целом. Моделирование выполнено в автоматизированном и неавтоматизированном вариантах в программном пакете Simulink [3].

Модель процесса получения кавитационной характеристики состоит из моделей датчиков, моделей управляющих элементов, а также модели насоса, описывающей его работу в условиях изменяющегося входного давления.

Рассмотрим зависимость (1), определяющую величину критического кавитационного подпора, который является показателем антикавитационных свойств насоса:

$$\Delta h_{\text{срв}} = \frac{p_{\text{срв}} - p_{\text{н.п}}}{\rho} \quad (1)$$

где $p_{\text{срв}}$ – полное критическое входное давление, приводящее к срыву насоса, Па; $p_{\text{н.п}}$ – давление насыщенных паров жидкости, Па; ρ – плотность рабочей жидкости, кг/м³.

Как видно из выражения (1) для определения критического кавитационного подпора в ходе испытаний необходимо определить давление $p_{\text{срв}}$. Также из формулы (1) видно, что наибольший вклад в точность вносят погрешности, связанные с определением давления. В связи с этим было выполнено моделирование датчиков давления и манометров.

В моделируемой системе применен датчик аналогичный пьезорезистивному датчику модели «Dmp 333». Для определения зависимости между измеряемым давлением и выходным сигналом датчика требуется определить передаточную функцию. Согласно источнику [4] передаточная функция – это идеальное соотношение между входным и выходным сигналом. Передаточная функция датчиков представлена в виде линейной зависимости.

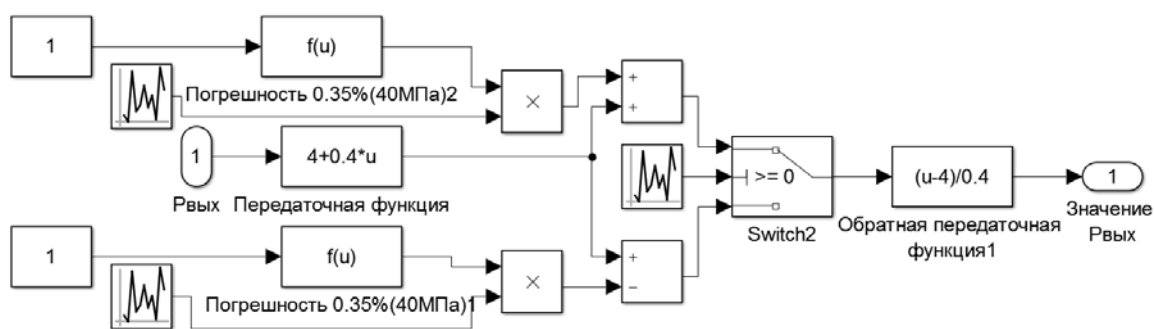


Рис. 1. Модель датчика давления в пакете Simulink

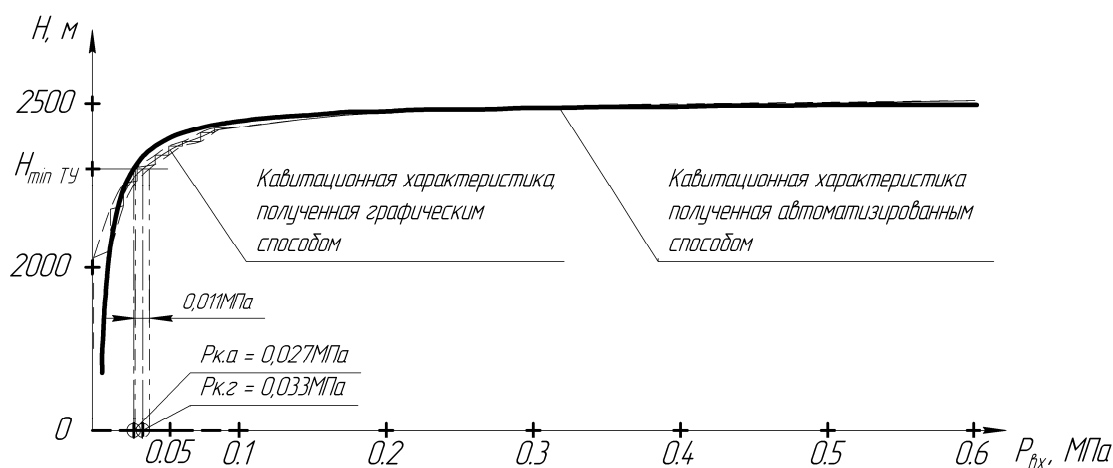


Рис. 2. Результаты моделирования испытаний

Для датчика с диапазоном измерений 0...40 МПа передаточная функция определяется выражением:

$$S = 4 + 0,4s, \quad (2)$$

где S – значение выходного сигнала датчика, мА; s – измеряемое давление, МПа.

Для приближения модели датчика к реальному прибору необходимо учитывать влияние погрешности.

В представленной модели погрешность датчика представлена как абсолютная погрешность, случайно изменяющаяся в интервале значений 0...0.35 %. Также случайным образом изменяется знак погрешности. Пример модели датчика представлен на рис. 1.

Подобным образом осуществлено моделирование стрелочных манометров. В этом случае погрешность измерения состоит из погрешности прибора, определяемой исходя из класса точности, а также субъективной погрешности, определяемой индивидуальными особенностями оператора [5].

Для ступенчатого снижения давления на входе в насос, согласно методике испытаний, используется компенсационная емкость, соединенная с вакуумным насосом. Моделирование данной системы сводится к нахождению дискретной функции, удовлетворяющей требованиям по амплитуде снижения давления и количеству контрольных точек. При автоматизированном определении КХ предполагается бесступенчатое

снижение давления на входе в насос, в этом случае используется линейная убывающая функция.

Учитывая значительную сложность процесса работы насоса в условиях кавитации, в рамках данной работы моделирование насоса было выполнено путем подбора функции, максимально приближенной к виду КХ. В качестве такой функции была выбрана гипербола.

Автоматизированный процесс получения кавитационной характеристики включает в себя алгоритм, содержащий условие прекращения испытаний при достижении условия $H < H_{ту}$ и фиксирования соответствующего $p_{срв}$. При неавтоматизированном процессе определение $p_{срв}$ выполнено графически. В итоге были получены следующие результаты:

При $H_{мин ту} = 2300$ м разница между $p_{срв}$, полученным автоматизированным и графическим способом доходит до 18% при этом погрешность определения $p_{срв}$ графическим способом доходит до ± 15 %. Для повышения точности неавтоматизированного способа необходимо увеличивать количество контрольных точек, что потребует увеличения времени, затрачиваемого на испытания с усилением влияния кавитационной эрозии. Для исключения влияния эрозии необходимо сократить время, для регистрации параметров, что увеличит субъективную погрешность, снижая точность. В итоге увеличение точности получения

кавитационной характеристики без увеличения времени работы насоса в условиях кавитации возможно только при автоматизированной системе проведения кавитационных испытаний.

Библиографические ссылки

1. Испытание и обеспечение надежности : учебник / А. И. Коломенцев, М. В. Краев, В. П. Назаров [и др.] ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск ; М. : МАИ, 2006. 336 с.
2. Овсянников Б. В., Боровский Б. И. Теория и расчет агрегатов питания ЖРД. 3-е изд. М. : Машиностроение, 1986. 376 с.
3. Exponenta [Электронный ресурс]. URL: <https://exponenta.ru/simulink> (дата обращения 25.07.2020).
4. Фрайден Дж., Современные датчики : справочник. М. : Техносфера, 2005. 592 с.
5. Яременко О. В. Испытания насосов : справочное пособие. М. : Машиностроение, 1976, 225 с.

References

1. Kolomencev A. I., Kraev M. V., Nazarov V. P. *Isipyatanie i obespechenie nadezhnosti* [Testing and ensuring reliability] / Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk ; M. : MAI publ., 2006, 336 p.
2. Ovsyannikov B. V., Borovsky B. I. *Teoriya i raschet agregatov pitaniya ZhRD*. [The theory and calculation of unit of liquid rocket engines] Vol. 3, M. : Mashinostroenie, 1986, 376 p.
3. Exponenta [Electronic resource]. URL: <https://exponenta.ru/simulink> (access: 25.07.2020).
4. Fraden J. *Sovremennyye datchiki. Spravochnik*. [The modern detectors. Handbook] Moscow: Technosfera publ, 2005. 592 p.
5. Yaremenko O. V. *Ispytania nasosov. Spravochnoye posobie*. [The Pump testing. Handbook]. M. : Mashinostroenie publ, 1976. 225 p.

© Савчин Д. А., Назаров В. П., 2020

УДК 621.45.01

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ТАРИРОВАНИЯ БАЛАНСИРНЫХ ДИНАМОМЕТРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА

А. А. Соболев, В. П. Назаров, Л. П. Назарова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: ale9130@mail.ru

Проводится анализ методики аттестации и поверке балансирного динамометра для измерения крутящих моментов на стенде испытания насосов. Рассмотрены особенности конструкции балансирного динамометра.

Ключевые слова: насос, мощность, измерение крутящего момента.

FEATURES OF CARRYING OUT OF CHECK OF SHAKING DYNAMOMETERS FOR MEASUREMENT OF THE TWISTING MOMENT

A. A. Sobolev, V. P. Nazarov, L. P. Nazarova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: ale9130@mail.ru

The analysis of a technique of certification and check of a shaking dynamometer for measurement of the twisting moments at the stand of test of pumps is carried out. Features design of a shaking dynamometer are considered.

Keywords: pump, engine power, measurement of the twisting moment.

Центробежные насосы получили широкое распространение в системах подачи топлива ЖРД. Условия высокой надёжности и устойчивости работы повышают требования к производственному циклу изготовления насосов, одним из важных этапов которого являются гидродинамические испытания [1; 2]. Во время проведения испытания насосов определяют их основные энергетические характеристики, в том числе потребляемую мощность насоса, необходимую для расчета коэффициента полезного действия насоса.

Потребляемая мощность определяется как произведение частоты вращения вала на крутящий момент, передаваемый валом. Если в настоящее время частоту вращения вала насоса контролируют с достаточной точностью и высокой скоростью измерения, то при измерении крутящего момента существуют технические сложности, связанные с методикой тарирования испытательного оборудования.

Для измерения крутящего момента на валу насоса на предприятиях ракетно-космической промышленности получили распространение балансирные динамометры [3; 4]. В работе [3] рассмотрены вопросы проведения тарирования (аттестации) балансирных динамометров, также рассмотрены вопросы точности проведения тарирования и анализ полученных погрешностей. Даны некоторые рекомендации по устранению погрешности измерения и повышению стабильности показаний балансирного динамометра.

Несмотря на относительную простоту схемы балансирного динамометра, при проведении аттестации стенда есть несколько не учтённых факторов влияющих на точность измерения. При проведении тариро-

вания динамометра на время аттестации, на раму динамометра устанавливается поверочный рычаг 2 заданной длины, показанный на рис. 1. Его расположение определяется возможностью проведения контрольных измерений, как в статическом состоянии, так и при работающем двигателе, которое не совпадает с геометрической осью качания балансирного динамометра. Установка поверочного рычага рядом с рычагом 1 уравновешивающей силы силоизмерительного устройства невозможна ввиду ограниченного пространства испытательного стенда. Смещение точки приложения силы веса контрольного груза относительно оси, проходящей через рычаг 1, вызывает угловую погрешность определения крутящего момента.

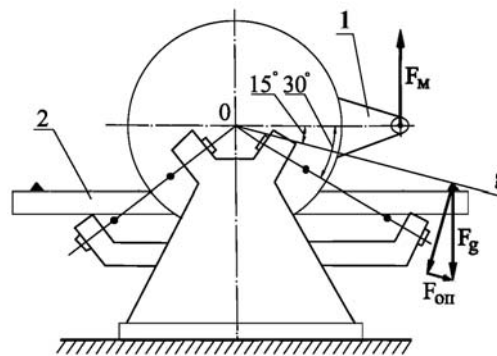


Рис. 1. Распределение сил при проверочных испытаниях

При этом действующей методикой не учитывается расположение поверочного рычага на балансирной

раме вдоль оси вращения балансирующей рамы, которое схематично показано на рис. 2.

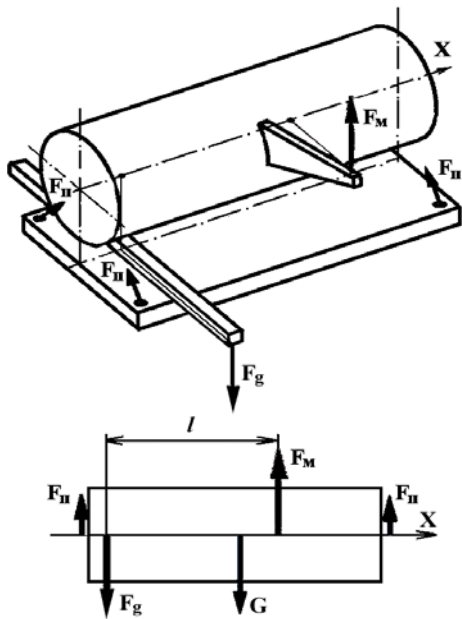


Рис. 2. Условное расположение рычагов

На рис. 2 представлено графическое расположение силовых нагрузок: сила веса G всей конструкции подвижной части динамометра, силы в упругих подвесках F_n , удерживающих балансирующую раму, сила поперечного груза F_g и сила удерживающая вращение балансирующей рамы F_M от измерительной части динамометра. При воздействии поперечным грузом на балансирующую раму, возникает неучётный крутящий момент $M_{см}$ (момент смещения) в связи с расхождением точек приложения силы веса контрольного груза и удерживающей силы от измерительной части динамометра. Величина этого момента будет зависеть от расстояния l смещения между этими силами.

Такое расположение поперечного рычага на балансирующей раме приводит к разной деформации упругих подвесок при поперечных испытаниях стенда, которые отличны от деформации их при проведении измерения крутящего момента на испытуемом насосе. Дополнительный вес, воздействуя на балансирующую раму, непременно будет удлинять упругие подвески. Степень удлинения упругих подвесок зависит от формы и размеров подвесок. Поэтому, отклонение рычага l от первоначального положения балансирующей рамы, не связанное с её вращением, будет воспринято измерительным устройством как дополнительный момент, приложенный к балансирующему динамометру.

На основании анализа погрешностей при измерении крутящего момента в процессе гидродинамических испытаний насосов разработаны предложения по совершенствованию методики тарирования балансирующих динамометров.

Рекомендуется имитировать крутящий момент на валу привода, не нагружая балансирующую раму дополнительным весом контрольного груза. Например, прикладывать измерительный момент к валу привода,

предварительно застопорив его от вращения, в соответствии со схемой, изображенной на рис. 3.

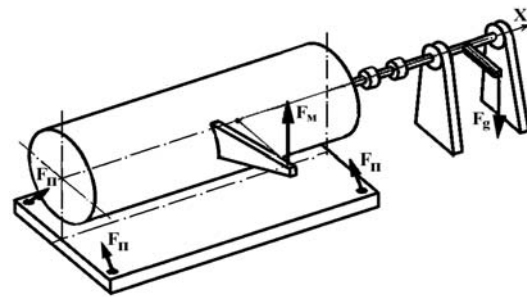


Рис. 3. Схема устройства приложения нагрузки двигателя

Такой подход к проведению тарирования устройств для измерения крутящих моментов, основанных на балансирующих динамометрах, позволит повысить точность определения основных параметров насосов ЖРД.

Библиографические ссылки

- ГОСТ 17335–79. Насосы объёмные. Правила приёмки и методы испытаний : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утверждён и введён в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 30.07.79 № 2859 : принято с изменениями 12.04.96 разработан Министерством тяжёлого машиностроения СССР. М. : ИПК Изд. стандартов, 1999. 24 с.
- Технология сборки и испытаний насосов ЖРД : учеб. пособие / М. В. Краев, В. П. Назаров, Л. П. Назарова, Б. Ф. Оратынский ; Сиб. аэрокосмич. акад. Красноярск, 1993. 103 с.
- Кац С. М. Балансирующие динамометры для измерения вращающего момента : Б-ка по автоматике. Вып. 65. М.-Л. : Госэнергоиздат, 1962. 144 с.
- Фролов Л. Б. Измерение крутящего момента : Б-ка по автоматике. Вып. 228. М. : Энергия, 1967. 120 с.

References

- GOST 17335–79. Nасы ob'yemnyye. Pravila priyemki i metody ispytaniy : natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii : izdaniye ofitsial'noye : utverzhden i vveden v deystviye Postanovleniyem Gosudarstvennogo komiteta SSSR po standartam ot 30.07.79 № 2859 : prinyato s izmeneniyami 12.04.96 razrabotan Ministerstvom tyazhëlogo mashinostroye-niya SSSR. M. : IPK Izd. standartov, 1999. 24 p.
- Tekhnologiya sborki i ispytaniy nasosov ZHRD : ucheb. posobiye / M. V. Krayev, V. P. Nazarov, L. P. Nazarova, B. F. Oratynskiy ; Sib. aerokosmich. akad. Krasnoyarsk, 1993. 103 p.
- Kats S. M. Balansirnyye dinamometry dlya izmereniya vrashchayushchego momenta : B-ka po avtomatike. Vyp. 65. M.-L. : Gos-energoizdat, 1962. 144 p.
- Frolov L. B. Izmereniye krutyashchego momenta : B-ka po avtomatike. Vyp. 228. M. : Energiya, 1967. 120 p.

© Соболев А. А., Назаров В. П., Назарова Л. П., 2020

УДК 621.45.02

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА СТЕНДА ИСПЫТАНИЙ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ БУСТЕРНЫХ ЭЛЕКТРОНАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

Д. А. Соколов, Д. С. Баленков, М. И. Толстопяттов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: dimka.sokolov.1997@mail.ru; Kubit24rus@mail.ru

Рассматриваются особенности конструкции стенда для проведения испытаний, описана методика обработки данных по полученным экспериментальным данным, при определении КПД электронасосного агрегата.

Ключевые слова: электронасосные агрегаты, КПД, методика обработки данных.

SCHEMATIC DIAGRAM OF THE TEST BENCH AND METHOD FOR PROCESSING EXPERIMENTAL DATA OF BOOSTER ELECTRIC PUMP UNITS

D. A. Sokolov, D. S. Balenkov, M. I. Tolstopyatov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: dimka.sokolov.1997@mail.ru; Kubit24rus@mail.ru

The paper considers the design features of the test bench, describes the data processing method based on the experimental data obtained when determining the efficiency of an electric pump unit.

Keywords: electric pump units, efficiency, methods of data processing.

В проводимой работе рассматривается возможность применения электродвигателей (ЭД) в качестве приводов бустерных насосных агрегатов (БНА). В ракетных двигателях БНА применяют для предотвращения явления кавитации в основных насосах. В большинстве БНА приводом является гидро- или газовая турбина, имеющие некоторые недостатки, такие как низкий КПД, сложность изготовления и сложность управления. Применение ЭД позволит упростить общую схему ЖРД, повысить общий КПД системы и упростить запуск ЖРД разгонного блока [1].

На данный момент по теме исследования выполнены: методика расчёта БНА, позволяющая теоретически определить эффективность использования ЭД в качестве приводов БНА, в сравнении с гидротурбиной. Также разработана принципиальная схема стенда для испытаний электронасосного агрегата ЖРД, которая позволит экспериментально подтвердить теоретические данные, полученные в ходе расчётного этапа.

Следующим этапом в проводимом исследовании является составление методики проведения эксперимента и разработка методики обработки полученных результатов.

Основными частями и системами стенда (см. рисунок) являются: испытываемый насос, пневмогидравлическая система, средства измерения.

Рабочей жидкостью для испытаний является чистая холодная вода, качество которой должно соответствовать требованиям, предусмотренным в отраслевой нормативно-технической документации:

температура не выше 313 К (40 °С), плотность до 1100 кг/м³. [2]

Гидравлическая система испытательного стенда выполняется в виде замкнутого контура по схеме: расходная емкость – всасывающий трубопровод – испытываемый насос – напорный трубопровод – расходная емкость.

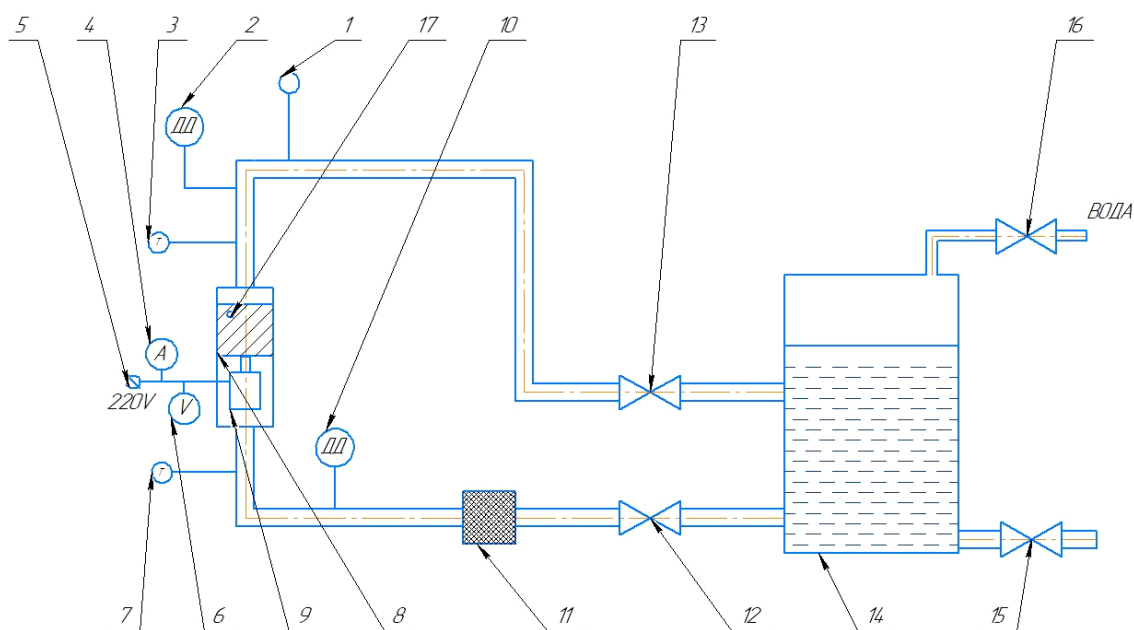
Расходная емкость служит тепловым аккумулятором и компенсатором температурного расширения жидкости, деаэратором и гасителем пульсаций потока.

Перед входом в насос устанавливается сетчатый многослойный фильтр для очистки воды от механических примесей.

Для исключения влияния стеновых трубопроводов на гидравлические характеристики электронасоса, его устанавливают таким образом, чтобы на входе и выходе создавались прямолинейные участки трубопровода. Стеновые магистрали должны быть герметичны на всех режимах работы. Течи в соединениях не допускаются.

В качестве регулирующих и запорных органов пневмогидравлической системы используются вентили. Регулирующие органы, используемые как дроссельные устройства, предназначены для изменения гидравлического сопротивления системы при получении рабочей характеристики.

В процессе подготовки стенда к проведению испытаний необходимо проверить внешнее состояние насоса, лёгкость вращения его ротора.



Принципиальная схема стенда для испытаний бустерных насосов:
 1 – датчик расхода; 2, 10 – датчик давления; 3, 7 – датчик температуры; 4 – амперметр; 5 – источник питания;
 6 – вольтметр; 8 – шнек; 9 – электродвигатель; 11 – фильтр; 12, 13, 15, 16 – вентиль; 14 – расходная емкость;
 17 – датчик оборотов

Во избежание засорения насоса мелкими частицами и пылью предварительно необходимо промыть рабочие полости стенда водой.

Далее необходимо установить насос и необходимое измерительное оборудование, а именно датчики расхода, давления, температуры, амперметр, вольтметр и фильтр. После чего все приборы приводятся в рабочее состояние и проверяется нулевое положение датчиков. Для проверки правильности монтажа элементов стенда необходимо произвести предварительный запуск ЭД на пониженной мощности.

При этом необходимо оценить уровень шума, наличие посторонних звуков и проверить герметичность соединений трубопроводов.

При определении рабочей характеристики электронасоса измеряют и определяют следующие параметры: объемный расход рабочей жидкости, давление на входе в насос, давление на выходе из насоса, скорость вращения шнека насоса, температуру воды, напряжение и силу тока, подаваемые от источника питания на электродвигатель. Коэффициент полезного действия (КПД) шнека и КПД электродвигателя при проведении испытаний не определяется, так как определяется КПД электронасосного агрегата в целом.

КПД электронасосного агрегата определяется как:

$$\eta = \frac{H \cdot m}{N},$$

где H – напор, создаваемый насосом; m – массовый расход воды; N – потребляемая электродвигателем мощность.

Напор, создаваемый насосом определяется как

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho},$$

где P_2 – давление на выходе из насоса, измеряемое датчиком давления 2; P_1 – давление на входе в насос, измеряемое датчиком давления 10; ρ – плотность воды, справочная величина равная 1000 кг/м^3 .

Массовый расход определяется аналитически по формуле:

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V},$$

где ρ – плотность воды; \dot{V} – объемный расход, измеряемый ротаметром, установленный после электронасосного агрегата.

Мощность, потребляемая электродвигателем, определяется как:

$$N = U \cdot I,$$

где U – напряжение источника питания; I – ток источника питания;

Таким образом, разработанная методика обработки данных позволяют подтвердить полученный ранее аналитическим путём КПД электронасосного агрегата.

Эксперимент также позволит проверить работу электродвигателя в жидкой среде. Следующими этапами в проводимом исследовании являются создание методики учёта погрешностей при проведении эксперимента и обработки результатов и проектирование стенда для испытаний.

Библиографические ссылки

1. Баленков Д. С., Соколов Д. А., Толстопяттов М. И. Анализ использования электродвигателей в качестве привода для бустерных насосов ЖРД разгонных блоков // Гагаринские чтения-2019 : материалы XLV междунар. науч. конф. ; МАИ. М., 2019. С. 172–173.

2. Технология сборки и испытаний насосов жидкостных ракетных двигателей : учеб. пособие / М. В. Краев, В. П. Назаров, Л. П. Назарова и др. ; Сиб. аэрокосмич. акад. Красноярск, 1993. С. 35–40.

References

1. Balenkov D. S., Sokolov D. A., Tolstopyatov M. I. [Analysis of the perspectives of using the electric motor as a drive the booster pumps of the loader pumps] // *Gagarinskie chtenia : Materialy XLV Mezhdunar. nauch. konf.* [Materials XLV International scientific conference

"Gagarin Science Conference"]. М., 2019. P. 172–173 (In Russ.)

2. *Tekhnologiya sborki i ispytaniy nasosov zhidkostnyh raketnyh dvigatelej* [Technology for Assembly and testing of liquid rocket engine pumps] / М. В. Краев, В. П. Назаров, Л. П. Назарова et al. ; Sib. aerokosmich. akad. Krasnoyarsk, 1993. P. 35–40 (In Russ.)

© Соколов Д. А., Баленков Д. С.,
Толстопятов М. И., 2020

УДК 629.7.036.54.063.6:621.565.93/.94

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ, ОСНОВАННЫХ НА УРАВНЕНИИ РЭЛЕЯ-ПЛЕССЕТА, К МОДЕЛИРОВАНИЮ КАВИТАЦИОННОГО ПОТОКА В ТУРБОНАСОСНОМ АГРЕГАТЕ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

А. С. Торгашин, А. М. Бегишев, А. В. Власенко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: ttarg23@yandex.ru

Рассматривается возможность использования различных уравнений, описывающих поведения пузыря кавитации, для моделирования потоков в ТНА ЖРД.

Ключевые слова: ЖРД, насос, кавитация.

APPLICATION OF MODELS BASED ON THE RAYLEIGH-PLESSET EQUATION TO THE SIMULATION OF THE CAVITATION FLOW IN TNA LRE

A. S. Torgashin, A. M. Begishev, A. V. Vlasenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: ttarg23@yandex.ru

The possibility of using various equations describing the behavior of the cavitation bubble to simulate flows in the HPA of a liquid-propellant engine is considered.

Keywords : LRE, pump, cavitation.

С развитием методов численного моделирования различных физических явлений и увеличением числа применяемых математических моделей, все чаще рассматривается их применение к частным случаям того или иного физического явления. Например кавитация, возникающая в межлопаточных каналах турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей. Кавитацией называют фазовый переход от жидкости к газу внутри динамически движущейся жидкости при определенной температуре и давлении. В насосах ТНА ЖРД кавитация возникает вследствие местных понижений давления до давления насыщенного пара, вызванных обтеканием потока жидкости лопаток [1]. Кавитация в ТНА приводит к срыву работы насоса и всего двигателя в целом.

В настоящее время достаточно много программных сред (таких, как ANSYS или STAR-CD), специализирующихся на вычислительной гидродинамике, включают в себя одну или сразу несколько моделей кавитации. Данные модели, в основном основаны на модификации уравнения Рэлей-Плессета. Данное уравнение, выводимое из уравнения моментов, описывает рост газового пузырька в жидкости:

$$R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_B}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho_f R_B} = \frac{p_v - p}{\rho_f},$$

где R_B – радиус пузырька; p_v – давление в пузырьке (предполагается что это давление пара при температуре жидкости); p – давление в жидкости, окружаю-

щей пузырь; ρ_f – плотность жидкости; σ – коэффициент поверхностного натяжения между жидкостью и паром.

На данный момент используются такие модели кавитации, основанные на уравнения Рэлей-Плессета, как: модель Singhal et al; модель Zwart-Gerber-Belamri; модель Schnegg and Sauer. Все они интегрированы в программный пакет ANSYS и работают совместно с уравнением Эйлера. Данные модели разработаны с учетом следующих физических допущений: исследуемая система должна включать жидкую и паровую фазы, и предполагается, что между паровой и жидкой фазой происходит массообмен [2]. Также, в данных моделях не учитываются потери в потоке, напрямую влияющие на значения напора насоса. Помимо этого, необходимо учитывать, что на точность моделирования кавитационного потока влияет и сама геометрическая модель лопаточного колеса.

В настоящее время проведён ряд исследований, например в работах [3; 4], по моделированию кавитационного потока в схожих рабочих колесах насосных агрегатов с использованием вышеупомянутых моделей кавитации. Также, в работе [5] прорабатывались исследования связанные с моделированием кавитационного потока ТНА ЖРД в среде ANSYS CFX и ставился вопрос о задаче моделирования данного потока. В ходе сравнения с экспериментальными показаниями, данные моделей всегда показывали более высокие значения напора и низкие значения числа кавитации.

Наиболее близкие к реальным показаниям данные дает модель Zwart-Gerber-Belamgi. В данной модели предполагается, что все пузырьки в системе имеют одинаковый размер, а также учитывается взаимодействие между пузырями кавитации по мере их роста. В конечном виде, формула описывающая радиус кавитационного растущего (испаряющегося) пузыря [2]:

$$R_e = F_{\text{vap}} \frac{3\alpha_{\text{nuc}}(1-\rho_v)P_v}{\mathfrak{R}_B} \sqrt{\frac{2P_v - P}{3\rho_l}},$$

где \mathfrak{R}_B – радиус пузыря; α_{nuc} – объемная доля центра ядра; F_{vap} – коэффициент испарения; P_v – давление пузыря; P – локальное давление; ρ_l – плотность жидкой фазы; ρ_v – плотность паровой фазы.

Несмотря на определенные допущения, модель Zwart-Gerber-Belamgi подходит для работы по моделированию кавитационного потока в ТНА ЖРД с целью оптимизации геометрии рабочего колеса.

Библиографические ссылки

1. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей : учебник / Г. Г. Гахун, В. И. Баулин, В. А. Володин и др. ; под общ. ред. Г. Г. Гахуна. М. : Машиностроение, 1989. 424 с.
2. ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide. April 2009. ANSYS Inc.
3. Cavitation modeling for steady-state CFD simulations / L. Hanimann, L. Mangani, E. Casartelli, M. Widmer // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. 2016.
4. Unsteady Flow and Structural Behaviors of Centrifugal Pump under Cavitation Conditions / Wu Denghao, Ren Yun, Mou Jiegang, Gu Yunqing,

Jiang Lanfang // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2019.

5. Торгашин А. С., Жуйков Д. А. К постановке задачи моделирования кавитации в турбонасосных агрегатах ЖРД // Решетневские чтения : материалы XXIII Междунар. науч. конф. : в 2 ч. / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2019.

References

1. Konstrukciya i proektirovanie zhidkostnyh raketnyh dvigatelej: Uchebnik dlya studentov vuzov po special'nosti «Aviacionnye dvigateli i energeticheskie ustanovki» / G. G. Gahun, V. I. Baulin, V. A. Volodin et al. ; pod obshch. red. G. G. Gahuna. M. : Mashinostroenie, 1989. 424 p.
2. ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide. April 2009. ANSYS Inc.
3. Cavitation modeling for steady-state CFD simulations / L. Hanimann, L. Mangani, E. Casartelli, M. Widmer // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. 2016.
4. Unsteady Flow and Structural Behaviors of Centrifugal Pump under Cavitation Conditions / Wu Denghao, Ren Yun, Mou Jiegang, Gu Yunqing, Jiang Lanfang // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2019.
5. Torgashin A. S., Zhujkov D. A.. K postanovke zadachi modelirovaniya kavitacii v turbonasosnyh agregatah ZHRD // Reshetnevskie chteniya : materialy XXIII Mezhdunar. nauch. konf. : v 2 ch. Reshetnev University. Krasnoyarsk, 2019.

© Торгашин А. С., Бегишев А. М.,
Власенко А. В., 2020



Секция

**«ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ
В КОНСТРУКЦИЯХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ,
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
И СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ»**

УДК 621.57

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОРЕБРЕНИЯ ПОЛОСТИ ТЕРМОКОМПРЕССОРА*

Е. В. Благин, А. И. Довгялло, И. А. Усков, Е. П. Кузнецова

Самарский научно-исследовательский университет имени академика С. П. Королева
 Российская Федерация, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34
 E-mail: evgenyblagin@gmail.com

Рассматривается вопрос повышения площади поверхности теплоотдачи в полости термокомпрессора за счет установки внутренних продольных ребер. Разработан алгоритм определения оптимальных параметров оребрения.

Ключевые слова: термокомпрессор, цилиндр, поршень, поверхность теплообмена, теплопроводность.

DETERMINING PARAMETERS OF THE RIBBING THERMOCOMPRESSOR CAVITY

E. V. Blagin, A. I. Dovgallo, I. A. Uskov, E. P. Kuznetsova

Samara National Research University
 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation
 E-mail: evgenyblagin@gmail.com

In this article, we are looking at the issue of increasing heat exchange surface of the thermocompressor cavity due to the installation of internal extensional ribs. An algorithm for determining the optimal parameters of the ribbing has been developed.

Keywords: thermocompressor, cylinder, piston, heat exchange surface, thermal conductivity.

Введение. Ребристые поверхности применяют для увеличения теплообменной поверхности, которые характеризуются наибольшими термическими сопротивлениями. Важным условием эффективного использования ребер поршня является их плотное соприкосновение с цилиндром (отсутствие воздушной прослойки), а также рациональное размещение ребер.

Применение оребренной поверхности в полостях термокомпрессора позволяет обеспечить стабильный высокий тепловой поток в полостях термокомпрессора, особенно в случае использования низкопотенциального тепла.

Расчетные соотношения. Геометрические параметры полости термокомпрессора определяются несколькими факторами: величина вытесняемого объема определяется рабочими параметрами термокомпрессора, такими как степень повышения давления, отношение температур полостей и частота привода.

Кроме того, как правило, величина хода поршня является зависимой от внешних факторов и также задается. Таким образом, величина площади поперечного сечения полости термокомпрессора является величиной, задаваемой извне и независимой от геометрических параметров самой полости.

В то же время интенсивность подвода тепла зависит от того, насколько развита поверхность теплооб-

мена в полости термокомпрессора. Для увеличения площади поверхности предлагается использовать продольные ребра как на цилиндре, так и на ответной части поршня-вытеснителя.

Схема оребрения представлена на рисунке.

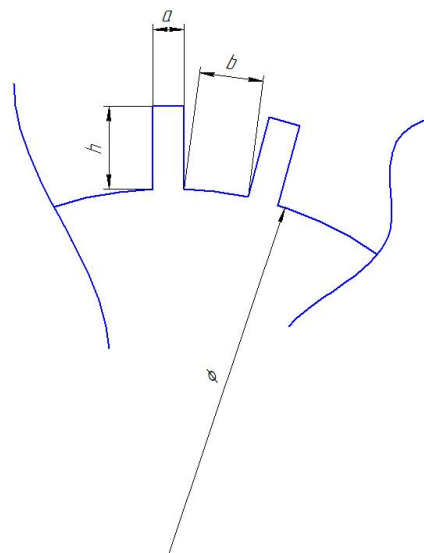


Схема оребрения

*Результаты работы получены с использованием оборудования центра коллективного пользования «Межкафедральный учебно-производственный научный центр САМ-технологий» при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № FSSS-2020-0019).

Площадь поверхности теплообмена является произведением хода поршня на периметр поверхности оребрения, а так как ранее выяснено, что ход поршня является внешним параметром, то на выходе получаем задачу максимизации периметра при постоянной площади поперечного сечения.

Периметр можно представить через параметры сечения: $P = n(2h + a + b)$.

Параметры шага и толщины ребра связаны с диаметром основания через соотношение: $n(a + b) = \pi d$.

Площадь поперечного сечения приближенно можно оценить как $F = \pi d^2 + nah$.

После подстановки уравнений получаем, что максимум функции периметра зависит от одной заданной величины (площади поперечного сечения) и трех варьируемых (диаметр окружности, расстояние между ребрами и число ребер). Целесообразно провести

оптимизацию численным методом, для чего был написан алгоритм на программном языке Python 2.7.

В расчете задавались технологические требования путем задания минимального шага и толщины ребра (не менее 1 мм) и требования по жесткости путем задания максимального соотношения высоты ребра к его толщине и шагу.

Результаты. Был произведен расчет параметров оребрения для полости термокомпрессора со степенью повышения давления 1,5, отношением температур 3, частотой 3 Гц и ходом поршня 120 мм. Оптимальными параметрами оребрения оказались: диаметр основной окружности 115 мм, ширина ребра 2 мм, расстояние между ребрами 2 мм, высота ребра 19,5 мм, число ребер – 90.

© Благин Е. В., Довгялло А. И., Усков И. А.,
Кузнецова Е. П., 2020

УДК 621.56

ПРИРОДНЫЕ ХЛАДАГЕНТЫ: ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ СОВРЕМЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ

А. О. Булов

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

Рассмотрены природные хладагенты. Показаны основные преимущества и недостатки природных хладагентов. Показано сравнение природных хладагентов с синтетическими. Сделаны выводы о применении таких хладагентов в будущем.

Ключевые слова: природные хладагенты, холодопроизводительность.

NATURAL REFRIGERANTS: ESTIMATION OF THE PROSPECTS OF CONTEMPORARY APPLIED

A. O. Bulov

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

Natural refrigerants are considered in this article. The main advantages and disadvantages of natural refrigerants are shown. The comparison of natural refrigerants with synthetic ones is shown. Conclusions are drawn about the use of such refrigerants in the future.

Keywords: natural refrigerants, refrigerating capacity.

Экологическая обстановка планеты с каждым годом несомненно ухудшается. Сокращение вредного воздействия на окружающую среду – приоритетное направления исследования в области холодильной техники, в настоящее время, получили распространения фреоны. Как бы не было, но эти вещества оказывают негативное воздействие на экологию планеты. Поэтому переход холодильной отрасли на природные, экологически чистые и безопасные рабочие тела, является актуальным направлением исследования на сегодняшний день.

Природные хладагенты – это рабочие вещества, образующиеся в природе естественным путем. Сегодня к известным природным хладагентам относятся: углекислый газ, аммиак, углеводороды, вода, воздух.

Углекислый газ (диоксид углерода), обладает низкой токсичностью и негорючестью. Потенциал глобального потепления CO_2 , равный 1, считается опорным значением для оценки непосредственного влияния хладагентов на глобальное потепление. Углекислый газ, используемый в качестве хладагента, это побочный продукт, образующийся при многих технологических процессах.

Несмотря на нетоксичность, при высокой концентрации в замкнутом пространстве диоксид углерода начинает замещать кислород и по прошествии некоторого времени может оказать удушающее воздействие на присутствующих людей. Благодаря продолжительному времени жизни в атмосфере CO_2 не образует побочных продуктов или продуктов распада, оказывающих значительное воздействие на окружающую среду. Рабочее давление диоксида углерода, используемого в качестве хладагента, как правило, выше,

чем у других хладагентов. Эту особенность необходимо учитывать при проектировании [1].

Благодаря благоприятным для окружающей среды характеристикам, низкой токсичности и привлекательным физико-химическим свойствам в случае «докритического» функционирования углекислота (CO_2) всё более интересуется разработчиков как предпочтительный хладоноситель для вторичного контура, а также как хладагент для низкотемпературных каскадных систем. При обычном низкотемпературном применении видна особенно высокая удельная холодопроизводительность CO_2 , по сравнению с другими хладагентами [2].

Прекрасным природным хладагентом является аммиак. Он имеет низкую нормальную температуру кипения, высокую объемную холодопроизводительность, кроме этого хорошо растворяет синтетические масла. Аммиак в настоящее время активно внедряется в малые холодильные установки.

Несмотря на неоспоримо высокие показатели энергоэффективности, в силу токсичности и горючести аммиак ограничен некоторыми сферами применения и географическими регионами. Так, аммиак полностью запрещен к применению в зонах непосредственного пребывания людей, но может использоваться в безлюдных зонах или вне помещений.

Углеводороды не образуют побочных продуктов, продуктов распада, имеют нулевой озоноразрушающий потенциал. Углеводородные хладагенты можно использовать в качестве замены в системах, предназначенных для работы на ГХФУ. Это повышает их конкурентоспособность и делает оптимальным вариантом для развивающихся стран. Перед заправкой углеводородным хладагентом систему, предназначен-

ную для другого хладагента, при необходимости модифицируют. В этой связи необходимо учитывать вопросы совместимости смазочных материалов и воспламеняемости углеводородов. Как бы то ни было, наибольший потенциал имеют новые системы, специально разработанные для работы на углеводородных хладагентах [1].

Углеводороды еще более взрывопожароопасны, чем аммиак, поэтому их целесообразно использовать только в малых холодильных машинах, например, в бытовой технике [2].

В России лидером по производству углеводородов является компания «ECO – FRIZZE». Основная продукция компании хладагенты: ECO 134, ECO 22, ECO 32, ECO R600A.

Углеводородные хладагенты «Эко-Фриз» обладают целым рядом преимуществ, как для окружающей среды, так и для потребителя. Созданные природой, а не химиками, такие хладагенты не могут быть запатентованы, что делает их доступными каждому по умеренной цене. Продолжительность их пребывания в атмосфере – менее одного года; они не истощают озоновый слой и практически не способствуют глобальному потеплению [3].

Вода – экологически чистое и безопасное вещество. Этот природный хладагент не загрязняет окружающую среду и не создает эффекта глобального потепления, который в свою очередь несет за собой необратимые процессы в природе [4].

Применение воды в холодильных машинах, имеет давнюю историю. Еще в 1755 году, В. Каллен замораживал воду под стеклянной колбой, откачивая из нее воздух и пары воды [5]. Вода как холодильный агент имеет ряд особенностей, это позволяет говорить об установках, в которых она используется, как об отдельном классе холодильных машин [4].

На воде работают самые современные холодильные системы. В качестве хладагента ранее она применялась в основном в компрессионных чиллерах с пароструйными компрессорами, двухконтурных абсорбционных системах с бромистым литием в качестве абсорбента, а также адсорбционных системах с цеолитами в качестве адсорбента. С точки зрения экологичности и термодинамики, вода представляет собой идеальный хладагент для сфер применения с температурой выше 0 °С.

Применение воды ограничено ее высокой скоростью замерзания при атмосферном давлении. Кроме того, вода приводит к коррозии и окислению многих металлов. В силу высокой, по сравнению с другими хладагентами, способностью воды вступать в химические реакции при разработке холодильных систем на воде необходимо уделять особое внимание выбору пригодных материалов.

Воздух это экологически безопасный, недорогой, совершенно безопасный и нетоксичный хладагент под названием R729. Воздушные холодильные системы это не новое изобретение: они использовались на рефрижераторных судах еще в начале предыдущего столетия.

Воздушное охлаждение основано на обратном цикле Брайтона или Джоуля. При температурах, при-

меняемых в типовых холодильных системах, используемый в качестве хладагента воздух не подвергается фазовому переходу (конденсации или испарению). Из-за низкого веса воздух имеет невысокий COP, однако воздушные холодильные системы обеспечивают теплоутилизацию при относительно высоких температурах без снижения эффективности, которая наблюдается в паровых компрессионных установках. По сравнению с последними установки с воздушным циклом могут обеспечить большую разность температур между горячей и холодной сторонами. В результате становится возможным охлаждение воздуха до температур, свойственных процессам, протекающим при практически криогенных условиях [1].

Таким образом, в данной статье рассмотрены природные хладагенты. Показаны основные преимущества и недостатки природных хладагентов. Внедрение природных хладагентов в холодильную промышленность в крупных масштабах – актуальное направление современных исследований. Это положительно скажется на экологии планеты.

Библиографические ссылки

1. Electronic textbook StatSoft [Электронный ресурс]. URL: http://www.ozoneprogram.ru/biblioteka/publikacii/o_hladagentah (дата обращения: 07.09.2020).
2. Гафуров Ш. Перспективы применения углекислого газа в холодильных машинах // Молодой ученый. 2017. № 7 (141). С. 46–48.
3. Electronic textbook StatSoft [Электронный ресурс]. URL: <https://www.holodinfo.ru/rubrics/hladagency/prirodnye-hladagency-eko-friz-novaya-era-freonov> (дата обращения: 7.09.2020).
4. Булов А., Ермаков М. Перспективы развития вакуумных холодильных машин // Решетневские чтения : материалы XXIII Междунар. науч. конф. : в 2 ч. / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2019. Ч. 1. С. 210–212.
5. The efficiency limits of water vapor compressors / N. C. D’Orsi, B. A. LeDrew, S. E. Wight // Concepts. ETI. 2000.

References

1. Electronic textbook StatSoft [Electronic resource]. URL: http://www.ozoneprogram.ru/biblioteka/publikacii/o_hladagentah/ (access: 07.09.2020).
2. Gafurov Sh. Prospects for the use of carbon dioxide in refrigerating machines // Young scientist. 2017. № 7 (141). P. 46–48p.
3. Electronic textbook StatSoft [Electronic resource]. URL: <https://www.holodinfo.ru/rubrics/hladagency/prirodnye-hladagency-eko-friz-novaya-era-freonov> (access: 07.09.2020).
4. Bulov A., Ermakov M. Prospects of development of vacuum refrigerating machines // Reshetnev readings : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. ; Reshetnev University. Krasnoyarsk, 2019. Part 1. P. 210–212 (In Russ.)
5. D’Orsi N. C., Le Drew B. A., Wight S. E. The efficiency limits of water vapor compressors. Concepts. ETI. 2000.

© Булов А. О., 2020

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КЛИМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. О. Булов, М. А. Ермаков

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

Показаны климатические системы. Сформулированы основные требования к системам жизнеобеспечения. Рассмотрены традиционные направления повышения эффективности климатической техники. Сделаны выводы о применении таких направлений на сегодняшний день.

Ключевые слова: климатическая техника, энергетическая эффективность, термодинамический цикл.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF CLIMATE SYSTEMS

A. O. Bulov, M. A. Ermakov

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

The article shows climate systems. The basic requirements for life support systems are formulated. Traditional directions of increasing the efficiency of climate technologies are considered. Conclusions are drawn about the application of such directions to date.

Keywords: climate engineering, energy efficiency, thermodynamic cycle.

Климатическая техника – комплекс инженерных зданий, сооружений, систем и объектов. Основная функция климатической техники – создание оптимальных климатических условий в обитаемых помещениях. Под оптимальными климатическими условиями понимается поддержание индивидуальных параметров микроклимата (температура, давление, влажность, состав воздуха). Оптимальные климатические условия должны соответствовать санитарно-гигиеническим нормам и правилам. В общем случае под климатической техникой можно понимать комплекс систем – вентиляции, отопления, охлаждения и др.

Климатические системы на сегодняшний день являются большими потребителями электроэнергии. Стоимость энергетических ресурсов постоянно растет. Сокращение эксплуатационных затрат, а также повышение эффективности климатических систем является актуальным направлением исследования.

Отдельным видом климатических систем являются системы технологического кондиционирования. Для многих современных производств воздух является технологической средой, параметры которой носят прецизионный характер и определяют качество и стоимость продукции. В дальнейшем речь будет идти только о системах комфортного кондиционирования, так как объекты технологического кондиционирования, как правило, являются единичным или мелкосерийным и могут успешно развиваться за счет совершенствования технологических процессов и методов управления ими.

Общим направлением совершенствования климатической техники является агрегатирование, т. е. ком-

поновка различного вида оборудования из унифицированных блоков, используемых как в системах жизнеобеспечения различного назначения, так и в смежных областях. Улучшение технико-экономических характеристик оборудования идет за счет оптимизации рабочих процессов обработки воздуха, интенсификации теплообмена, совершенствования технологии производства и использования новых материалов и комплектующих [1].

Повышение энергетической эффективности климатических систем возможно за счет улучшения характеристик рабочих веществ. Рабочее вещество термодинамического цикла должно обладать совокупностью теплофизических и физико-химических характеристик. Кроме этого, к рабочим веществам климатической техники применяются жесткие требования Монреальского протокола по сохранению озонового слоя. Прекрасным холодильным агентом является аммиак. Он имеет низкую нормальную температуру кипения, высокую объемную холодопроизводительность, хорошо растворяет синтетические масла, но токсичен и взрывопожароопасен. Кроме этого, замечен постепенный переход климатических систем на экологически безопасные природные хладагенты [2; 3].

Другой способ повышения эффективности – снижение необратимых потерь вследствие трения и увеличение ресурса работы механических узлов. Характерной особенностью систем кондиционирования является широкий годовой и суточный диапазон регулирования производительности компрессорно-вентиляционного оборудования для компенсации

измерения наружных климатических параметров. Регулирование производительности может проводиться либо с использованием повторно-кратковременного режима работы, либо за счет применения частотного регулируемого привода. Известно, что основной износ в узлах трения происходит на режимах пуска и остановки, при этих же режимах возникают максимальные температурные деформации в узлах уплотнений, поэтому переход к частному регулированию является оправданным и перспективным. Снижение климатических скоростей в подшипниках, подпятниках и уплотнениях приводит к уменьшению гидродинамической подъемной силы и переходу на смешанный или даже граничный режим трения [4]. Для компенсации износа при продолжительной работе на этих режимах разрабатываются конструкции, в которых реализован эффект избирательного переноса металло-содержащих присадок из смеси смазочного материала и фреона на опорную поверхность трения [5].

Еще один способ повышения эффективности – совершенствование систем управления оборудованием.

Перспективным представляется использование в системах управления методов нечетной логики (fuzzy logic). Отличительными особенностями fuzzy-систем по сравнению с традиционными являются:

– возможность оперировать входными данными, заданными нечетко, например, непрерывно изменяющаяся во времени совокупность внешних и внутренних климатических параметров;

– возможность использовать данные, значения которых невозможно интерпретировать однозначно (результаты статистических опросов, индивидуальные предпочтения и т. д.);

– возможность нечеткой формализации критериев оценки и сравнения: «холодно», «тепло», «жарко», «душно» и т. д.;

– возможность проведения качественных оценок входных и выходных результатов с учетом степени их достоверности;

– возможность быстрого превентивного «переобучения» системы управления и диспетчеризации с использованием методов искусственного интеллекта (искусственные нейронные сети, эволюционные и генетические алгоритмы оптимизации) [1].

На сегодняшний день, перечисленные способы повышения эффективности климатических систем являются актуальными и применяются повсеместно. Но стоит признать, что данные способы позволяют повысить эффективность на небольшой процент. Это заставляет искать альтернативные способы повышения эффективности, так как потребность в системах жизнеобеспечения растет с каждым годом.

Можно делать выводы о том, что данное направление исследования, в связи с экономическими проблемами и с быстрым ростом промышленной индустрии, в настоящее время выглядит очень перспективно.

Библиографические ссылки

1. Цыганков А., Гримитлин А. Состояние и перспективы развития систем кондиционирования воздуха // Вестник МАХ. 2013. № 4. С. 47–50.
2. Холодильные машины / под ред. Л. С. Тимофеевского. СПб. : СПбГУНиПТ, 2006. 942 с.
3. Цветков О. Б. Холодильные агенты. СПб. : СПбГУНиПТ, 2002. 216 с.
4. Цыганков А., Васильев В. Моделирование поверхностей трения механических узлов криогенных систем // Вестник МАХ. 2009. № 4. С. 38–40.
5. Крагельский И., Михин Н., Узлы трения машин : справочник. М. : Машиностроение, 1984. 280 с.

References

1. Tsygankov A., Gritmitlin A. State and prospects of air conditioning systems development // Vestnik international Academy of cold weather. 2013. № 4. P. 47–50.
2. Refrigerating machines / edited by L. S. Timofeevsky. SPb. : Spbgunipt, 2006, 942 p.
3. Tsvetkov O. B. Refrigerating agents. SPb. : Spbgunipt, 2002, 216 p.
4. Tsygankov A., Vasiliev V. Modeling of friction surfaces of mechanical units of cryogenic systems // Vestnik international Academy of cold weather. 2009. № 4. P. 38–40.
5. Kragelsky I., Mikhin N., friction Units of machines : handbook. M. : Mashinostroenie, 1984, 280 p.

© Булов А. О., Ермаков М. А., 2020

УДК 621.56

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

А. В. Делков, К. А. Чайкина, Т. Г. Чабукашвили, М. У. Абдуллаев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
 Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
 E-mail: delkov-mx01@mail.ru

Рассмотрены основные уравнения: интеграл Бернулли, интеграл уравнения энергии в термодинамических параметрах, уравнение неразрывности, уравнение состояния в виде поверхности состояния, кинематические соотношения для определения векторных диаграмм скоростей. Рассмотрен маршевый алгоритм с целью определения параметров в характерных сечениях.

Ключевые слова: уравнение энергии Бернулли, уравнение энергии в термодинамических параметрах, балансовые уравнения энергии для окружной работы, энтальпия, окружная скорость, скорость на входе в рабочее колесо.

MATHEMATICAL MODEL OF A GAS TURBINE

A. V. Delkov, K. A. Chaykina, T. G. Chabukashvili, M. U. Abdullayev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
 31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
 E-mail: delkov-mx01@mail.ru

The main equations are considered: the Bernoulli integral, the integral of the energy equation in thermodynamic parameters, the continuity equation, the equation of state in the form of a state surface, kinematic relations for determining vector velocity diagrams. A marching algorithm is considered in order to determine parameters in characteristic cross sections.

Keywords: Bernoulli energy equation, energy equation in thermodynamic parameters, balance energy equations for circumferential work, enthalpy, circumferential velocity, speed at the entrance to the impeller.

Для моделирования рабочих процессов в ступени турбины используются уравнения проточной термодинамики в форме интегралов дифференциальных уравнений:

– изменения количества движения – интеграл Бернулли, для адиабатически сжимаемой жидкости:

$$\frac{k}{k-1} \frac{P}{\rho} + \frac{C^2}{2} = \text{const} + \zeta \cdot \frac{C^2}{2}; \quad (1)$$

где k – показатель адиабаты; p – статическое давление; P – плотность; C – абсолютная скорость; ζ – коэффициент потерь [2];

– интеграл уравнения энергии в термодинамических параметрах

$$i + \frac{C^2}{2}; \quad (2)$$

где i , T – энтальпия потока, – обращаемое в тепло удельная работа трения [1];

– уравнения неразрывности в интегральной форме:

$$C = \frac{\dot{m}}{\rho F}; \quad (3)$$

где \dot{m} – массовый расход рабочего тела; F – площадь проходного сечения;

– уравнение состояния для идеального газа:

$$p \frac{1}{\rho} = RT; \quad (4)$$

где R – газовая постоянная; T – статическая температура.

Либо для реальных газов пара в виде поверхности состояния:

$$f\left(p; \frac{1}{\rho}; T\right) = 0; \quad (5)$$

Исходными данными для моделирования является термодинамические параметры: давление и энтальпия на входе и выходе из турбины, геометрические параметры проточной части: R_1 и R_2 рабочего колеса, высота и ширина лопаток, лопаточные углы, число лопаток, радиус профиля лопатки и т. п. [3].

Решение системы уравнений производится прогонкой всего алгоритма с целью поиска решений по угловой скорости вращения при известном моменте полезной нагрузки, что позволяет при изменении полезной нагрузки построить характеристику турбин, как функцию для эмуляционной модели.

Библиографические ссылки

1. Овсянников Л. В. Лекции по основам газовой динамики. М. : Ижевск : Ин-т компьютер. исслед., 2003. 336 с.
2. Овсянников Б. В., Боровский Б. И. Теория и расчет питания жидкостных ракетных двигателей. М. : Машиностроение, 1971. 540 с.
3. Органический цикл Ренкина в автономной теплоэнергетической системе : монография / А. А. Кишкин, О. В. Шилкин, А. В. Делков и др. ; под ред. д-ра техн. наук, проф. А. А. Кишкина ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2019. 234 с.

References

1. Ovsyannikov L. V. Lectures on the basics of gas dynamics. M. : Izhevsk : Computer Institute. Issled., 2003. 336 p.
 2. Ovsyannikov B. V., Borovskiy B. I. [Theory and calculation of power supply for liquid rocket engines]. M. : Mashinostroenie, 1971. 540 p.
 3. Organic Rankine cycle in an autonomous heat power system : monograph / A. A. Kishkin, O. V. Shilkin, A. V. Delkov et al. ; Reshetnev University. Krasnoyarsk, 2019. 234 p.
- © Делков А. В., Чайкина К. А., Чабукашвили Т. Г., Абдуллаев М. У., 2020

УДК 621.56

ХЛАДАГЕНТ R515B КАК ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАМЕНА R134a

М. А. Ермаков

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

Материалы настоящей работы описывают новейший холодильный агент R515B. В работе отражены особенности и характеристики холодильного агента, произведён сравнительный анализ с фреоном R134a.

Ключевые слова: холодильный агент, рабочее тело.

THE REFRIGERANT R515B AS A POTENTIAL REPLACEMENT FOR R134a

M. A. Ermakov

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

Materials of this article describe the newest refrigerating agent R515B. In the article there are given features and characteristics of the refrigerating agent, comparative analysis with freon R134a has been performed.

Keywords: refrigerant, working fluid.

Холодильная промышленность – это активно развивающаяся отрасль народного хозяйства. Холодильное оборудование – основа работы многих предприятий. Объёмы холодильной техники растут с каждым годом, кроме этого холодильная отрасль относится к энергоёмкому производству, а это значит, что вопросы, связанные со стоимостью энергоресурсов, а также требования по сокращению вредного воздействия на окружающую среду – являются актуальным направлением исследования. Экономические и экологические факторы – определяют необходимость поиска новых решений усовершенствования холодильной техники, а также необходимость выбора оптимальных рабочих тел холодильного оборудования.

В настоящее время в качестве рабочего тела в холодильных машинах получили распространения аммиак и фреоны. Эти хладагенты оказывают серьёзное влияние на экологию всей планеты. Так, фреоны содержат фторовые соединения, которые улетучиваются в атмосферу при утечке, а это влечёт за собой разрушение озонового слоя земли. Применение экологически чистых рабочих тел в холодильных машинах, является актуальным направлением исследования [1].

Оборот озоноразрушающих веществ, таких как хлорфторуглероды (ХФУ) или гидрохлорфторуглероды (ГХФУ), регулируется Монреальским протоколом по веществам, разрушающим озоновый слой. При этом и ХФУ и ГХФУ обладают значительным потенциалом глобального потепления.

Производство хлорфторуглеродов прекращено во всем мире. Менее опасные для озонового слоя гидрохлорфторуглероды также постепенно выводятся из обращения. К 2030 году потребление ГХФУ должно быть полностью прекращено.

Фторсодержащие вещества – гидрофторуглероды (ГФУ) и их смеси – в настоящее время активно используются в современных системах кондиционирования и холодильных системах. Это такие хладагенты как R410A, R404A, R407, R507, R32, R134a и др. Их озоноразрушающий потенциал равен нулю, однако ГФУ являются парниковыми газами, оборот которых регулируется Киотским протоколом к Конвенции ООН об изменении климата [2].

В настоящий момент, во всем мире, шли и ведутся поиски новых, эффективных и безопасных альтернатив.

В 2020 году на рынке появился новый хладагент R515B, разработанный американской компанией Honeywell.

Данный хладагент разработан как потенциальная замена фреону R134a. Данный хладагент состоит из смеси хладагентов R1234ze (91,1 %) и R227ea (8,9 %). Вещество является негорючим, нетоксичным, имеет сопоставимый с R134a уровень эффективности и значительно более низкий показатель ПГП – всего 293 [3].

R515B разработан для применения в новом оборудовании и не годится для ретрофита действующих систем. В качестве областей применения Honeywell указывает выносные компрессорно-конденсаторные блоки, системы централизованного холодоснабжения супермаркетов, моноблоки, среднетемпературные контуры каскадных систем, системы с затопленным испарителем и воздушное кондиционирования в жарком климате.

Новинка уже одобрена компанией Danfoss для использования в новом компрессоре Turbocog TG490 для чиллеров воздушного и водяного охлаждения.

Компонент смеси R227ea ограниченно применяется в качестве хладагента из-за высокого ППП (3220). В составе R515B он не позволяет умеренно горючему R1234ze воспламениться. R1234ze считается умеренно горючим хладагентом (класс A2L), однако он воспламеняется лишь при температуре выше 30 °С, и потому стандарт EN 378, гармонизированный с европейской директивой по оборудованию, работающему под давлением, не рассматривает его в качестве опасного вещества [4].

Холодопроизводительность R-515B идентична R-1234ze, но на 24 % ниже, чем у R-134a. Однако общий размер компрессора будет идентичным (вытесняемый объем будет больше, чтобы достичь той же производительности, что и у R-134a с меньшим электродвигателем).

R-515B имеет эффективность, эквивалентную R-134a, а температура/ давление нагнетания этого нового хладагента значительно ниже, чем у R-134a.

Сравнительная характеристика хладагентов отобрана в таблице [5].

Сравнительная характеристика хладагентов

Хладагенты	R134a	R1234ze	R515B
ППП	1300	7	293
Сравнительная холодопроизводительность, %	100	75	76
Температура нагнетания (°С)	88	81,6	80,6
Давление нагнетания (Бар)	21,2	16,1	16,1

Таким образом, производство и использование в дальнейшем холодильного агента R515b являются актуальными задачами в индустрии производства холода и климатической техники.

Библиографические ссылки

1. Булов А. О., Ермаков М. А. Перспективы развития вакуумных холодильных машин // Решетневские чтения : материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Ч. 1. Красноярск, 2019. С. 210–212.
2. Сайт [Электронный ресурс]. URL: https://mir-limata.info/archive/2013_4/prirodnie_hladagenti_budushhee/ (дата обращения: 24.08.2020).
3. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iclimate.ru/news/HoneywellrazrabotalazamenukhladagentuR134a/> (дата обращения: 22.08.2020).
4. [Электронный ресурс]. URL: <https://mir-klimata.info/ref/25806/> (дата обращения: 22.08.2020).
5. [Электронный ресурс]. URL: <http://refportal.com/news/market-news/solstice-n15-r-515b-noviy-hladagent-a1-s-nizkim-pgp-na-zamenu-r-134a/> (дата обращения: 26.08.2020)

References

1. Bulov A. O., Ermakov M. A. [The prospects of vacuum refrigeration machines development] // Reshetnevskiye chteniya : materialy XXIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. ; Reshetnev University. Krasnoyarsk, 2019. № 1. P. 210–212 (In Russ.)
2. Electronic textbook StatSoft [Electronic resource]. URL: https://mir-klimata.info/archive/2013_4/prirodnie_hladagenti_budushhee/ (access: 24.08.2020).
3. Electronic textbook StatSoft [Electronic resource]. URL: <https://www.iclimate.ru/news/HoneywellrazrabotalazamenukhladagentuR134a/> (access: 22.08.2020).
4. Electronic textbook StatSoft [Electronic resource]. URL: <https://mir-klimata.info/ref/25806/> (access: 22.08.2020).
5. Electronic textbook StatSoft [Electronic resource]. URL: <http://refportal.com/news/market-news/solstice-n15-r-515b-noviy-hladagent-a1-s-nizkim-pgp-na-zamenu-r-134a/> (access: 26.08.2020).

© Ермаков М. А., 2020

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАНАЛЬНОГО ПОДВОДЯЩЕГО УСТРОЙСТВА

А. А. Кишкин, Н. Н. Атрощенко, Ю. Н. Шевченко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
 Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
 E-mail: spsp99@mail.ru

Рассмотрена расчетная схема канального подводящего устройства дозвуковой радиальной турбины. Согласно расчетной схеме выделены 2 участка, соотношенные с характерными параметрами: на входе в турбину; в подводящем канале; на входе в рабочее колесо, для каждого участка рассмотрены уравнения движения, энергии, неразрывности состояния. Предусмотрено два расчетных случая: коэффициент потерь – справочная величина; потери на трения интегрируются на каждом шаге через напряжение трения.

Ключевые слова: уравнение энергии Бернулли, уравнение энергии в термодинамических параметрах, энтальпия, окружная скорость, скорость на входе в рабочее колесо, коэффициент потерь.

MATHEMATICAL MODEL OF A CHANNEL SUPPLY DEVICE

A. A. Kishkin, N. N. Atroshchenko, Yu. N. Shevchenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
 31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
 E-mail: spsp99@mail.ru

The paper considers the design scheme of the channel supply device of a subsonic radial turbine. According to the design scheme, 2 sections are identified, correlated with the characteristic parameters: at the turbine inlet; in the supply channel; at the impeller inlet, for each section, the equations of motion, energy, and continuity of state are considered. There are two calculated cases: the loss coefficient is a reference value; the friction losses are integrated at each step through the friction stress.

Keywords: Bernoulli energy equation, energy equation in thermodynamic parameters, enthalpy, circumferential velocity, speed at the entrance to the impeller, loss coefficient.

Подводящее устройство представляет собой осевой канал сориентированный относительно центра вращения рабочего колеса турбины, так, что плечо $l_{\text{вх}}$ момента скорости $C_{\text{вх}}$, момент изменяется от максимально, геометрически возможной величины до поля рис. 1, при этом угол $\alpha_{\text{вх}}$ изменяется от минимального значения до 90° – случай радиального подвода [1]:

$$\sin \alpha_{\text{вх}} = \frac{\sqrt{R_{\text{вх}}^2 - l_{\text{вх}}^2}}{R_{\text{вх}}} = \sqrt{1 - \left(\frac{l_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}}}\right)^2}; \quad (1)$$

$$\cos \alpha_{\text{вх}} = \frac{l_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}}}.$$

Окружная составляющая скорости на $R_{\text{вх}}$ определяется:

$$C_{\text{ивх}} = C_{\text{вх}} \cdot \cos \alpha_{\text{вх}} = C_{\text{вх}} \frac{l_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}}}, \quad (2)$$

где абсолютная скорость на входе в подводящий канал определяется соотношением:

$$C_{\text{вх}} = \frac{\dot{V}_{\text{вх}}}{F_{\text{вх}}} = \frac{\dot{m}}{\rho_{\text{вх}} \cdot F_{\text{вх}}}, \quad (3)$$

где \dot{m} – массовый расход рабочего тела; $\rho_{\text{вх}}$ – плотность; $F_{\text{вх}} = h_{\text{вх}} \cdot b_{\text{вх}}$ – площадь канального подвода.

Причем окружная составляющая абсолютной скорости подчиняется закону сохранения момента количества движения [3]:

$$C_{\text{ивх}} \cdot R_{\text{вх}} = \text{const} = C_{1u} \cdot R_1, \quad (4)$$

Тогда

$$C_{1u} = \frac{C_{\text{ивх}} \cdot R_{\text{вх}}}{R_1} = \frac{C_{\text{ивх}} \frac{l_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}}} \cdot R_{\text{вх}}}{R_1} = C_{\text{вх}} \frac{l_{\text{вх}}}{R_1}. \quad (5)$$

Радиальная составляющая есть отклонение расхода к площади проходного сечения в радиальном направлении

$$C_{1R} = \frac{\dot{V}}{F_1} = \frac{\dot{m}}{\rho_1}, \quad (6)$$

где $F_1 = 2\pi R_1 b_1$ – площадь входа в рабочее колесо; ρ_1 – плотность рабочего тела; R_1 – входной радиус; b_1 – ширина колеса.

Абсолютная скорость на входе в рабочее колесо рис. 2.

$$C_1^2 = C_{1u}^2 + C_{1R}^2 \quad (7)$$

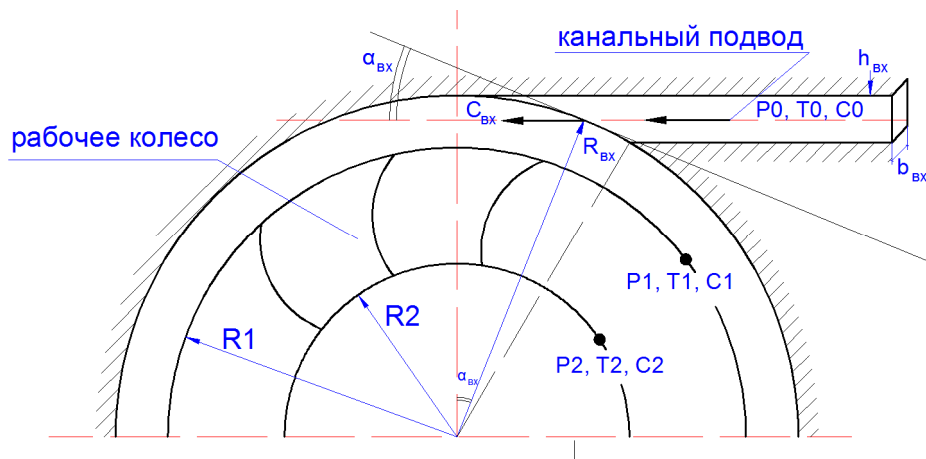


Рис. 1. Расчетная схема радиальной ступени

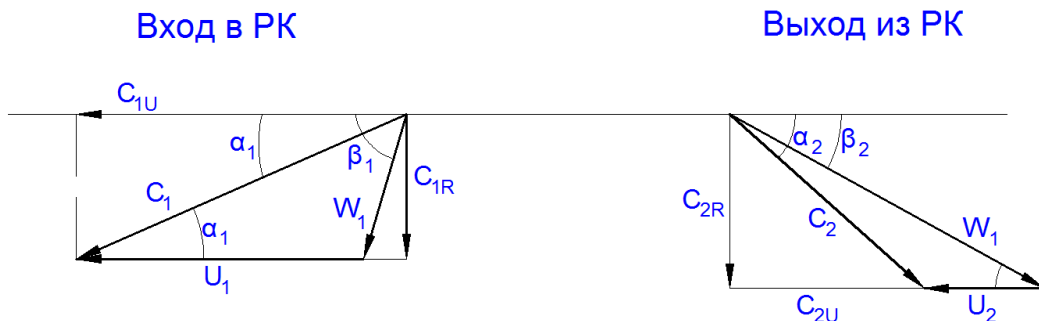


Рис. 2. Векторные диаграммы скоростей на входе и выходе из рабочего колеса

Условно разделим подводящее устройство на два участка [2]:

– вход – 0 – участок от входа до канального подвода; от канального подвода до входа в рабочее колесо на R_1 ;

– участок 0 – 1 от канального подвода до входа в рабочее колесо на R_1 .

Для каждого участка ищем решение системы уравнений: уравнение Бернулли, уравнение энергии в термодинамической форме, уравнение состояния.

Библиографические ссылки

1. Овсянников Б. В., Боровский Б. И. Теория и расчет питания жидкостных ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1971. 540 с.
2. Органический цикл Ренкина в автономной теплоэнергетической системе: монография / А. А. Кишкин, О. В. Шилкин, А. В. Делков и др.; под ред. д-ра техн. наук, проф. А. А. Кишкина; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2019. 234 с.

3. Чухин И. М. Техническая термодинамика. Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т им. В. И. Ленина, 2006. 224 с.

References

1. Ovsyannikov B. V., Borovskiy B. I. [Theory and calculation of power supply of liquid rocket engines]. M.: Mashinostroenie, 1971. 540 p.
2. [Organic Rankine cycle in an autonomous heat and power system: monograph] / A. A. Kishkin, O. V. Shilkin, A. V. Delkov et al.; ed. Dr. tech. Sciences, prof. A. A. Kishkina; Reshetnev University. Krasnoyarsk, 2019. 234 p.
3. Chukhin I. M. [Technical thermodynamics]. Ivanovo: Ivan. state ener. un-t them. V. I. Lenin, 2006. 224 p.

© Кишкин А. А., Атрощенко Н. Н., Шевченко Ю. Н., 2020

УДК 66.015.23

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ВСТРОЕННОГО ДЕФЛЕГМАТОРА

А. В. Кустов*, Н. Э. Лепп, А. В. Снегирева, Е. О. Материкина

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

Представлены результаты математического моделирования работы встроенного дефлегматора ректификационной колонны в зависимости от изменения материала и диаметра изготовления.

Ключевые слова: ректификация, дефлегматор, математическое моделирование, коэффициент теплопередачи.

MATHEMATICAL MODELING OF THE BUILT-IN DEFLEGMATOR

A. V. Kustov*, N. E. Lepp, A. V. Snegireva, E. O. Materikina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
 31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
 *E-mail: alexkust@rambler.ru

The article presents the results of mathematical modeling of the operation of the built-in reflux condenser of the rectification column, depending on the change in material and production diameter.

Keywords: rectification, reflux condenser, mathematical modeling, heat transfer coefficient.

Для малотоннажных ректификационных колонн, применяемых в лабораторных условиях, для достижения высокой эффективности работы целесообразно применять встроенные дефлегматоры. Основное назначение дефлегматора – частичная конденсация паров и получение температуры флегмы, близкой к температуре паровой смеси в зоне конденсации [1; 3; 4]. Наиболее эффективным является дефлегматор, выполненный из трубок в виде спиралей Архимеда (рис. 1) [4; 5]. Поверхность теплообмена составляла $F = 0,35 \text{ м}^2$, расход воды варьировался от 0,07 до 0,2 м³/ч.

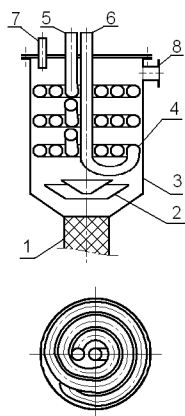


Рис. 1. Конструкция встроенного теплообменника

В настоящей работе рассматривается задача определения коэффициентов теплоотдачи в случае выполнения дефлегматора из трубок диаметра 10×1 мм и

12×1 мм, а также при сохранении базовой величины диаметра (8×1 мм), но с изменением материала изготовления (алюминий, сталь), на основе экспериментальных данных, полученных в [4].

Коэффициенты теплопередачи (K) определялись из общеизвестных зависимостей [2]:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t_{cp}, \quad (1)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (2)$$

Для изучения скоростного режима в трубке проведена аппроксимация данных. Методом наименьших квадратов, в системе MathCad [6] получены квадратичные зависимости $y(x)$ (3)–(5) значения коэффициента теплоотдачи y от значения критерия Нуссельта x для обозначенных диаметров соответственно

$$y(x) = 0,395 \cdot x^2 - 1,167x + 80,678, \quad (3)$$

$$y(x) = 0,255 \cdot x^2 - 1,181x + 84,746, \quad (4)$$

$$y(x) = 0,182 \cdot x^2 - 1,168x + 88,209. \quad (5)$$

Затем проводилось моделирование работы с изменением материала изготовления трубок дефлегматора.

$$y(x) = 2,106 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 0,099x + 6,502 \cdot 10^{-5}, \quad (3)$$

$$y(x) = 2,118 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 0,099x + 6,49 \cdot 10^{-5}, \quad (4)$$

$$y(x) = 2,208 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 0,098x + 6,408 \cdot 10^{-5}. \quad (5)$$

На рис. 2 и 3 представлен фрагмент MathCad-документа, соответствующего обработке экспериментальных данных.

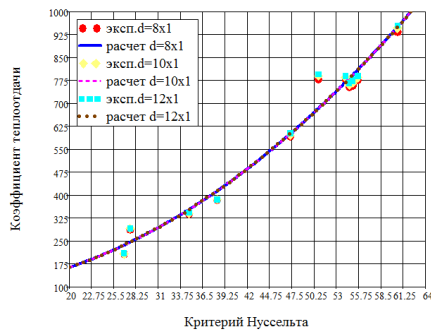


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от значения критерия Нуссельта

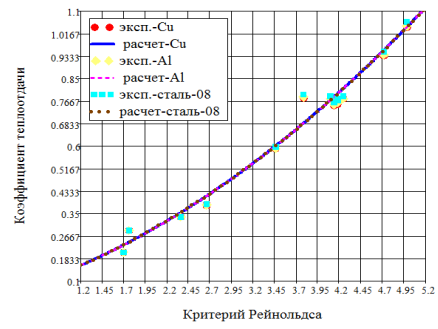


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи от критерия Рейнольдса (в приведенных единицах)

Таблица 1

Расчетные значения коэффициента теплоотдачи при разных диаметрах трубки

Диаметр d , мм	Критерий Нуссельта			
	25	35	45	50
8×1	298,516	523,973	828,473	1010
10×1	214,91	356,396	548,979	664,432
12×1	172,976	270,707	404,909	485,687

Таблица 2

Расчетные значения коэффициента теплоотдачи при разных материалах трубки

Материал Трубки	Критерий Рейнольдса			
	2100	3010	4100	5200
Медь	300,775	488,796	759,919	1084
Алюминий	301,304	489,883	761,936	1088
сталь 08	303,173	495,027	772,965	1107

Расчетные значения коэффициента теплоотдачи для медной трубки диаметром 8×1 мм, 10×1 мм и 12×1 мм представлены в табл. 1, а с измененным материалом – в табл. 2.

Проведенные исследования показали уменьшение коэффициента теплоотдачи с увеличением диаметра трубки. Это связано с уменьшением величины критерия Рейнольдса, показывающего изменение режима течения жидкости в дефлегматоре.

Библиографические ссылки

1. Изучения встроенного дефлегматора в насадочной колонне / Н. А. Войнов [и др.] // Химическая промышленность сегодня. 2010. № 3. С. 52–56.
2. Кустов А. В., Гончарова Я. С., Сергиякова Ю. Т. Исследование встроенного дефлегматора ректификационной колонны // Химические технологии функциональных материалов. 2017. С. 202–205.
3. Кустов А. В. Гидродинамика и массообмен на вихревых ректификационных ступенях при переработки растительного сырья : дис. ... канд. техн. наук ; 05.21.03. Красноярск : СибГТУ, 2010.
4. Земцов Д. А. Разработка колонн термической ректификации в технологиях переработки растительного сырья : дис. ... канд. техн. наук ; 05.21.03 / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2017.

References

1. Izucheniya vstroennogo deflegmatora v nasadochnoy kolonne [Studies of the built-in reflux condenser in a packed column] / N. A. Voynov [et al.] // Khimicheskaya promyshlennost' segodnya. 2010. № 3. P. 52–56.
2. Kustov A.V, Goncharova Ya. S., Sergiyakova Yu. T. Issledovanie vstroennogo deflegmatora rektifikatsionnoy kolonny [Research of the built-in reflux condenser of the rectification column] // Khimicheskie tekhnologii funktsional'nykh materialov. 2017. P. 202–205.
3. Kustov A. V. Gidrodinamika i massoobmen na vikhrevykh rektifikatsionnykh stupenyakh pri pererabotki rastitel'nogo syr'ya : dis. ... kand. tekhn. nauk ; [Hydrodynamics and mass transfer in the vortex of distillation steps in the processing of vegetable raw materials]. Abstract of thesis of Candidate of Science]. Krasnoyarsk : SibGTU, 2010.
4. Zemtsov D. A. Razrabotka kolonn termicheskoy rektifikatsii v tekhnologiyakh pererabotki rastitel'nogo syr'ya [Development of columns for thermal rectification in technologies for processing plant raw materials] : dis. ... kand. tekhn. nauk ; 05.21.03 / Reshetnev University. Krasnoyarsk, 2017.

© Кустов А. В., Лепп Н. Э., Снегирева А. В., Материкина Е. О., 2020

ПРИМЕНЕНИЕ ЭКРАННО-ВАКУУМНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. А. Литовченко

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

Рассмотрен вопрос специфики применения экранно-вакуумной теплоизоляции для тепловой защиты космических аппаратов. Приводится описание экранно-вакуумной теплоизоляции. Определяются ее основные тепловые свойства.

Ключевые слова: экранно-вакуумная теплоизоляция, тепловая защита, космический аппарат.

APPLICATION OF SCREEN-VACUUM THERMAL INSULATION FOR SPACECRAFT PROTECTION

A. A. Litovchenko

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

This paper covered the specificity of the use of screen-vacuum thermal insulation for thermal protection of spacecraft. A description of the screen-vacuum thermal insulation is given. Its main thermal properties are determined.

Keywords: screen-vacuum thermal insulation, thermal protection, spacecraft.

В настоящее время космические технологии приобретают существенное развитие: появляются новые системы спутниковой связи, вводятся в эксплуатацию научно-исследовательские космические аппараты, реализуются новые проекты пилотируемой космонавтики. В этой связи вопросы проектирования и конструирования космических аппаратов и их отдельных подсистем являются актуальными. Однако вне зависимости от целевого назначения космического аппарата, надежное функционирование всех его систем обеспечивается поддержанием допустимого теплового режима с помощью специальной бортовой системы – системы обеспечения теплового режима [1; 2]. В космическом пространстве бывает очень холодно и очень жарко, в зависимости от того есть поблизости источник внешнего теплового излучения. В качестве такого источника рассматривается излучение Солнца, переотраженное солнечное излучение (альbedo), собственное излучение планет и небесных тел. В условиях космического вакуума вся передача тепла осуществляется излучением, прежде всего инфракрасным. С учетом этих особенностей проектируются и создаются системы обеспечения теплового режима космического аппарата.

Для того чтобы свести к минимуму внешний теплоприток на космический аппарат, т. е. остановить теплообмен между телом и внешней средой, на пути инфракрасных лучей необходимо поставить преграду – экран. Такой преградой для космических аппаратов является экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ), предназначенная для защиты наружной поверхности КА от внешних тепловых воздействий и выравнива-

ния температурного поля элементов конструкции [3; 4]. ЭВТИ является одним из наиболее распространенных и надежных средств пассивного терморегулирования в системах обеспечения теплового режима [5].

Конструктивно ЭВТИ представляет собой несколько слоев тонкой пленки со специальным светоотражающим покрытием, между которыми обеспечивается вакуум. Светоотражающее покрытие необходимо для защиты от внешнего теплового излучения, вакуум выступает в роли теплового изолятора. Основным параметром ЭВТИ, определяющим ее эффективность, является коэффициент термического сопротивления. Наибольшую эффективность будет иметь сочетание ЭВТИ с активными системами терморегулирования. Разные производители ЭВТИ имеют разные технологии, ноу-хау и секреты. Каждый производитель космических аппаратов выбирает наиболее подходящую ему модель теплоизоляции.

Таким образом, рассмотренное в работе направление применения экранно-вакуумной теплоизоляции в конструкции современных космических аппаратов является актуальными и перспективным.

Библиографические ссылки

1. Meseguer J., Perez-Grande I., Sanz-Andres A. Spacecraft thermal control // Woodhead Publishing Limited. 2012. 413 p.
2. Gilmore D. G. Spacecraft thermal control handbook // The Aerospace Corporation Press, 2002. 239 p.
3. Пат. 1840181. Российская Федерация, МПК B64G 9/00. Экранно-вакуумная теплоизоляция систе-

мы терморегулирования космических аппаратов / Зеленов И. А., Крестов Ю. В., Матвеев С. Г. и др. ; заявл. 23.02.1977 ; опубл. 27.06.2016, Бюл. № 18. 5 с.

4. Золотая обертка [Электронный ресурс]. URL: <https://zelenyikot.livejournal.com/26235.html> (дата обращения: 10.01.2020).

5. «Одежда» для космического аппарата [Электронный ресурс]. URL: <https://anashina.com/intervyu-s-viktoriej-kamilleri/> (дата обращения: 10.01.2020).

References

1. Meseguer J., Perez-Grande I., Sanz-Andres A. Spacecraft thermal control // Woodhead Publishing Limited. 2012. 413 p.

2. Gilmore D. G. Spacecraft thermal control handbook // The Aerospace Corporation Press, 2002. 239 p.

3. Zelenov I. A. *Ekranno-vakuumnaya teploizolyatsiya sistemy termoregulirovaniya kosmicheskikh apparatov* [Shield-vacuum thermal insulation of spacecraft thermal control system]. Patent RF, no. 1840181, 2016.

4. *Zolotaya obertka* [Gold wrapper] [Electronic resource]. URL: <https://zelenyikot.livejournal.com/26235.html> (access: 10.01.2020).

5. «Odezhda» dlya kosmicheskogo apparata ["Clothes" for the spacecraft] [Electronic resource]. URL: <https://anashina.com/intervyu-s-viktoriej-kamilleri/> (access: 10.01.2020).

© Литовченко А. А., 2020

УДК 629.78

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ, ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ

А. Е. Погодин, Г. В. Дмитриев, О. В. Шилкин, А. П. Колесников

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

Рассмотрены два способа отвода тепловой нагрузки от оборудования высокомоощных космических аппаратов: раскрываемых радиационных поверхностей и использование капельного холодильника-излучателя. Получены параметры и проведена оценка массы установки в раскрываемыми радиаторами.

Ключевые слова: капельный холодильник-излучатель, раскрываемые радиаторы, система терморегулирования.

INVESTIGATION OF WAYS TO CRATE THERMAL CONTROL SYSTEMS FOR HIGH-POWER SPACECRAFT, ASSESSMENT OF APPLICABILITY

А. Е. Pogodin, G. V. Dmitriev, O. V. Shilkin, A. P. Kolesnikov

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

Two methods for removing heat from high-power spacecraft are considered. The first is to use a external radiators, the second is to use a droplet heat radiator. Optimal parameters of the functioning of these installations were found.

Keywords: droplet heat radiator, external radiators, system of thermal control.

Введение. В настоящее время спутниковые системы быстро развиваются в направлении наращивания мощностей. Повышение пропускной способности современных спутников связи достигается за счет увеличения мощности аппаратуры ретрансляции, что при к.п.д. порядка 30 % требует высокомоощных средств охлаждения. Увеличение мощности тепловыделения свыше 10 кВт требует новых способов отвода тепловой энергии, поскольку площадь излучающих поверхностей корпуса спутника ограничена.

В данной работе исследуются пути повышения отводимого тепла. В соответствии с законом Стефана-Больцмана количество энергии, излучаемой с поверхности радиатора, зависит от площади и температуры излучающей поверхности:

$$Q = \varepsilon \sigma F T^4,$$

где ε – степень черноты радиатора; σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м²К⁴; $T_{\text{рад}}$ – температура поверхности радиатора, К; F – площадь поверхности радиатора, м².

Увеличение температуры ограничено возможностями самих приборов спутника, и на этом пути требуется использование компрессорных установок, повышающих температуру хладагента. Проведенный расчёт показал, что ввиду больших затрат массы и энергии данный путь может целесообразен при тепловых мощностях свыше 100 кВт.

В части увеличения излучающей поверхности было рассмотрено два способа: использование капельно-

го радиатора, использование раскрывающихся радиаторов.

1) установка капельного-холодильника излучателя, где излучающей поверхностью служат капли теплоносителя. Модель КА с КХИ изображена на рис. 1.

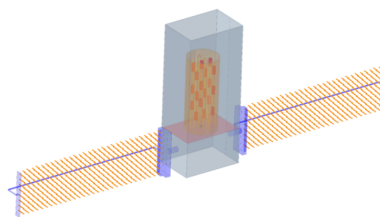


Рис. 1. Модель КА с КХИ

Идея создания бескаркасных космических излучателей нового поколения, основанных на радиационном охлаждении в космосе специальным образом сформированной упорядоченной мелкодисперсной пелены рабочего тела, возникла в конце 80-х – начале 90-х годов прошлого века. В простейшем случае КХИ состоит из генератора и гидросборника капельного потока. С помощью генератора в открытом космическом пространстве формируется пелена мелкодисперсных капель горячего теплоносителя. На пути от генератора к гидросборнику происходит его охлаждение. Холодный теплоноситель собирается гидросборником и направляется в контур установки [1], содержащий насос, приёмник тепла и устройства управления.

Подбор теплоносителей осуществлялся согласно результатам изложенных в работах [1–2]. Для расчетов использовались математические работы, представленные в работах [3–4].

В результате найдены параметры КХИ для отвода требуемой мощности в 15 кВт, среди них: длина 12 м КХИ, расход рабочего тела 1,6171 кг/с, ширина пелены 1,68 м и толщина пелены 20 см;

2) схема высокоомощного КА с раскрываемыми радиаторами на базе платформы Экспресс-2000 представлена на рис. 2. В данной схеме 10 кВт сбрасывают панели корпуса спутника, а 15 кВт, выделяемые оборудованием, расположенным на внутренних панелях, выводится на раскрывающиеся радиаторы.

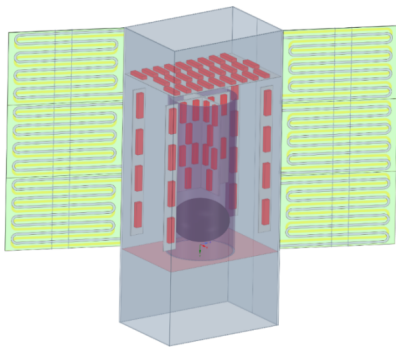


Рис. 2. Вид КА с раскрываемыми радиаторами

Сбор тепла с внутренних панелей осуществляется двухфазным насосным парожидкостным контуром, отвод тепла на раскрывающиеся радиаторы – контурными тепловыми трубами (12 штук). Теплообмен происходит в проточных испарительно-конденсаторных теплообменниках – испарителях контурных тепловых труб (КТТ). Высокие коэффициенты теплоотдачи при испарении/конденсации в теплообменнике позволят обеспечить хорошую тепловую связь собирающего и отводящего тепло контуров в узле малого размера. Далее КТТ передают энергию на раскрываемый радиатор (РР).

В ходе работы были проведены математическое моделирование РР. Также на основе эмпирических зависимостей [5] была составлена математическая модель для расчета параметров теплообменного аппарата, данная расчетная модель была подтверждена с помощью сравнения с экспериментом. Для нахождения оптимальных параметров решалась многопараметрическая оптимизационная задача на основе подтвержденной математической модели. Коэффициент при конденсации составили порядка $50 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ Были

получены параметры массы и хладопроизводительности СТР на базе РР: масса составила порядка 423 килограмма при отводимой мощности в 25 кВт, что является очень хорошим показателем. Поскольку в основе построения СТР лежат достаточно отработанные технологии изготовления насосных контуров и контурных тепловых труб, можно утверждать, что данный способ построения высокоомощной СТР является наиболее обещающим на сегодняшний день.

Библиографические ссылки

1. Бескаркасные системы отвода низкопотенциального тепла в космосе: успехи отработок и нерешенные задачи / Н. В. Бондарева, Л. М. Глухов, А. А. Коротеев и др. // Известия академии наук. Энергетика. 2015. № 4 С. 130–141.
2. Сверхвысоковакуумные жидкости для открытых космических систем отвода низкопотенциального тепла / Н. В. Бондарева, А. А. Коротеев, А. В. Лебедев и др. // Вестник МАИ. 2012. Т. 19, № 3. С. 54–61.
3. Раубе С. С., Красночуб Е. К., Бронштейн В. М. Струйная модель теплообмена рабочих тел (теплоносителей) и расчёт основных параметров капельных холодильников-излучателей перспективных космических аппаратов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2010. № 2. С. 50–61.
4. Сафронов А. А. Исследование процессов формирования капельного потока и радиационного теплообмена в бескаркасных системах отвода низкопотенциального тепла в космосе : дис. ... канд. физико-математ. наук. 2018. С. 79–144.
5. Исаченко В. П. Теплообмен при конденсации // М. : Энергия, 1978. 238 с.

References

1. Beskarkasnyye sistemy otvoda nizkopotentsial'nogo tepla v kosmose: uspekhi otrabotok i nereshennyye zadachi [Frameless systems for removal of low-grade heat in space: the success of mining and unsolved problems] / N. V. Bondareva, L. M. Gluhov, A. A. Koroteev et al. // Izvestiya akademii nauk. Energetika Publ. 2015. № 4. P. 130–141.
2. Sverkhvysokovakuumnyye zhidkosti dlya otrytykh kosmicheskikh sistem otvoda nizkopotentsial'nogo tepla [Ultrahigh-vacuum fluids for open space systems for removing low-grade heat] / N. V. Bondareva, A. A. Koroteev, A. V. Lebedev et al. // Vestnik MAI Publ. 2012. T. 19, № 3. P. 54–61.
3. Raube S. S., Krasnochub E. K., Bronshtein V. M. Struynaya model teploobmena rabochikh tel (teplonositeley) i reshot osnovnykh parametrov kapel'nykh kholodil'nikov-izluchateley perspektivnykh kosmicheskikh apparatov [Jet model of heat transfer of working bodies (coolants) and calculation of the main parameters of drop coolers-emitters of promising spacecraft] // Vestnik SSAU Publ. 2010. № 2. P. 50–61.
4. Safronov A. A. Issledovaniye protsessov formirovaniya kapel'nogo potoka i radiatsionnogo teploobmena v beskarkasnykh sistemakh otvoda nizkopotentsial'nogo tepla v kosmose : dis. ... kandidata fiziko-matematicheskikh nauk [Investigation of the processes of formation of a droplet flow and radiation heat transfer in frameless systems for removing low-grade heat in space. Dissertation for the PhD degree], 2018. P. 79–144.
5. Isachenko V. P. Teploobmen pro kondensatsii [Condensation heat transfer]. M. : Energiya Publ., 1978. 238 p.

© Погодин А. Е., Дмитриев Г. В., Шилкин О. В., Колесников А. П., 2020

УДК 621

РАЗРАБОТКА КОМПАКТНОГО ТОПЛИВНОГО УСТРОЙСТВА

А. С. Причина, А. А. Фадеев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
 Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
 E-mail: rex01111111111111111111@gmail.com

Водородная энергетика является одним из перспективных видов получения энергии. Создав компактную установку для получения водорода её можно использовать для прямой подачи в двигатель работающий на данном виде топлива.

Ключевые слова: водородная энергетика, установка, электролиз, вода, газ.

DEVELOPMENT OF A COMPACT FUEL DEVICE

A. S. Prichina, A. A. Fadeev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
 31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
 E-mail: rex01111111111111111111@gmail.com

Hydrogen energy is one of the most promising types of energy production. Having created a compact unit for hydrogen production, it can be used for direct supply to an engine running on this type of fuel.

Keywords: Hydrogen, energy, installation, electrolysis, water, gas.

Одним из перспективных направлений получения новых видов энергии является водородная энергетика (получения водорода с помощью электролиза и использования его в качестве топлива в различных устройствах и технологических процессах, в том числе и в ракетно-космической области) [2–4]. Использование данного способа получения водорода совместно с традиционным двигателем даст следующие преимущества [1]:

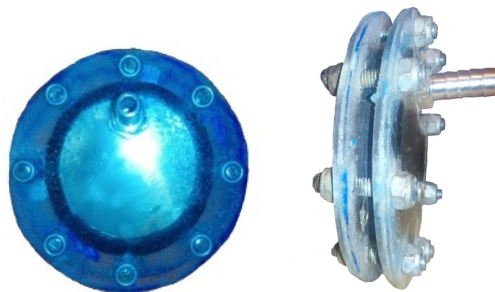
- Повышение экологичности двигателя (снижение выбросов в окружающую среду);
- Экономия топлива (за счет высокой энергоёмкости водорода);
- Повышение КПД двигателя;
- Универсализация и миниатюризация установки для получения водорода

Целью работы было исследование процесса электролиза и конструирование универсальной установки для получения и использования водорода. Все эксперименты проводились при температуре воздуха 26 градусов по Цельсию. Электролит – дистиллированная вода с добавлением NaCO_3 (пищевая сода), в размере 16 грамм на 100 миллилитров, объём заливаемого электролита 30 мл [5; 6]. На электроды подавалось постоянное напряжение 12 В, в зависимости от порядка расстановки электродов менялась сила тока. Цель эксперимента достижение оптимального соотношения максимальной силы тока для генерации газа и минимальной потери энергии за счет теплового нагрева проводов питания, электродов, электролита (воды).

Оценка эффективности процесса проводилась по следующей формуле [3]:

$$\frac{I_{\text{ср}}}{\Delta T} \rightarrow \max.$$

В результате экспериментов был достигнут оптимальный показатель силы тока в 2,5 ампера с тремя электродами, два из которых катод и анод, сделанные из титана и стали соответственно и биполярного электрода из титана посередине. Температура электролита и электродов поднялась с 26 до 38 градусов по Цельсию. Объём выделившегося водорода составил 0.0157 г (0,194 л). На основе принципиальной схемы была разработана конструкция установки для получения водорода и использования его в качестве топлива (см. рисунок).



Компактная установка для получения водорода

Данную установку можно использовать как компактный генератор водорода, для подачи газа, например, в двигатель внутреннего сгорания для повышения его КПД и очистке камеры сгорания от нагара [4].

Библиографические ссылки

1. Магомедов А. М. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. Махачкала : Юпитер, 1996. 245 с.
2. Шпильраин Э. Э., Малышенко С. П., Кулешов Г. Г. Введение в водородную энергетику / под ред. В. А. Легасова. М. : Энергоатмиздат, 1984. 264 с.
3. Коровин Н. В. Электрохимическая энергетика. М. : Энергоатомиздат, 1991. 264 с.
4. Золотницкий В. А. Новые газотопливные системы автомобилей. М. : Изд. дом «Третий Рим», 2005. 64 с.
5. Рассадкин Ю. П. Вода обыкновенная и необыкновенная. М. : Галерея СТО, 2008. 840 с.
6. Гегузин Я. Е. Капля. М. : Наука, 1973. 160 с.

References

1. Magomedov A. M. *Netraditsionnye vozobnovlyaemye istochniki energii* [Non-traditional renewable energy sources]. Makhachkala, Yupiter, 1996, 245 p.
2. Shpil'rain E. E., Malysenko S. P., Kuleshov G. G., Legasova V. A. *Vvedenie v vodorodnyuyu energetiku* [Introduction to hydrogen energy]. Moscow, Energoatmizdat, 1984, 264 p.
3. Korovin N. V. *Elektrokhimicheskaya energetika* [Electrochemical power engineering] Moscow, Energoatomizdat, 1991, 264 p.
4. Zolotnitskiy V. A. *Novye gazotoplivnyye sistemy avtomobiley* [New gas fuel systems for cars]. Moscow, Tretiy Rim Publ., 2005, 64 p.
5. Rassadkin Yu. P. *Voda obyknovennaya i neobyknovennaya* [Ordinary and unusual water]. Moscow, Galereya STO Publ., 2008, 840 p.
6. Geguzin Ya. E. *Kaplya* [Drop] Moscow, Nauka Publ., 1973, 160 p.

© Причина А. С., Фадеев А. А., 2020

УДК 62-971

ТЕПЛОВОЙ ЗАМКНУТЫЙ КОНТУР ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА КИПЕНИЯ

А. А. Ходенков, Е. К. Васильева*, А. И. Жилинский

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

*E-mail: ekaterinavasileva1998@mail.ru

Особенностью функционирования системы изменений параметров для контроля работы теплоэнергетических установок 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 автоматической фиксации значительного объема данных при переходных процессах.

Ключевые слова: тепловой замкнутый контур, теплообмен, коэффициент теплоотдачи.

THERMAL CLOSED LOOP FOR EXPERIMENTAL STUDY OF THE BOILING PROCESS

А. А. Hodenkov, Е. К. Vasileva*, А. I. Zhilinsky

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

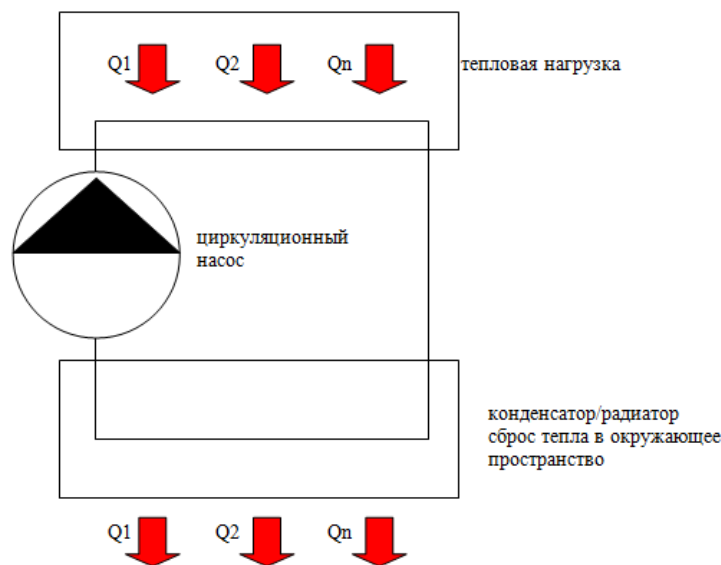
*E-mail: ekaterinavasileva1998@mail.ru

A feature of heat power plants control parameters changing system functioning is the need to measure the parameters of the flow of the working fluid in the channels and cavities, which determines a number of specific requirements: low inertia of the measuring units, the absence of blockage of flow sections, the ability to automatically record a significant amount of data during transient processes.

Keywords: thermal closed loop, heat exchange, heat transfer coefficient.

Простейшая принципиальная схема теплового замкнутого контура представлена на рис. 1. Такой контур состоит из нескольких теплообменных аппаратов – для имитации тепловой нагрузки и для сброса тепла в окружающую среду. Для циркуляции теплоносителя предназначен насос.

В процессе работы контура происходит два различных процесса теплообмена: подвод тепла $Q_{\text{общ}} = \sum Qi$ от охлаждаемых конструкций в теплоноситель и сброс тепла $Q_{\text{общ}}$ в окружающее пространство с помощью принудительного охлаждения в конденсаторе.



Замкнутый тепловой контур с фазовым переходом

Процессы подвода и отвода тепла протекают с изменением агрегатного состояния теплоносителя, что определяет ряд сложностей в расчете ДФК. В настоящее время теплообмен при фазовых переходах теплоносителя изучен недостаточно.

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 рабочего тела. 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, данное направление актуально для исследования процессов протекающих в контуре охлаждения космических аппаратов [1–3].

Процессы подвода и отвода тепла протекают с изменением агрегатного состояния теплоносителя, что определяет ряд сложностей в расчете замкнутого теплового контура. В настоящее время теплообмен при фазовых переходах теплоносителя изучен недостаточно.

Основной задачей при расчете конвективного теплообмена является определение коэффициента теплоотдачи α [4]. 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 непреднамеренно привело к огромной путанице. В настоящее время имеется множество различных корреляций для расчета коэффициента теплоотдачи при фазовых переходах теплоносителя.

Библиографические ссылки

1. Очков В. Ф. Теплотехника и теплоэнергетика. М. : МЭИ, 2007. 54 с.
2. Автоматизированный измерительный комплекс для испытаний теплоэнергетических установок / А. А. Ходенков, А. В. Делков, М. Г. Мелкозеров и др. // Сибирский журнал науки и технологий ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2018. С. 78–80.
3. Ходенков А. А., Ходенкова Э. В. Измерительный комплекс для испытаний теплоэнергетических установок // Решетневские чтения : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2019. С. 121–123.
4. Семенов А. Г. Математические модели в инженерной практике : учеб. пособие / Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. Кемерово, 2003. 96 с.

References

1. Ochkov V. F. Teplotehnika i teploenergetika. M. : MEI, 2007. 54 p.
2. Avtomatizirovannyy izmeritel'nyy kompleks dlya ispytaniy teploenergeticheskikh ustanovok / A. A. Hodenkov, A. V. Delkov, M. G. Melkozerov et al. // Sibirskiyzhurnalnauki i tehnologiy, Reshetnev University. Krasnoyarsk, 2018. P. 78–80.
3. Hodenkov A. A., Hodenkova E. V. Izmeritel'nyy kompleks dlya ispytaniy teploenergeticheskikh ustanovok // Reshetnevskiye chteniya : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. / Reshetnev University. Krasnoyarsk, 2019. P. 121–123.
4. Semenov A. G. Matematicheskiye modeli v inzhenernoy praktike : ucheb. posobiye / Kemerovskiy tekhnologicheskii institut pishchevoy promyshlennosti. Kemerovo, 2003. 96 p.

©. Ходенков А. А., Васильев Е. К.,
Жилинский А. И., 2020

УДК681.5.08

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ДАТЧИКИ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ФИКСАЦИИ ДАННЫХ

А. А. Ходенков, Е. К. Васильева*, А. И. Жилинский

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

*E-mail: ekaterinavasileva1998@mail.ru

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.

Ключевые слова: контроль, термопара, датчик, автоматизация.

TEMPERATURE SENSORS FOR AUTOMATED DATA RECORDING SYSTEM

A. A. Hodenkov, E. K. Vasileva*, A. I. Zhilinsky

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: ekaterinavasileva1998@mail.ru

Thermal power plants are used in many branches of modern industrial production, providing the conversion of various energy types. A system for fixing the main thermodynamic parameters is required to control the thermal power plants operation, assess their energy efficiency within the framework of tests and develop measures for their optimization. Thus, issue of thermal power plants testing measurements automation is currently relevant.

Keywords: control, thermocouple, sensor, automation.

Контроль измеряемых параметров осуществляется с помощью термопар k -типа, на рис. 1 представлена схема заделки термопары по длине трубопровода в замкнутом тепловом контуре.

Заделка термопары температуры рабочего тела осуществляется в соединитель 5, по средствам резьбового соединения для обеспечения герметичности (рис. 2). Конструктивно данный датчик представляет собой болт М5 ГОСТ 7805–70 с просверленным

по вертикальной оси отверстием 1,5 мм и герметично смонтированной термопарой k -типа.

Данное исполнение датчиков и выбранный тип термопар с непосредственным погружением в измеряемую среду позволяет уменьшить погрешность измерения и снизить тепловую инертность контроля температуры, что особенно важно при измерении температуры движущегося потока в трубах малого диаметра [1–3].

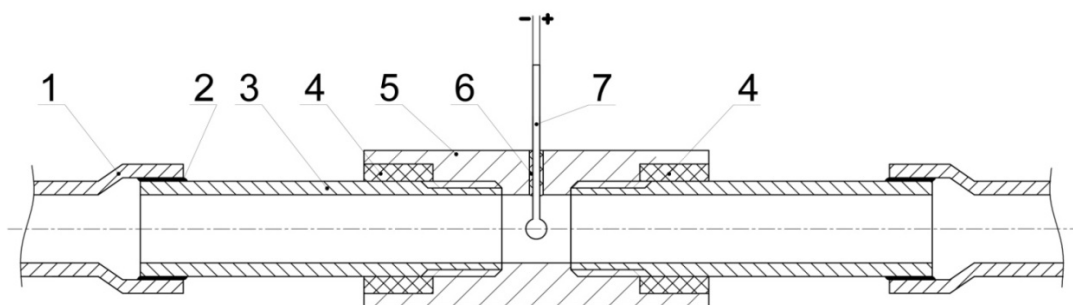


Рис. 1. Схема исполнения заделки термопары температуры потока Т1-Т12:

1 – основной трубопровод; 2 – пайка; 3 – штуцер; 4 – уплотнительный материал; 5 – соединитель; 6 – уплотнение термопары; 7 – термопара k -типа.

Измерительная система построена на базе контроллеров National Instruments NIcDAQ9181 и NIUSB 6008 рис. 3.

Считывание и фиксация параметров производится в графической среде разработки Lab VIEW signal expressfor DAQ 2012. При запуске программы производится считывание конфигурационных файлов, содержащих описание измерительных каналов и сразу же начинается общий цикл измерений [4].

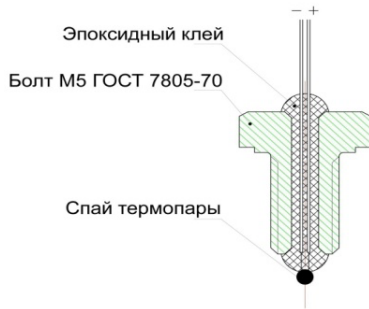


Рис. 2. Термопара температуры рабочего тела и теплоносителя в сборе



Рис. 3 Контроллер National Instruments NI USB 6008

Полученные результаты обеспечат контроль работы теплоэнергетических установок, улучшит оценку

их энергетической эффективности в рамках испытаний и разработки мероприятий по их оптимизации.

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.

References

1. Zadachi i metody matematicheskogo modelirovaniya teplovykh tekhnicheskikh sistem / A. V. Delkov, D. A. Nepomnyaschiy, D. B. Sitnichuk, A. A. Kishkin // Aktualnyye problemy aviatsii i kosmonavtiki : tezisy Vseros. nauch.-prakt. konf. tvorcheskoy molodezhi ; Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2013. P. 69–70.
2. Loytsyanskiy L. G. Mehanika zhidkosti i gaza. 3-e izd., pererab i dop. M. : Nauka, 1970. 940 p.
3. Razrabotka ustanovok-utilizatorov nizkopotentzial'nogo tepla na osnove organicheskogo tsikla Renkina / A. A. Kishkin, D. V. Chernenko, A. V. Delkov et al. // Alternativnaya energetika i ekologiya. 2014. № 3 (4). P. 35–36.
4. Ochkov V. F. Teplotehnika i teploenergetika. M. : MEI, 2007. 54 p.

©. Ходенков А. А., Васильев Е. К., Жилинский А. И., 2020

УДК 620.9

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ПАРСИЛОВЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

А. А. Ходенков, Э. В. Ходенкова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
 Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
 E-mail: Ellie4ka@mail.ru

Рассматривается вопрос теплотехнических измерений при испытаниях паросиловых энергоустановок. Особое внимание уделяется использованию термопар для измерения температуры потока. Приводится описание системы регистрации сигналов.

Ключевые слова: теплотехнические измерения, паросиловая установка, измерительный комплекс.

MEASURING SET FOR STEAM PLANT TESTING

A. A. Khodenkov, E. V. Khodenkova

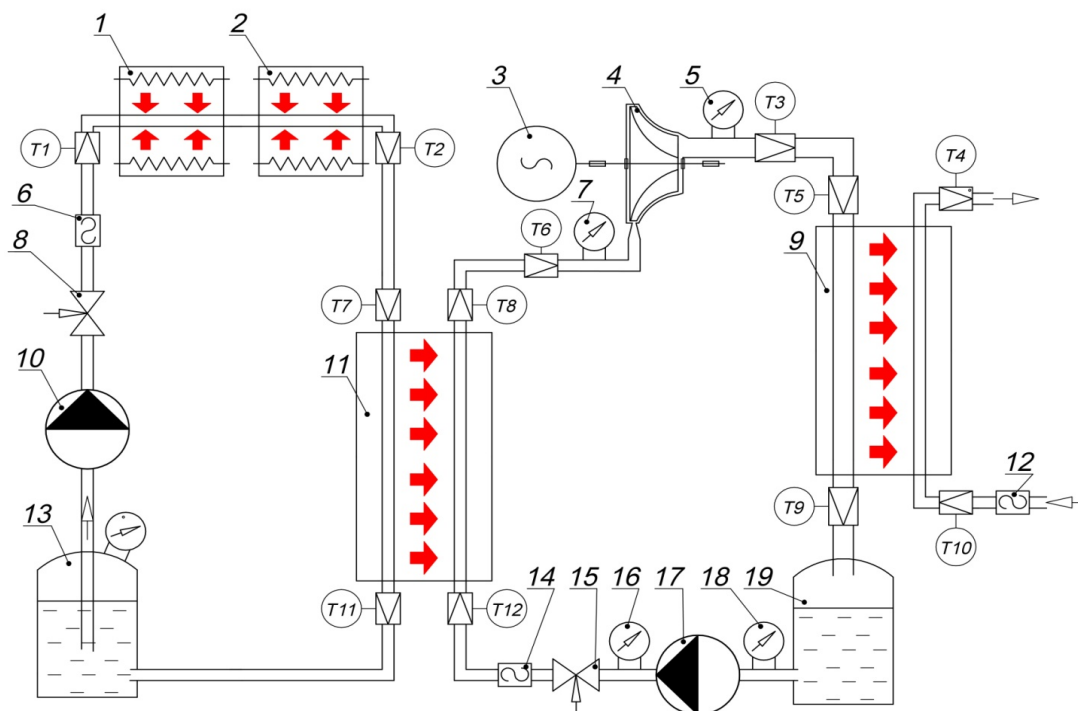
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
 31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
 E-mail: Ellie4ka@mail.ru

This article examines the issue of heat engineering measurements when testing steam power plants. The authors pay particular attention to the use of thermocouples to measure the flow temperature. Also, the described signal registration system makes it possible to obtain temperature parameters directly from the flow inside the tube with low thermal energy.

Keywords: thermal engineering measurements, steam power plant, measuring complex.

Использование паросиловых энергоустановок на низкокипящем рабочем теле позволяет увеличить коэффициент полезного действия (КПД) имеющихся тепловых двигателей или задействовать тепловые источники недоступные для пароводяных турбин и котлов [1].

Исследование данной тематики является актуальным и востребованным направлением и в данной работе рассмотрен один из аспектов контроля температуры в экспериментальном контуре паросиловой установки на низкокипящем рабочем теле, принципиальная схема представлена на рисунке.



Принципиальная схема экспериментальной установки

Установка состоит из двух контуров. В первом контуре происходит нагрев рабочего тела с помощью двух электродвигателей: 1 и 2, далее нагретая жидкость попадает в пластинчатый теплообменный аппарат 11, где тепло передается во второй контур. Циркуляцию в первом контуре обеспечивает циркуляционный насос 10, контроль параметров: Т1 и Т2 термopара до и после электродвигателей, Т7 и Т11 контроль температуры до и после ТА, 8 – регулирующий вентиль, 6 – датчик массового расхода теплоносителя, 13 – ресивер с предохранительным клапаном [2].

Во втором контуре циркулирует низкокипящее рабочее тело (фреон), из ресивера 19 рабочее тело с помощью насоса 17 поступает в ТА 11, под воздействием подводимого тепла фреон закипает и испаряется, далее газообразный фреон совершает работу на лопатках турбины 4, приводя в движение генератор 3. Охлаждение рабочего тела осуществляется в пластинчатом теплообменном аппарате 9, который омывается холодной водопроводной водой, далее сконденсированное рабочее тело сливается в ресивер. При проведении экспериментального исследования происходит контроль и фиксация температуры рабочего тела в начале и конце каждого участка [2].

Применение автоматизированных систем измерения в различных областях контроля работы теплоэнергетических установок позволит использовать результаты для контроля работы теплоэнергетических установок, оценки их энергетической эффективности в рамках испытаний и разработки мероприятий по их оптимизации необходима система фиксации основных термодинамических параметров.

References

1. Delcov A. V., Hodenkov A. A., Zhuikov D. A. Numerical modeling and analyzing of conjugate radiation-convective heat transfer of fin-tube radiator of spacecraft [Electronic resource] // 2015 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 93 012007. URL: <http://iopscience.iop.org/1757-899X/93/1/012007> (access: 12.05.2020).
2. Delcov A. V., Hodenkov A. A.; Zhuikov D. A. Mathematical modeling of single-phase thermal control system of the spacecraft // Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE) : 12th International Conference. 2014. P. 591–593.

© Ходенков А. А., Ходенкова Э. В., 2020

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНДЕНСАТОРА-ИСПАРИТЕЛЯ

В. В. Черненко, Д. В. Черненко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: 2887722@mail.ru

Рассмотрены основные положения математической модели конденсатора-испарителя применительно к воздуходелительным установкам. Модель основана на совместном решении уравнений гидродинамики и теплообмена для трубчатых аппаратов с применением итерационных расчетов для уточнения начальных значений определяющих параметров как внутри отдельных блоков, так и между блоками.

Ключевые слова: конденсатор-испаритель, математическая модель, тепловой расчет, итерационный метод, теплоотдача.

MATHEMATICAL MODEL OF EVAPORATOR-CONDENSER

V. V. Chernenko, D. V. Chernenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: 2887722@mail.ru

The basic provisions of the mathematical model of a condenser-evaporator in relation to air separation units are considered. The model is based on a joint solution of the equations of hydrodynamics and heat transfer for tubular apparatuses using iterative calculations to clarify the initial values of the determining parameters both within individual blocks and between blocks.

Keywords: evaporator-condenser, mathematical model, heat calculation, iterative method, heat transfer.

Конденсаторы-испарители нашли применение во многих теплотехнических установках. Особенно широко они используются в криогенной технике и являются одним из обязательных элементов, обеспечивающих функционирование практически любой установки разделения воздуха и других газовых смесей, предназначенных, в том числе, для получения компонентов ракетного топлива.

Эффективность работы конденсатора-испарителя в значительной мере определяет экономичность работы всей установки. К примеру, увеличение разницы температур между обменивающимися теплом средами на 1°K приводит к увеличению расхода энергии на сжатие воздуха до 5 % от общих энергетических затрат [1]. С другой стороны, уменьшение температурного напора ниже оптимального значения приводит к необходимости значительного увеличения теплопередающей поверхности. Учитывая большие энергопотребление и металлоёмкость аппаратов ВРУ, становится очевидной необходимость оптимизации каждого их элемента, в том числе, конденсатора-испарителя.

Наиболее целесообразным методом исследования и оптимизации таких крупных и дорогостоящих объектов является математическое моделирование, поскольку позволяет объективно рассмотреть и сопоставить множество различных вариантов и выбрать наиболее приемлемый, а также ограничить масштабы физического эксперимента проверкой адекватности модели и определением численных значений коэффи-

циентов, которые не могут быть получены аналитическим путем.

Конденсаторы-испарители ВРУ работают в режиме естественной циркуляции, соответственно, в них имеется сложная взаимосвязь тепловых и гидравлических характеристик процесса парообразования. Теплоотдача со стороны кипящей жидкости определяется скоростью циркуляции, которая, в свою очередь, может быть найдена из гидравлического расчета при известных значениях тепловых потоков и геометрических размеров поверхности теплообмена, являющихся целевой функцией оптимизационной задачи. Кроме того, процесс кипения реализуется одновременно с процессом конденсации, что накладывает ограничения на соотношения тепловых потоков и температурных напоров обоих процессов. Таким образом, модель должна строиться на базе системы уравнений, описывающих циркуляцию кипящей жидкости и процессы теплоотдачи с обеих сторон теплопередающей поверхности.

Математическая модель, схема которой приведена на рисунке, включает в себя пять блоков: блок входных параметров, блок предварительно выбираемых параметров, блок гидравлического расчета, блок теплового расчета и блок выходных параметров. Расчетная методика основана на использовании принципа последовательных приближений.

Блок входных параметров аналогичен как для проектных, так и для поверочных расчетов. В качестве

входных параметров используются: Q – величина общей тепловой нагрузки; p_{evap} – давление на стороне кипения; p_{cond} – давление на стороне конденсации; l – длина трубы; d_{out} – наружный диаметр трубы; d_{inn} – внутренний диаметр трубы; S – шаг труб.

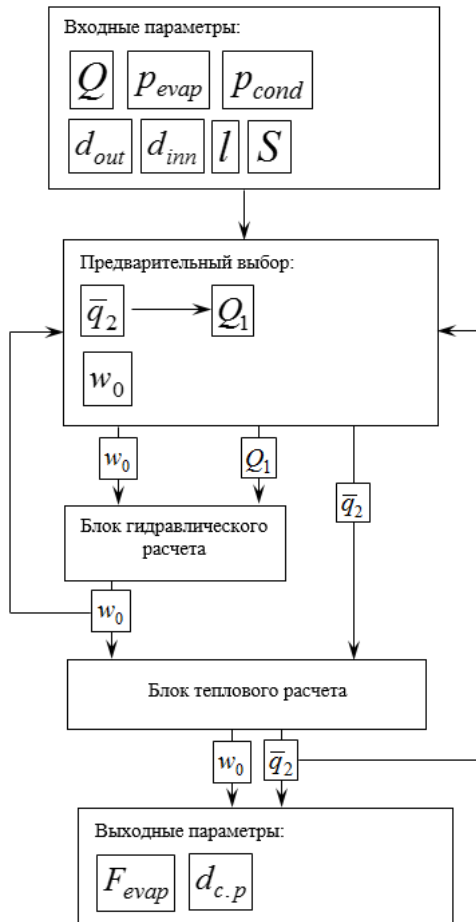


Схема математической модели конденсатора-испарителя

Блок предварительно выбираемых параметров включает в себя определение физических параметров рабочих сред по давлениям кипения и конденсации, а также необходимых для запуска расчета уточняемых величин.

В группу физических параметров входят температуры кипения T_{evap} и конденсации T_{cond} рабочих сред с учетом примесей, а также плотности жидкости ρ' и пара ρ'' , коэффициенты теплопроводности λ , коэффициенты динамической вязкости μ и теплоты испарения r на сторонах кипения и конденсации [2].

$$Q_1 = w_0 f \rho'_{evap} r x, \quad (3)$$

где f – площадь поперечного сечения канала; x – массовое паросодержание на выходе из канала кипения.

Целью блока гидравлического расчета является уточнение скорости циркуляции, протяженности эконо-

номайзерной зоны, давлений и температур в характерных сечениях канала. Расчет основанный на решении многошаговым (итерационным) методом уравнения гидродинамического баланса контура с естественной циркуляцией. Блок гидравлического расчета подробно описан в [3].

Задачей блока теплового расчета является уточнение значения плотности теплового потока на активном участке трубы по результатам гидравлического расчета, а также уточнение располагаемого температурного напора с учетом гидростатической температурной депрессии. Тепловой расчет построен на решении критериальных уравнений теплоотдачи при конденсации в межтрубном пространстве и кипении внутри трубы. При расчете конденсации используется модель теплоотдачи при конденсации однокомпонентного пара на вертикальной стенке при ламинарном течении пленки конденсата. Расчет кипения основан на модели теплоотдачи к двухфазному потоку в трубе [4]. Решение ведется многошаговым (итерационным) методом. В качестве критерия сходимости итераций используется величина плотности теплового потока на стороне кипения. Блок теплового расчета подробно описан в [5].

К уточняемым величинам относятся:

- средняя плотность теплового потока со стороны кипения \bar{q}_2 ;
- температурная депрессия на стороне кипения

$$\delta t = \frac{0,5 T_{evap} H l \rho'_{evap}}{0,102 r \rho''_{evap}}, \quad (1)$$

где H – относительный уровень жидкости, выбираемый по условиям взрывобезопасности и значению \bar{q}_2 ;

- средний температурный напор между обменивающимися теплотой средами

$$\Delta \bar{T} = T_{cond} - T_{evap} - \delta t; \quad (2)$$

- скорость циркуляции w_0 ;
- тепловой поток в единичном канале

Гидравлический и тепловой расчеты повторяются в той же последовательности, если предварительные и расчетные значения плотности теплового потока отличаются более чем на 5%. Точность расчета, как правило, оказывается достаточной после второго приближения.

Блок выходных параметров является завершающим и включает в себя расчет основных геометрических характеристик аппарата. В качестве выходных параметров рассматриваются:

- площадь теплообменной поверхности на стороне кипения

$$F_{evap} = \frac{Q}{\bar{q}_2}; \quad (4)$$

- количество труб в трубной решетке

$$n = \frac{F_{evap}}{\pi d_{evap} l}, \quad (5)$$

где d_{evap} – диаметр трубки со стороны кипения;

– диаметр центральной циркуляционной трубы

$$d_{c.p} = \sqrt{\frac{4f_{c.p}}{\pi}}, \quad (5)$$

где $f_{c.p} = \frac{V_{c.p}}{w_{c.p}}$ – сечение циркуляционной трубы,

$$V_{c.p} = \frac{\pi d_{evap}^2 n w_0}{4} - \frac{\pi d_{evap} n l \bar{q}_2}{\rho'_{evap} r}$$

– объемный расход жидкости, выносимой с паром, $w_{c.p} = 0,97u$ – скорость движения жидкости в циркуляционной трубе,

$$u = 1,54 \sqrt{\frac{g\sigma(\rho' - \rho'')}{\rho'^2}}$$

– относительная скорость всплытия одиночного пузырька.

При поверочном расчете количество труб в трубной решетке известно, а определяется давление на стороне конденсации.

Модель может быть дополнена оптимизацией геометрии аппарата на основе вариации входных геометрических параметров. Но необходимо учитывать, что диапазон вариаций ограничен требованиями техники безопасности.

Библиографические ссылки

1. Григорьев В. А., Крохин Ю. И. Тепло- и массообменные аппараты криогенной техники : учеб. пособие для вузов. М. : Энергоиздат, 1982. 312 с.
2. Наринский Г. Б. Разделение воздуха. М.: Машиностроение, 1978. 248 с.

3. Chernenko D. V., Chernenko V. V. 2019 Hydraulic calculation unit in the mathematical model of air separation plant evaporator-condenser *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. and Eng.* **537** 062065.

4. Епифанова В. И., Аксельрод Л. С. Разделение воздуха методом глубокого охлаждения. М. : Машиностроение, 1973. Т. 1. 472 с.

5. Chernenko D. V., Chernenko V. V. 2020 Heat calculation unit in the mathematical model of air separation plant evaporator-condenser *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **734** 012001.

References

1. Grigoriev V. A., Krokhin Yu. I. *Тепло- и массообменные аппараты криогенной техники* [Heat and Mass Transfer Devices of Cryogenic Equipment] : Educational Manual for Universities. Moscow, Energoizdat, 1982, 312 p.
2. Narinskii G. B. *Razdeleniye vozdukha* [Air Rectification]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1978, 248 p.
3. Chernenko D. V. and Chernenko V. V. 2019 Hydraulic calculation unit in the mathematical model of air separation plant evaporator-condenser *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. and Eng.* **537** 062065.
4. Epifanova V. I., Axelrod L. S. *Razdeleniye vozdukha metodom glubokogo okhlazhdeniya* [Air separation by deep cooling], vol 1. Moscow, Mashinostroyeniye, 1973, 472 p.
5. Chernenko D. V. and Chernenko V. V. 2020 Heat calculation unit in the mathematical model of air separation plant evaporator-condenser *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **734** 012001.

© Черненко В. В., Черненко Д. В., 2020

**ИНТЕГРАЛЬНОЕ СООТНОШЕНИЕ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ ИМПУЛЬСОВ
ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПО ПОВЕРХНОСТИ КОЛЬЦЕВОГО СЕЧЕНИЯ**

Ю. Н. Шевченко, А. А. Кишкин, Е. Н. Луговой

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: spsp99@mail.ru

Рассмотрено интегрирование уравнений пограничного слоя для внутреннего и внешнего течения в кольцевом сечении в цилиндрической системе координат. Проведен анализ малых величин членов уравнений. Преобразовано уравнение неразрывности и получено интегральное соотношение единое для внутреннего и внешнего обтекания (отрицательной и положительной нормали).

Ключевые слова: уравнение пограничного слоя, напряжение трения, толщина потери импульса, кривизна с положительной и отрицательной нормалью, толщина вытеснения.

**INTEGRAL RELATION FOR THE EQUATIONS OF BOUNDARY LAYER IMPULSES OVER
THE SURFACE OF THE ANNULAR SECTION**

Yu. N. Shevchenko, A. A. Kishkin, Ye. N. Lugovoy

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: spsp99@mail.ru

The paper considers the integration of boundary layer equations for internal and external flow in an annular section in a cylindrical coordinate system. The analysis of small values of the terms of the equations is carried out. The continuity equation is transformed and an integral relation is obtained that is uniform for the internal and external flow (negative and positive normals).

Keywords: boundary layer equation, friction stress, momentum loss thickness, positive and negative normal curvature, displacement thickness.

Задача продольного обтекания с поперечным радиусом кривизны R_0 широко представлена граничными условиями технических устройств и аппаратов: кольцевое сопло, внутреннего течения подводящих и отводящих устройств в турбомашинах, неустановившегося внутреннего течения на начальных участках трубчатых теплообменных аппаратов, внешнее обтекание цилиндрических поверхностей летательных аппаратов, совместная внутренняя и внешняя задача формирующегося граничными условиями кольцевого тракта.

Для решения воспользуемся цилиндрическими координатами (см. рисунок).

Сделаем необходимые допущения:

– течение осесимметрично

$$\frac{\partial}{\partial \theta} = 0; \tag{1}$$

– вращение вокруг оси z нет

$$\begin{aligned} v_\theta &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial R} &= 0. \end{aligned} \tag{2}$$

С учетом допущений (1) и (2) уравнения движения в цилиндрических координатах вязкой несжимаемой жидкости принимает вид [1]:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial v_R}{\partial t} + v_R \frac{\partial v_R}{\partial R} + v_z \frac{\partial v_R}{\partial z} = \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial R} + v \left(\frac{\partial^2 v_R}{\partial R^2} + \frac{\partial^2 v_R}{\partial z^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial v_R}{\partial R} - \frac{\partial v_R}{\partial R^2} \right); \\ &\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_R \frac{\partial v_z}{\partial t R} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial R^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial v_z}{\partial R} \right); \\ &\frac{\partial v_R}{\partial R} + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{v_R}{R} = 0. \end{aligned} \tag{3}$$

Последнее уравнение в системе (3) с учетом выражения для дивергенции в криволинейных координатах [3] принимает вид:

$$\frac{\partial}{\partial R} (v_R \cdot R) + \frac{\partial}{\partial z} (v_z \cdot R) = 0. \tag{4}$$

Для выполнения решения необходимо заменить переменные: для внутреннего течения (см. рисунок) $y_{(-)} = R_0 - R$; для внешнего обтекания $y_{(+)} = R_0 - R$, при этом коэффициенты $y_{(-)}$ и $y_{(+)}$ направлены внутрь пограничного слоя. При уменьшении y на стенке δ (толщина пограничного слоя) величина осевой составляющей скорости v_z изменяется от 0 до $v_{z\delta}$ (скорость на границе пограничного слоя, равна скорости в невозмущенном ядре потока).

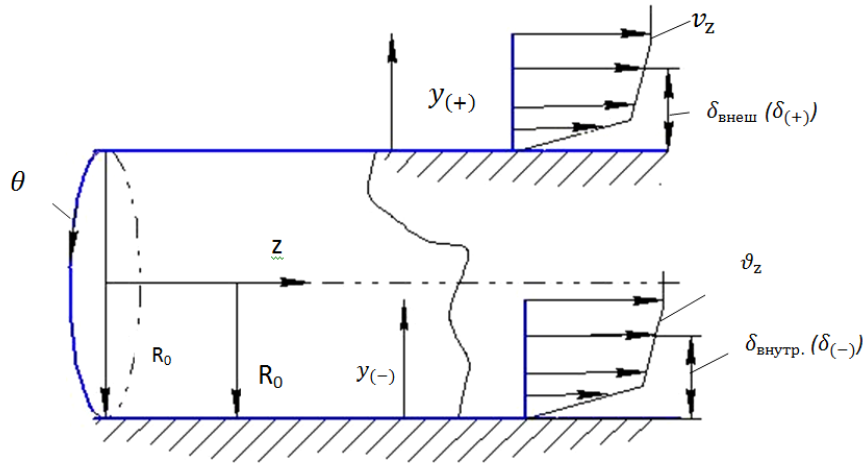


Схема внутреннего $y_{(-)}$ и внешнего обтекания в цилиндрических координатах θ ; R ; z ,
 где v_z – скорость в пограничном слое; $\delta_{(-)}$, $\delta_{(+)}$ – толщина пограничного слоя
 для внутреннего и внешнего обтекания; R_0 – радиус поперечной кривизны;
 $y_{(-)}$, $y_{(+)}$ – новые переменные для внутреннего и внешнего обтекания соответственно

Преобразуем систему уравнений (3).
 Для внутренней:

$$y_{(-)} = R_0 - R; \quad (5)$$

и внешней:

$$y_{(+)} = R_0 - R. \quad (6)$$

В результате анализа малых величин уравнений пограничного слоя уравнение неразрывности приобретает вид [2]:

$$\frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0; \quad (7)$$

остальные уравнения упрощаются:

$$\frac{\partial \rho}{\partial y} = 0; v_z \frac{\partial v_z}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} \right). \quad (8)$$

Проинтегрируем уравнения от $y = 0$, до $y = \delta$, где δ толщина пограничного слоя.

Используя понятия толщины потерь импульса и вытеснения:

$$\delta^{**} \cdot V_z^2 = \int_0^h (V_z - v_z) v_z dy. \quad (8)$$

$$\delta^* \cdot V_z = \int_0^h (V_z - v_z) dy, \quad (9)$$

получаем уравнение импульсов:

$$\frac{\tau_0}{\rho} = \frac{\partial}{\partial z} (\delta^{**} \cdot V_z^2) + \delta^* \cdot V_z \frac{\partial V_z}{\partial z}, \quad (10)$$

где τ_0 – напряжение трения; V_z – скорость в ядре потока.

Интегрирование уравнения (10) для внутренних и кольцевых течений возможно только численно, с определением функций $V_z(z)$, что характерно для неустановившегося течения с разомкнутыми пограничными слоями в рабочей проточной части турбомашин (межлопаточный канал).

Библиографические ссылки

1. Кочин Н. Е., Кибель И. Е., Розе М. В. Теоретическая механика, гидромеханика. Ч. 2. М. : Физматгиз, 1963. 728 с.
2. Войткунский Я. И., Фадеев Ю. И., Федяевский К. К. Гидромеханика : учебник. 2-е изд., перераб. и доп. Л. : Судостроение, 1982. 456 с.
3. Емцев Б. Т. Техническая гидромеханика : Учебник для вузов по специальности гидравлические машины и средства автоматизации. М. : Машиностроение, 1978. 463 с.

References

1. Kochin N. Ye., Kibel I. Ye., Rose M. V. Theoretical mechanics, hydromechanics. Part 2. M. : Fizmatgiz, 1963. 728 p.
2. Voitkunsky Ya. I., Fadeev Yu. I., Fedyayevsky K. K. Hydromechanics: textbook. 2nd edition., revised. and add. L. : Shipbuilding, 1982. 456 p.
3. Emtsev B. T. Technical hydromechanics : Textbook for universities specializing in hydraulic machines and automation equipment. M. : Mechanical Engineering, 1978. 463 p.

© Шевченко Ю. Н., Кишкин А. А.,
 Луговой Е. Н., 2020

УДК 629.7

ПРОФИЛИРОВАНИЕ ЛОПАТОЧНОГО ПРОФИЛЯ РАДИАЛЬНОЙ ТУРБИНЫ

Ю. Н. Шевченко, А. А. Кишкин, Е. Н. Луговой, М. У. Абдуллаев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: spsp99@mail.ru

Рассмотрено профилирование средней линии дугой окружности при известных радиусах входа и выхода в рабочее колесо и лопаточных углов. Рассмотрены зависимости лопаточного радиуса от угла лопатки на входе, установлен факт инверсии профиля в случае прямой лопатки на угле 62° . Предложено выражение для критического профилирования при изменении знака кривизны.

Ключевые слова: лопаточные углы на входе и на выходе, радиус профилирования средней линии, радиус центра лопаточного профиля, радиус входа, радиус выхода в рабочее колесо, критический случай профилирования.

PROFILING OF THE BLADE PROFILE OF THE RADIAL TURBINE

Yu. N. Shevchenko, A. A. Kishkin, Ye. N. Lugovoy, M. U. Abdullayev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: spsp99@mail.ru

The paper considers the profiling of the midline by the arc of a circle at known radii of the entrance and exit to the impeller and blade angles. The dependences of the blade radius on the angle of the blade at the inlet are considered, and the fact of profile inversion in the case of a straight blade at an angle of 62° is established. An expression for supercritical profiling when the sign of curvature changes is proposed.

Keywords: blade angles at the inlet and outlet, midline profiling radius, center radius of the blade profile, entrance radius, exit radius to the impeller, critical case of profiling.

Аналитическое задание профиля лопатки по радиусам и углам входа и выхода в рабочее колесо позволяет автоматизировать процесс профилирования тонких лопаточных профилей. Кроме того алгоритм профилирования позволяет получить функцию эквидистантной линии тока и ее геометрические, кинематические и дифференциальные характеристики потока в межлопаточном канале, что является основой для интегрирования уравнений пространственного пограничного слоя и определение толщин потерь импульса и напряжений трения в межлопаточном канале.

Выведем основные соотношения для профилирования. Исходными данными традиционно в практике турбомашин являются [1]:

- R_1 – радиус входа в РК;
- R_2 – радиус выходного сечения;
- $\beta_{1л}$ – угол лопатки на входе;
- $\beta_{2л}$ – угол лопатки на выходе.

Расчетные результаты для профилирования дугой окружности определяются:

- $R_{ц}$ – радиусом расположения центров профильных окружностей;
- $R_{л}$ – радиусом лопаточного профиля.

На рис. 1 показана расчетная схема профилирования, видно что углы $\beta_{1л} = \beta_{1л}^*$ – как углы со взаимно перпендикулярными сторонами.

Углы $\beta_{1л} = \beta'_{2л}$ – вертикальные углы, а $\beta_{1л}^* = \beta'_{2л} = \beta_{1л}$, в силу того, что и – имеют взаимно перпендикулярные стороны.

Рассмотрим теорему косинусов для треугольников $\triangle OMG$ и $\triangle MKO$ рис. 2, причем определяемой стороной в обоих случаях будет радиус центров $R_{ц}$, что эквивалентно стороне $|OM|$, равнопринадлежащей обоим треугольникам [3]:

$$\begin{aligned} \triangle OMG: R_{ц} = |MO|^2 &= |MG|^2 = |GO|^2 - 2|MG| \cdot |GO| \cos \beta_{1л} = \\ &= R_{л}^2 + R_1^2 - 2R_{л} \cdot R_1 \cdot \cos \beta_{1л}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \triangle MKO: R_{ц} = |MO|^2 &= |MG|^2 = \\ &= R_{л}^2 + R_2^2 - 2R_{л} \cdot R_2 \cdot \cos \beta_{1л}; \end{aligned} \quad (2)$$

Сравним выражения (1) и (2) и определим $R_{л}$:

$$R_{л} = \frac{R_1^2 - R_2^2}{2(R_1 \cos \beta_{1л} - R_2 \cos \beta_{2л})}; \quad (3)$$

Для определения $R_{ц}$ необходимо использовать выражения (1) или (2). В таблице приведены результаты примерного расчета для рабочего колеса $R_1 = 80$ мм; $R_2 = 40$ мм; $\beta_{2л} = 20^\circ$; $\beta_{1л} = 20 \dots 160^\circ$.

Из таблицы видно, что начиная с угла $\beta_{1л} = 62^\circ$ появляются отрицательные значения $R_{л}$, что соответствует инверсионному переходу кривизны лопаточного профиля [2].

Пограничная прямолинейная лопатка $R_{л} = \infty$ формируется как это следует из выражения (3) на угле:

$$\beta_{1л} = \arccos\left(\frac{R_2}{R_1} \cos \beta_{2л}\right); \quad (4)$$

В нашем случае $\beta_{1л} = 62^\circ$. На рис. 3. видно угол $\beta_{1л} = 20^\circ$ имеет положительную кривизну, угол $\beta_{1л} = 62^\circ$ – прямая лопатка, угол $\beta_{1л} = 160^\circ$ – формируется лопаткой условно отрицательной кривизны. Предлагаемые выражения (2) и (3) позволяют профилировать лопатки как рабочей, так и сопловой решетки, в практическом диапазоне изменения радиусов и углов радиальных решеток так, что обеспечивает изменение степени реактивности ступени $\rho_k = 0 \dots 1$.

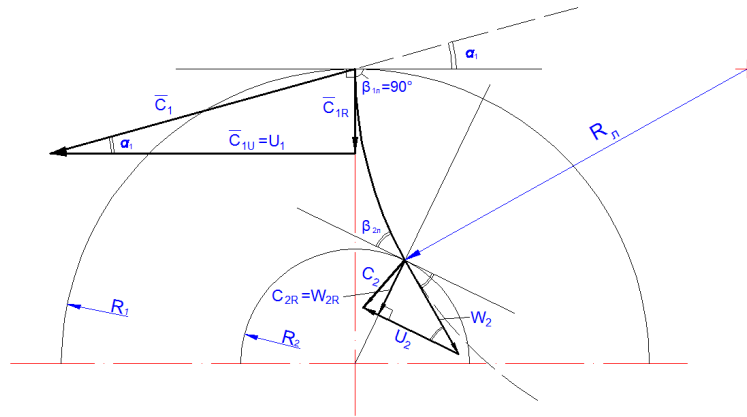


Рис. 1. Треугольники векторов скоростей на входе и выходе из рабочей решетки

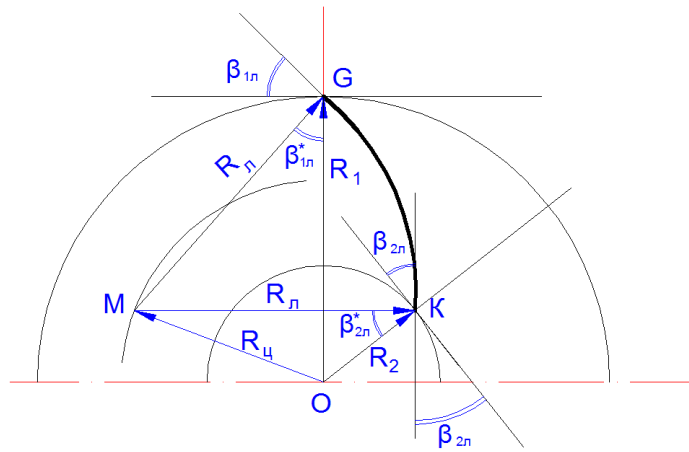


Рис. 2. К расчету радиусов центров $R_{ц}$ и радиусов лопаточных профилей

Изменения $\beta_{1л}$

	20	40	50	60	70	80	90	110	120	150	160	62
$R_{л}$, мм	63,8	75,8	173,4	1000	-234,4	-101,4	-63,8	-36,9	-30,9	-22,5	-21,3	∞
$R_{ц}$, мм	29,6	40,5	136,5	963	272,3	139,6	102,3	75,8	70,8	61,6	60,4	∞

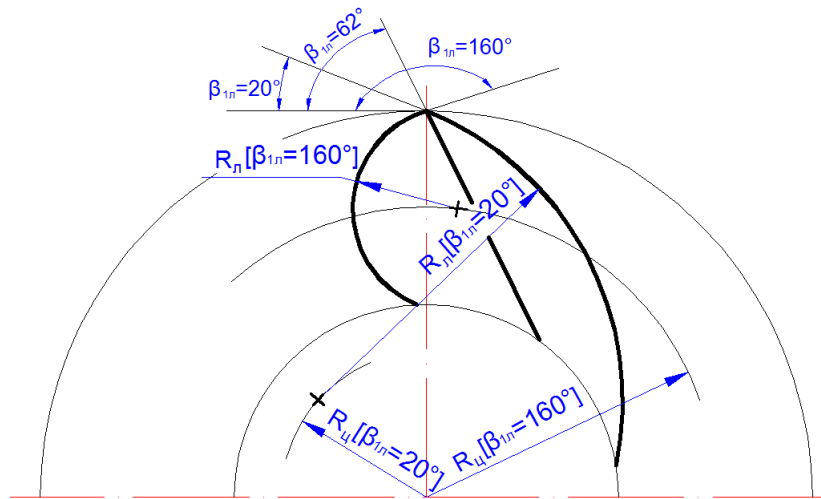


Рис. 3. Инверсия лопаточного профиля при изменении лопаточного угла $\beta_{2л}$ от 20° до 160°

Закритическое профилирование требует дополнительных теоретических исследований в рамках подобных построений рассмотренных выше.

Библиографические ссылки

1. Овсянников Б. В., Боровский Б. И. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей. М. : Машиностроение, 1986. 376 с.
2. Теория пространственного пограничного слоя в гидродинамике турбомашин : монография / А. А. Кишкин, В. П. Назаров, Д. А. Жуйков, Д. В. Черненко ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. 250 с.
3. Зарубин В. С. Математическое моделирование в технике : учебник для вузов / под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. 496 с.

References

1. Ovsyannikov B. V., Borovskiy B. I. [Theory and calculation of power supply units for liquid rocket engines]. M. : Mashinostroenie, 1986. 376 p.
2. [The theory of the spatial boundary layer in the hydrodynamics of turbomachines] : monograph / A. A. Kishkin, V. P. Nazarov, D. A. Zhuiikov, D. V. Chernenko ; Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2013. 250 p.
3. Zarubin V. S. [Mathematical modeling in technology] : textbook for universities / ed. V. S. Zarubina, A. P. Krishchenko. M. : Publishing house of MSTU im. N. E. Bauman, 2003. 496 p.

© Шевченко Ю. Н., Кишкин А. А.,
Луговой Е. Н., Абдуллаев М. У., 2020



Секция

«ТЕХНОЛОГИИ РАКЕТОСТРОЕНИЯ»

УДК 621.9.047.7

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО МЕТОДА УДАЛЕНИЯ ЗАУСЕНЦЕВ

С. В. Назаров*, И. Я. Шестаков

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: svnazarov79@mail.ru

Рассматриваются методы удаления заусенцев, применяемые в промышленности. Указаны их недостатки. Показано, что электрохимический метод имеет определённые преимущества, что определяет перспективу его использования.

Ключевые слова: удаление заусенцев, электрохимический метод, область применения.

APPLICATION OF ELECTROCHEMICAL DEBURRING METHOD

S. V. Nazarov*, I. Ya. Shestakov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: svnazarov79@mail.ru

Methods of deburring used in industry are considered. Their disadvantages are indicated. It is shown that the electrochemical method has certain advantages, which determines the prospect of its use.

Keywords: deburring, electrochemical method, field of application.

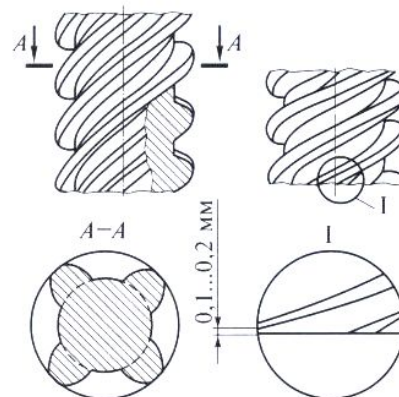
Наиболее многочисленными и опасными источниками технологических загрязнений являются заусенцы, остающиеся на поверхности деталей после механической обработки. Удаление заусенцев определяет качество и надежность работы агрегата в целом. Методы удаления заусенцев, основанные на использовании свободного абразива (объемная виброобработка, галтовка, гидроабразивная обработка, обработка ультразвуком в абразивной суспензии и др.), не всегда бывают надежны. Кроме этого, указанные методы характеризуются низкой производительностью, неравномерностью съема по кромкам и шаржированием поверхности ответственных деталей [1–3].

Качественно новые результаты достигнуты при решении этой задачи на основе электрохимической технологии. Электрохимический метод применяется для удаления заусенцев с шестерен, шлицевых валков, деталей после операции фрезерования, сверления, вырубки. В процессе изготовления аппаратуры и других гидроагрегатов, содержащих сложные распределительные устройства с золотниковыми парами, удаление заусенцев и скругление острых кромок, осуществляемое с помощью электрохимического метода, приобретает важное значение. Метод позволяет эффективно удалять заусенцы любых размеров, совмещать травление заусенцев с операциями по доводке и калибровке. При этом качество обработки (тщательность зачистки, равномерность, плавность скругления и чистота поверхности на кромках) весьма высокая. Отсутствие износа инструмента и его фиксированное положение при обработке деталей делают процесс достаточно простым и создают условия

для его автоматизации, повышения производительности [2–5].

В камерах сгорания летательных аппаратов имеются форсунки главным элементом которых является завихритель, обеспечивающий их нормальную и стабильную работу (см. рисунок). Завихритель представляет собой многозаходный шнек (2...4 захода) с канавкой трапецевидальной или прямоугольной формы.

Винтовые канавки на шнеках получают накатыванием на резбонакатных полуавтоматах или фрезерованием на резбофрезерных станках. Затем с ребер шнеков с помощью электрохимической обработки удаляют заусенцы, после чего контролируют геометрические размеры всех деталей форсунок [3–4].



Конструкция шнеков

Как показал анализ, при доводке поверхностей деталей летательных аппаратов наряду с механическими широко используются электрохимические методы обработки. Электрохимические методы нашли широкое применение в промышленности в качестве операций доводки и удаления заусенцев на деталях требующих высокой точности обработки.

С экономической точки зрения электрохимический метод целесообразно применять, когда: 1) другими методами удалить заусенцы и притупить острые кромки трудно или невозможно; 2) необходимо получить полную идентичность притупления кромок по всей обрабатываемой поверхности; 3) необходимо значительно повысить производительность труда при обработке массовых деталей [2–4].

Библиографические ссылки

1. Надараиа Ц. Г., Бабкина Л. А., Шестаков И. Я. Электрохимическое полирование металлов в водных растворах нейтральных солей с вибрацией электрода / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2014. 120 с.
2. Румянцев Е. М., Давыдов А. Д. Технология электрохимической обработки металлов : учеб. пособие для техн. вузов. М. : Высш. шк., 1984. 159 с.
3. Кулаков Ю. М., Хрульков В. А. Отделочно-зачистная обработка деталей. М. : Машиностроение, 210 с.

4. Некоторые результаты экспериментального исследования процесса электроимпульсного полирования металлов / О. И. Авсеевич, А. С. Сергиенко и др. // Изв. вузов. Энергия. 1990. № 8. С. 57–60.

5. Попилов Л. Я. Основы электротехнологии и новые ее разновидности. Л. : Машиностроение, 1971. 214 с.

References

1. Nadaraia Ts. G., Babkina L. A., Shestakov I. Ya. Electrochemical polishing of metals in aqueous solutions of neutral salts with vibration of the electrode / Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2014. 120 p.
2. Rumyantsev E. M., Davydov A. D. Technology of electrochemical processing of metals : textbook for technicians. M. : Higher school of Economics, 1984, 159 p.
3. Kulakov Yu. M., Khrulkov V. A. Finishing and cleaning processing of parts. M. : Mechanical engineering, 210 p.
4. Some results of an experimental study of the process of electric pulse polishing of metals / O. I. Avseevich, A. S. Sergienko et al. // Izv.vuzov. Energy. 1990. № 8. P. 57–60.
5. Popilov L. Ya. Fundamentals of Electrotechnology and its new varieties. L. : Mashinostroenie, 1971. 214 p.

© Назаров С. В., Шестаков И. Я., 2020

УДК 669.713.7

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ В ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЯХ ТНА ЖРД

И. С. Неватус

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

Рассмотрена тема увеличения максимальных значений КПД насосов ТНА ЖРД. Особое внимание уделяется исследованию гидродинамических и тепловых процессов в полостях вращения турбоагрегатов, поскольку существующие методики расчета вращательных течений с теплоотдачей носят эмпирический характер и не всегда обеспечивают нужную точность определения гидродинамических и тепловых характеристик. Сформирован методологический подход к исследованию локальной теплоотдачи динамического потока и закономерностей потери энергии при течении жидкости в каналах насосных агрегатов. Представлено математическое выражение для интегрального соотношения уравнения энергии пространственного пограничного слоя.

Ключевые слова: пограничный слой, полости вращения турбоагрегатов, методика расчета вращательных течений.

SPECIFIC FEATURES OF DETERMINATION OF HYDRODYNAMIC AND THERMAL PARAMETERS IN THE FLOW SECTIONS OF THP LRE

I. S. Nevatus

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

This article discusses the topic of increasing the maximum values of efficiency of pumps THA LRD. Particular attention is paid to the study of hydrodynamic and thermal processes in the cavities of rotation of turbine units, since the existing methods for calculating rotational flows with heat transfer are empirical and do not always provide the required accuracy in determining the hydrodynamic and thermal characteristics. The article presents a methodological approach to the study of local heat transfer of a dynamic flow and patterns of energy loss during fluid flow in the channels of pumping units. The report presents a mathematical expression for the integral relation of the energy equation of the spatial boundary layer.

Keywords: boundary layer, cavities of rotation of turbine units, calculation method of rotational flows.

Стабильность энергетических параметров центробежных насосов турбонасосных агрегатов (ТНА) ракетных двигателей в условиях опытно-конструкторского и серийного производства обеспечивается комплексной системой оптимального проектирования гидравлического тракта, исследования и анализа конструктивно-технологических факторов, влияющих на отклонения параметров от номинальных значений, и адаптивного управления величинами отклонений на всех этапах жизненного цикла изделий. Оценка динамики стабильности энергетических параметров и гидродинамических характеристик насосов осуществляется по результатам модельных испытаний (в том числе огневых испытаний в составе двигателя) [1]. При этом ряд параметров непосредственно измеряют при испытаниях, другие определяют расчетными методами с использованием результатов косвенных измерений.

В связи с повышением энергонапряженности рабочих процессов в ТНА, стремлением к получению максимальных значений к.п.д. насосов важной научно-практической задачей становится изучение особенностей течения рабочего тела с теплообменом в каналах гидравлического тракта центробежных насосов [2]. Особое внимание уделяется исследованию гидродинамических и тепловых процессов в полостях вращения турбоагрегатов, поскольку существующие методики расчета вращательных течений с теплоотдачей носят эмпирический характер и не всегда обеспечивают нужную точность определения гидродинамических и тепловых характеристик.

При постановке данной задачи необходимо учитывать изменение температуры потока по длине рабочего канала, поскольку вязкость как функция температуры, в основном, определяет режим течения. Поэтому, рассматривая течение несжимаемой жидкости, необходимо провести совместное решение уравнений

изменений количества движения и сохранения энергии в граничных условиях пространственного пограничного слоя. Для сжимаемой жидкости известную систему уравнений следует дополнить уравнением фазового состояния вещества (рабочего тела).

С целью формирования методологического подхода к исследованию локальной теплоотдачи динамического потока и закономерностей потери энергии при течении жидкости в каналах насосных агрегатов в докладе представлено математическое выражение для интегрального соотношения уравнения энергии пространственного пограничного слоя [3].

В ходе теоретического анализа и решения задачи теплообмена потока жидкости и твердой поверхности закон теплообмена выражен через критерий Стантона [4].

Выполнены преобразования уравнения энергии для пространственного пограничного слоя, получены математические выражения характерных толщин пограничного слоя для турбулентных профилей и толщин потери энергии для прямолинейного и вращательного режимов течения.

Теоретические исследования сопровождались проведением модельных испытаний на экспериментальной установке. Проводилось определение параметров течения жидкости (воды) с теплоотдачей на характерных режимах, адекватно отражающих реальные режимы течения компонентов топлива.

Исследовались параметры равномерного прямолинейного течения в трубе, вращательного течения по закону «твердого тела», вращательного течения в торцевой щели по закону «свободного вихря».

По результатам аналитического расчета и эксперимента получены зависимости коэффициентов теплоотдачи от объемного расхода и температуры исследуемого рабочего тела. Расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышает 5 %.

В итоге теоретических и экспериментальных исследований разработана методика, алгоритмы и программы расчета течения рабочего тела с теплоотдачей в полостях вращения насосных агрегатов. Использование данной методики в приложении с программами расчета позволит оптимизировать некоторые проектные решения при создании турбонасосных агрегатов РД с высокими энергетическими характеристиками и стабильными гидродинамическими параметрами в условиях производства и эксплуатации изделий.

Библиографические ссылки

1. Повышение качества и стабильности параметров турбонасосных агрегатов ЖРД. «Технология машиностроения» /, М. В. Краев, В. П. Назаров, Н. А. Терехин, Е. М. Краева. М. : Машиностроение, 2002. № 4. С. 36–40.

2. Зуев А. А., Назаров В. П., Арнгольд А. А. Определение локального коэффициента теплоотдачи с использование модели температурного пограничного слоя в полостях вращения газовых турбин // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26, № 2. С. 99–115.

3. Зуев А. А., Павлыш А. А. Исследование течения с теплоотдачей в стенку в граничных условиях агрегатов подачи энергетических установок летательных аппаратов // Решетневские чтения : материалы Международ. науч.-практ. конф. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2014. Т. 1. С. 137–138.

4. Кишкин А. А., Зуев А. А., Леонов В. П. Локальная теплоотдача в граничных условиях турбомашин // Известия высших учебных заведений. М. : Машиностроение. 2015. № 1(658). С. 3–10.

References

1. Improving the quality and stability of the parameters of the turbopump units of liquid rocket engines / M. V. Kraev, V. P. Nazarov, N. A. Terehin, V. M. Kraev. M. : Mashinostroeniye, 2002. № 4. P. 36–40.

2. Zuev A. A., Nazarov V. P., Arngold A. A. [The local heat transfer coefficient using the model of the temperature boundary layer with the convective component in the cavities of rotation of the gas turbines] // Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta. 2019. Vol. 26, № 2. P. 99–115.

3. Zuev A. A., Pavlysh A. A. [Issledovaniye techeniya s teplootdachey v stenkuy v granichnykh usloviyakh agregatov podachi energeticheskikh ustanovok letatelnykh apparatov] // Reshetnevskiye chteniya : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. ; Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2014. Vol. 1. P. 137–138.

4. Kishkin A. A., Zuev A. A., Leonov V. P. [Local heat transfer in the boundary conditions of turbomachines] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. M. : Mashinostroyeniye, 2015. № (658). P. 3–10.



Секция

**«СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ,
КОСМИЧЕСКАЯ НАВИГАЦИЯ И СВЯЗЬ»**

СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОЛЕТА БАЛЛИСТИЧЕСКИХ РАКЕТ

А. В. Гельгорн*, Е. П. Олейников

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

Рассматриваются системы стабилизации полета баллистических ракет, состав, принцип работы.

Ключевые слова: баллистическая ракета, стабилизация, система управления, полет.

BALLISTIC MISSILE FLIGHT STABILIZATION SYSTEMS

A. V. Gelgorn*, E. P. Oleynikov

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

Systems for stabilizing the flight of ballistic missiles, their composition, and operating principle are considered.

Keywords: ballistic missile, stabilization, control system, flight.

Устойчивость полета управляемой баллистической ракеты также должна рассматриваться в рамках технического критерия. Управляемую баллистическую ракету необходимо снабдить прежде всего средствами, обеспечивающими предписанную ей ориентацию осей в пространстве. Устойчивость по отношению к угловым возмущениям обычно именуется угловой стабилизацией, или просто – стабилизацией, а обеспечивающая ее система устройств называется автоматом стабилизации [1].

Полет ракеты при неработающем двигателе подобен полету стрелы, а полет во время работы двигателя изменяется возникающими добавочными факторами. Для того, чтобы действительная траектория полета ракеты совпадала с математически рассчитанной, предусмотрены специальные системы управления и коррективы полета [2].

Функциональный элемент системы управления баллистической ракеты (БР), предназначенный для поддержания текущих параметров движения ракеты близкими к их программным значениям, задаваемым системой наведения ракеты, а также для обеспечения устойчивого полета ракеты на активном участке траектории (АУТ). Состоит из системы угловой стабилизации (СУС) и системы стабилизации движения центра масс (ССЦМ), применяемой на ракетах с жесткими временными программами управления.

СУС включает в свой состав три независимых канала стабилизации движения ракеты по углам тангажа, рыскания и крена. Каждый канал СУС функционирует как замкнутая система автоматического регулирования, целью управления в которой является ликвидация рассогласования между программным значением угла, задаваемым системой наведения, и его

измеренным значением, фиксируемым на выходе навигационной системы.

ССЦМ в общем случае включает в свой состав три независимых канала стабилизации движения и состоит из системы стабилизации движения по нормали к траектории полета (система нормальной стабилизации, НС), системы стабилизации движения в боковом направлении (система боковой стабилизации, БС) и системы стабилизации движения в продольном направлении по вектору скорости, получившей наименование системы регулирования кажущейся скорости (РКС).

Исполнительными элементами систем угловой стабилизации, НС и БС являются органы управления ракеты, при отклонении которых от нейтрального положения развиваются необходимые управляющие силы и моменты, изменяющие требуемым образом угловое движение ракеты, а также ее движение по нормали к траектории и в боковом направлении.

Исполнительным элементом системы РКС является двигательная установка ракеты, при изменении тяги которой обеспечивается требуемое изменение скорости полета. Применение системы РКС возможно только на ракетах с жидкостными ракетными двигателями (ЖРД), поскольку регулирование тяги ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ) сопряжено с большими техническими трудностями и на разгонных ступенях БР не применяется [3].

Библиографические ссылки

1. Федосьев В. И. Основы техники ракетного полета. М.: Наука. 1979. С. 364.
2. Оберт Г. Пути осуществления космических полетов. Глава X. Вопросы стабилизации. 1948.

3. Министерство обороны Российской Федерации. Энциклопедия / РВСН. «Система стабилизации движения ракеты» [Электронный ресурс]. URL: https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/detail_s_rvsn.htm?id=14264@morfDictionarypdf (дата обращения: 05.09.2020).

References

1. Fedoseev V. I. Basics of rocket flight techniques. М. : Science. 1979. p. 364.

2. Obert G. Ways to carry out space flights. Chapter X. Issues of stabilization. 1948.

3. Ministry of defense of the Russian Federation. Encyclopedia / RVSН. "The stabilization system of the rocket" [Electronic resource]. URL: https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/detail_s_rvsn.htm?id=14264@morfDictionarypdf (access: 05.09.20).

© Гельгорн А. В., Олейников Е. П., 2020

УДК 629.783

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СФЕРИЧЕСКОГО СКАНЕРА В СТЕНДЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ АНТЕНН ЗЕМНОЙ СТАНЦИИ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

А. Б. Гладышев, А. Ю. Колупаев, А. В. Жгун, М. Э. Буравлева

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: a-glonass@yandex.ru

Предложен вариант построения стенда для контроля и настройки параметров антенн земной станции спутниковой связи. Рассмотрены методы измерений направленных характеристик антенн. Разработана структурная схема стенда.

Ключевые слова: измерение характеристик антенн, земная станция связи, спутниковая связь.

USE OF A SPHERICAL SCANNER IN THE STAND FOR CONTROL AND SETTING OF ANTENNA PARAMETERS OF A SATELLITE EARTH STATION

A. Gladyshev, A. Kolupaev, A. Zhgun, M. Buravleva

Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: a-glonass@yandex.ru

A variant of constructing a stand for monitoring and adjusting the parameters of antennas of a satellite earth station is proposed. Methods for measuring directional characteristics of antennas are considered. The block diagram of the stand has been developed.

Keywords: antenna measurement, communication earth station, satellite connection.

На сегодняшний день для национальных интересов особую актуальность приобретает освоение Арктического региона.

Оптимальным решением для предоставления телекоммуникационных услуг на территории Арктики является развитие сети телекоммуникаций на базе спутниковых систем связи. В настоящее время Российская Федерация не имеет собственной полностью развёрнутой спутниковой системы, обеспечивающей бесперебойное обслуживание всей территории страны.

В связи с вышесказанным, крайне актуальной является задача разработки и создания земных станций перспективных систем спутниковой связи, имеющих характеристики, значительно превышающие мировые аналоги [1].

Характеристики таких станций во многом зависят от характеристик антенных систем, которые определяют энергетические характеристики канала связи.

Для измерения параметров разрабатываемой антенны необходимо иметь набор соответствующих измерительных приборов.

В данной работе предлагается вариант стенда для контроля и настройки параметров антенн земной станции спутниковой связи.

Методы измерений направленных характеристик антенн можно разбить на 2 группы – измерения в дальней и ближней зонах.

В виду громоздкости системы измерения характеристик антенн в дальней зоне предпочтение было отдано разработки стенда на основе методов измерения в ближней зоне.

Одним из альтернативных методов измерений в ближней зоне является спиральное сканирование на сферическом сканере [2]. Данный метод направлен на уменьшение времени измерений, при сохранении необходимой точности.

Типовой сферический сканер ближнего поля показан на рис. 1, а. Измерения на сферическом сканере заключается в одновременном измерении обеих поляризации с непрерывным постепенным движением обоих позиционеров. Таким образом, точки измерений образуют собой спираль, описанную вокруг измеряемой антенны (рис. 2, б).

Далее проводится расчет эквивалентных поверхностных токов с последующим пересчетом в ДН дальней зоны.

Структурная схема разрабатываемого стенда для контроля и настройки параметров антенн земной станции спутниковой связи на основе сферического сканера представлена на рис. 2.

Принцип действия стенда для контроля и настройки параметров антенн земной станции спутниковой связи основан на измерении амплитудно-фазового распределения (АФР) напряженности электромагнитного поля в ближней зоне антенны.

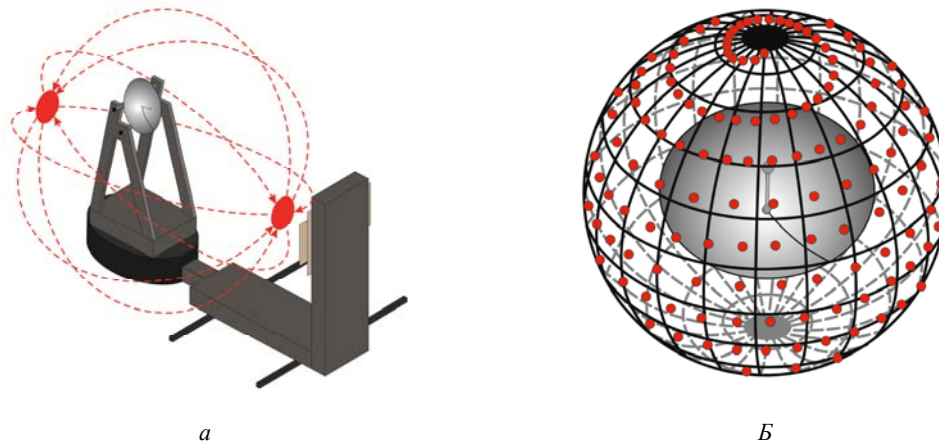


Рис. 1. Измерения на сферическом сканере:
 а – типовой сферический сканер; б – спиральное сканирование на сферическом сканере

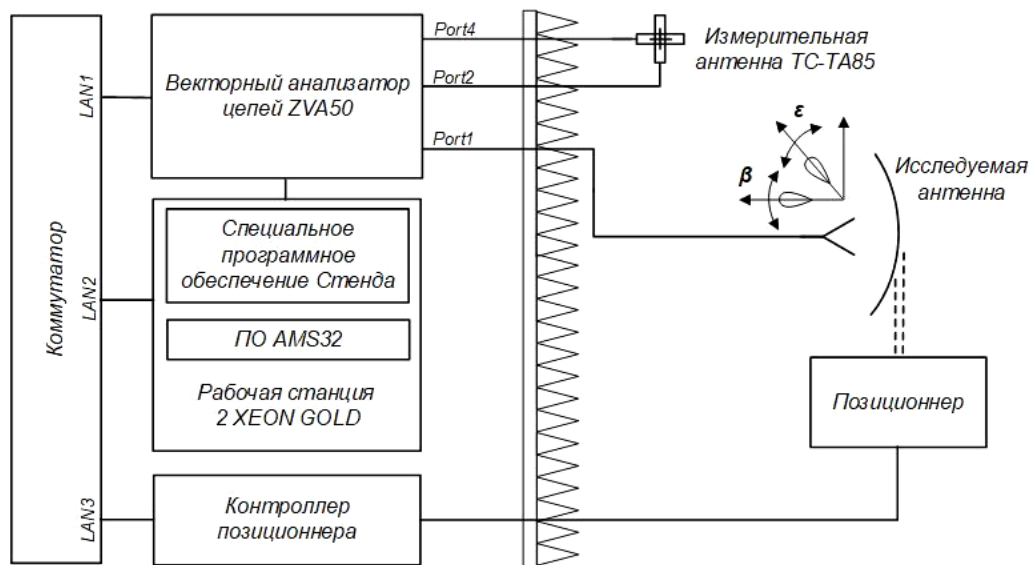


Рис. 2. Структурная схема стенда для контроля и настройки радиотехнических параметров земной станции спутниковой связи

Измерения АФР проводятся с помощью векторного анализатора цепей, один порт которого подключен к излучающей антенне, а второй порт – к приемной, при этом система является двунаправленной. В качестве одной из антенн используется пробник ближнего поля на основе двух поляризационной антенны Вивальди, в качестве второй – исследуемая антенна. Антенны закрепляются на позиционере, осуществляющем механическое перемещение антенн друг относительно друга таким образом, что точки выборки АФР располагаются на сферической поверхности. Управление перемещением позиционера и измерения на векторном анализаторе цепей проходят в автоматическом режиме и синхронизированы во времени.

Управление ведется с внешнего компьютера со специальным программным обеспечением (СПО). СПО собирает результаты измерения АФР в ближней зоне и с помощью математических алгоритмов проводит пересчет в полную трехмерную диаграмму антен-

ны в дальней зоне. По данной диаграмме определяются значение коэффициента усиления исследуемой антенны, для чего предварительно система калибруется с использованием набора рупорных антенн.

Достоинством стенда, построенного по изложенным принципам, будет являться меньшее время, необходимое на проведение измерений параметров исследуемых антенн.

Оценочное время измерений и преобразований в дальнее поле, для антенны с диаметром рефлектора 1,2 м, с помощью такого стенда будет составлять – 1 час, при этом в случае применения амплифазометрического метода время измерений будет составлять порядка 9 часов, при применении компактного полигона – около 2,5 часа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в ходе реализации комплексного проекта «Создание высокотехнологичного производ-

ства земных станций перспективных систем спутниковой связи для обеспечения связанности труднодоступных, северных и Арктических территорий Российской Федерации», осуществляемого при участии Сибирского федерального университета (соглашение № 075-11-2019-078 от 13.12.2019).

Библиографические ссылки

1. Software and hardware complex for the development and research of methods for broadband access to multimedia resources and the Internet / D. D. Dmitriev, A. B. Gladyshev, V. N. Ratuschnyak, O. B. Grithan // *Journal of Physics: Conference Series – 2nd International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies*. 2020. Vol. 1515, iss 3. Proceedings 032041.

2. Испытательная система для измерения характеристик беспроводной связи R&S TS8991 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rohde-schwarz.com/>

[ru/product/ts8991-productstartpage_63493-8444.html](https://www.rohde-schwarz.com/ru/product/ts8991-productstartpage_63493-8444.html) (дата обращения: 15.08.20).

References

1. Software and hardware complex for the development and research of methods for broadband access to multimedia resources and the Internet / D. D. Dmitriev, A. B. Gladyshev, V. N. Ratuschnyak, O. B. Grithan // *Journal of Physics: Conference Series – 2nd International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies*. 2020. Vol. 1515, iss 3. Proceedings 032041.

2 R&S®TS8991 OTA Performance Test System [Electronic resource]. URL: https://www.rohde-schwarz.com/ru/product/ts8991-productstartpage_63493-8444.html (access: 15.08.20).

© Гладышев А. Б., Колупаев А. Ю., Жгун А. В.,
Буравлева М. Э. 2020

УДК 662.629.05

ДИАГНОСТИКА КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ СПУТНИКОВ АО «ИСС»

Е. Н. Голубев

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

Рассматриваются вопросы диагностики компьютерных сетей космических аппаратов производства АО «ИСС» на примере бортового комплекса управления с использованием перспективного бортового компьютера и маршрутизатора сети SpaceWire.

Ключевые слова: бортовая цифровая вычислительная машина, система управления, верификация алгоритмов управления, обработка систем управления, методики испытаний.

DIAGNOSTICS OF ISS SATELLITE COMPUTER NETWORK

E. N. Golubev

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

This paper presents the diagnostics issue associated with computer networks of satellites being manufactured by JSC “ISS”. Onboard control subsystem with installed the next generation of on-board computer and the SpaceWire router is taken as an example to discuss such matter.

Keywords: on-board computer, control system, verification of control algorithms, tests of control systems, test methods.

Новое поколение космических аппаратов АО «ИСС», эксплуатация которых начинается в ближайшее время, спроектировано на базе бортового компьютера, являющегося ядром системы управления с более совершенными характеристиками по сравнению с предыдущими поколениями КА.

Перспективным направлением развития систем управления является построение на базе модульно-сетевой архитектуры с применением технологии распределенных и параллельных систем обработки данных SpaceWire [1].

АО «ИСС» практически реализовало построение сети SpaceWire в новых КА и провело экспериментальную отработку такой сети [3]. С целью обеспечения живучести системы используются, в частности, разработанные средства диагностики информационной сети и приборов, входящих в сеть (табл. 1).

Схема информационной сети SpaceWire показана на рисунке. Основой сети является сетевой коммутатор (СК), который обеспечивает маршрутизацию пакетов данных между приборами сети. В бортовом компьютере [2; 4] имеется свой маршрутизатор, через который организуется обмен данными по внутренней сети, не отличающийся от СК, кроме числа коммутируемых каналов.

Программно-аппаратные средства диагностики состояния КА были разработаны в АО «ИСС» в начале 1980-х годов с появлением первого универсального бортового компьютера и используются при эксплуа-

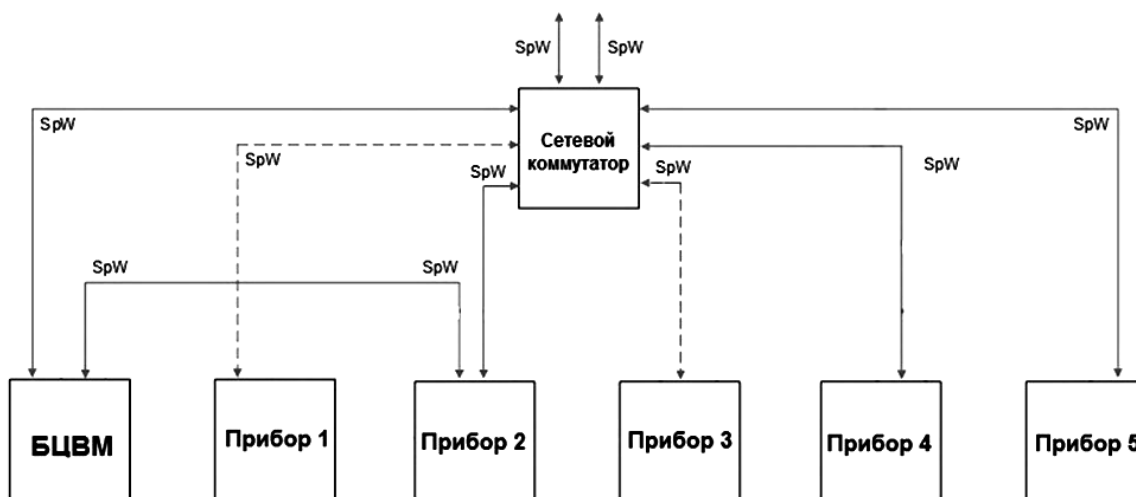
тации КА на протяжении более 30-лет. Отработанные принципы и методы диагностики КА и его систем положены в основу также и диагностики информационной сети КА.

Значительный опыт эксплуатации системы дежурного контроля и диагностики КА показал, что наиболее важным для проведения бортовой диагностики является формирование максимально полного отчета об аномальных событиях. Это позволяет идентифицировать причину аномалии по переданным с орбиты данным и принять меры для парирования возникшей аномалии в работе приборов и систем, а также накопить статистические данные в случае повторяющихся аномалий.

Второй важной составляющей использования средств диагностики является немедленное формирование аварийного сигнала, передаваемого в наземный комплекс управления (НКУ), с целью принятия мер для восстановления КА.

Структура программно-аппаратного комплекса диагностики состояния КА и его систем включает в себя два уровня средств.

На первом уровне составляется матрица допускового контроля аппаратных и программных параметров, которые будут опрашиваться периодически с небольшим интервалом менее секунды. Затем параметры собираются в группу с присвоенным номером, по состоянию этих параметров идентифицируется событие.



Структурная схема информационной сети SpaceWire

Таблица 1

Контроль данных в узлах и маршрутизаторах сети SpaceWire

Узел аппаратуры	Контролируемые данные
Бортовой компьютер	Сохранность настройки портов
	Сохранность таблицы маршрутизации бортового компьютера
Программируемый сетевой коммутатор	Сохранность настройки портов
	Сохранность таблицы маршрутизации программируемого сетевого коммутатора
Приборы системы управления, подключенные к сети	Сохранность эталона настройки портов

Таблица 2

Пример алгоритма диагностики нарушений обмена бортового компьютера с бортовой аппаратурой телесигнализации (БАТС).

Анализ данных и идентификация аномалии	Принятие решения
Устойчивая ситуация недостоверности пакетов при обмене с БАТС сопровождается формированием признаков ПО БКУ	Формируется признак запрета обмена по SpaceWire по маршруту 1 с БАТС и проводится обмен по 2-му маршруту
Если обмен с БАТС не состоялся, формируется обобщенный признак недостоверности SpaceWire -канала	При устойчивой ситуации недостоверности обмена по SpaceWire, организуется переключение комплектов БАТС

В случае катастрофичности события и невозможности ликвидации аномалии бортовыми средствами, производится выдача сигнала Вызов НКУ, отчетные данные с присвоенным номером (так называемый номер фразы диагностического контроля) немедленно передаются в НКУ по запросу с Земли.

Принципиальным моментом для анализа состояния космических приборов и систем является контроль сохранности оперативных данных в устройствах памяти, так как именно устройства памяти в основном подвержены воздействиям космических факторов.

Проверка сети SpaceWire проводится при обмене данными по сети в соответствии со стандартами SpaceWire [1].

При этом контролируется отсутствие сбоев при прохождении пакетов по основному маршруту, предусмотренному таблицей маршрутизации роутера (СК).

В случае устойчивого сбоя обмена данными, основной маршрут бракуется с формированием соответствующей отчетной информации.

Пример алгоритма диагностики нарушений обмена бортового компьютера с бортовой аппаратурой телесигнализации (БАТС) приведен в табл. 2.

В АО «ИСС» создан комплекс управления, использующий сеть SpaceWire в качестве высокоскоростного информационного канала, объединяющего приборы комплекса. Также отработано программное обеспечение, обеспечивающее поддержку компьютерной сети и диагностику отказов и сбоев информационного канала.

Полученные результаты позволяют провести летные испытания спроектированной системы управления и в дальнейшем перейти на новый этап проектирования систем управления КА со значительно улучшенными характеристиками.

Библиографические ссылки

1. ECSS Standart ECSS-E-50-12C. SpaceWire, Links, Nodes, Routers and Networks / European Cooperation for Data Standardization. July, 2008.
2. The SPARC Architecture Manual. Version 8 / SPARC International, Inc. 1992.
3. Голубев Е. Аппаратно-программный комплекс для отработки бортового компьютера с процессором LEON-2 и сетью SpaceWire // Решетневские чтения : материалы Междунар. науч.-практ. конф. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013.
4. Голубев Е., Зырянова К. Тестирование реконфигурируемого бортового компьютера с сетью SpaceWire // Решетневские чтения : материалы Междунар. науч.-практ. конф. ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2018.

References

1. ECSS Standart ECSS-E-50-12C. SpaceWire, Links, Nodes, Routers and Networks / European Cooperation for Data Standardization. July, 2008.
2. The SPARC Architecture Manual. Version 8 / SPARC International, Inc. 1992.
3. Golubev E. Apparato-programmny kompleks dlya otrabotki bortovogo kompyutera s protsessorom LEON2 i setyu SpaceWire. Reshetnevskie chtenia : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. ; Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2013.
4. Golubev E., Zyrianova K. Testirovanie rekonfiguriruемого bortovogo komputera s setyu SpaceWire. Reshetnevskie chtenia : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. ; Reshetnev University. Krasnoyarsk, 2018.

© Голубев Е. Н. 2020

УДК 621.317.08

РАДИОФОТОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ ЗАДЕРЖКИ

Н. И. Далбаева¹, Я. Г. Ибрагимова^{1*}, А. А. Ким^{1,2}, О. А. Терешенкова¹

¹Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова
Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1

²АО «Лазерные системы»
Российская Федерация, 198515, г. Санкт-Петербург, пос. Стрельна, ул. Связи, 28, корп. 2, стр. 1
E-mail: yaanaibragimova@gmail.com

Проблема верификации является актуальной для РЛС, установленных на территории космодромов, а также для РЛС космического базирования. В тезисах предложена концепция метода поверки; разработка блока волоконно-оптических линий задержки, блоков электрооптического и оптоэлектронного преобразования.

Ключевые слова: радиочастотный локатор, верификация параметров, калибровка, имитатор цели, радиочастотное зондирование.

VERIFICATION OF RADIO LOCATORS PARAMETERS USING MICROWAVE PHOTONIC SYSTEM WITH FIBER OPTICAL DELAY LINES

N. I. Dalbaeva¹, Ya. G. Ibragimova^{1*}, A. A. Kim^{1,2}, O. A. Tereshenkova¹

¹State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov,
1, 1-ya Krasnoarmeiskaya Str., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation

²Laser Systems JSC
28/2, Svyazi Str., bldg. 1, Strelna, Saint-Petersburg, 198515, Russian Federation
E-mail: yaanaibragimova@gmail.com

The verification problem is relevant for radars installed on the territory of cosmodromes, as well as for space-based radars. The theses offer the concept of the verification method; development of a block of fiber-optic delay lines, blocks of electro-optical and optoelectronic conversion.

Keywords: radio frequency locator, parameter verification, calibration, target simulator, radio frequency remote sensing, radar calibration.

Радиочастотные локационные системы (РЛС) являются наиболее распространенными техническими средствами, применяемыми для дистанционного зондирования атмосферы, а также для измерения метеорологических параметров атмосферы. Однако методы верификации эксплуатационных параметров, применяемые сегодня, как правило, достаточно сложны в реализации, требуют метрологического подтверждения собственных характеристик и не всегда обеспечивают необходимый уровень точности, что очень важно для радаров, используемых в РКП. В связи с этим расширение перечня методов и технических средств верификации параметров РЛС представляется весьма актуальной задачей.

Перспективным подходом для решения проблемы верификации радиолокаторов является применение элементов радиофотоники и оптоволоконных линий задержки. Этот метод сочетает в себе преимущества геодезических полигонов и имитаторов цели, однако в существенной степени лишен их недостатков, таких как ограниченная протяженность поверяемой дистанции и высокие требования точности к средствам поверки. Суть метода заключается в том, что временные интервалы, пропорциональные дальности до удаленных имитируемых объектов, создаются в оптоволоконных линиях задержки. Оптоволокно является ста-

бильной средой распространения, а его длину можно измерить с высокой точностью, что приводит к тому, что имитируемые эквиваленты атмосферных расстояний могут быть заданы даже с избыточной точностью. Другим неоспоримым преимуществом оптоволоконных линий является то, что они могут быть сконфигурированы практически любым образом, формируя имитации целых атмосферных трасс, содержащих множество объектов. Применение концепции имитационной оптоволоконной трассы впервые было предложено и успешно апробировано для верификации параметров оптических локаторов: дальномеров и метеорологических ЛИДАРОВ [1]. Применимость оптоволоконных линий в качестве средств метрологического обеспечения подтверждается существующей практикой сертификации их в качестве рабочих эталонов [2]. Концепция предлагаемого метода: излученный РЛС импульс переносится на оптическую несущую, после чего он поступает в имитационную оптоволоконную линию, на выходе из которой сигнал претерпевает обратное оптоэлектронное преобразование (ОЭП) с последующим переизлучением сигнала в апертуру РЛС [3]. Для осуществления переноса радиочастотного (РЧ) сигнала на оптическую несущую необходимо принять и отвести часть излучения РЛС рупорной или иной антенной, установленной вблизи РЛС.

Основными элементами компонентной базы блока ЭОП являются лазерный диод (ЛД) компании Emcore мощностью 80 мВт [4] (для наименьших затуханий в волокне целесообразно использовать ЛД с длиной волны 1535 нм) и электрооптический модулятор Маха-Цендера (ММЦ), который осуществляет модуляцию лазерного излучения. Для корректной работы ММЦ необходим контроллер рабочей точки. РЧ-сигнал поступает на ММЦ через радиочастотный драйвер, который осуществляет усиление импульса до необходимого значения.

Промодулированное СВЧ-сигналом оптическое излучение подается в волоконно-оптическую линию задержки (ВОЛЗ), содержащую линейные и ответвляющие элементы, после чего отводится на фотоприемный модуль. Для имитации атмосферной трассы, содержащей массив отражающих объектов, была выбрана петлевая циклическая конфигурация, ввиду энергетически и коммерчески удовлетворяющих характеристик. Монтаж производится стандартным одномодовым (ОМ) волокном Corning SMF-28e: 408,7 м – для контроля слепой зоны радара; 436 м – для разрешающей способности; 1362,2 м – для дискретных отсчетов удаленных объектов [5]. Использование ОМ волокна исключает возникновение дополнительных дисперсионных искажений (межмодовая дисперсия). Для компенсации хроматической дисперсии в цикл необходимо включить волокно с отрицательной дисперсией. В качестве ответвляющих элементов в линии задержки используются пассивные разветвители (сплиттеры) с различными коэффициентами деления. В различных конфигурациях подключения разветвителей можно добиться высоких энергетических характеристик.

Для обратного ОЭП требуется фотоприемный (ФП) модуль. Выход имитационной оптоволоконной линии подключается к РЧ-фотоприемнику, в котором происходит ОЭП, и выделенный СВЧ-сигнал после усиления направляется на контролируемый радар методом антенного переизлучения или подключения непосредственно к приемному СВЧ-тракту. За счет наилучших характеристик быстродействия для применения в СВЧ-технике предпочтение отдается PIN-фотодиодам (PIN-ФД). При выборе фотодетектора необходимо ориентироваться на высокий уровень NE. Для расчета был выбран ФП компании Alphas [6], уровень SNR при входной мощности 43 дБм ($4,8 \cdot 10^{-5}$ мВт) составляет 48 (16,8 дБ). Увеличение мощности сигнала после ФП осуществляется при помощи малошумящего усилителя (МШУ), управляемого с внешнего контроллера, выходная мощность составляет 4,8 мВт.

Все блоки выполнены в стандартных 19'' РЭК-корпусах, устанавливаемых в стойку. К блокам ЭОП и ОЭП подключаются при помощи коаксиальных кабелей разработанные приемная и передающая. Преимущества данного метода: не требуется транспортировка РЛС к месту испытаний; возможность имитации атмосферной трассы любой конфигурации и протяженности; высокая точность; возможность работы в полевых условиях; низкое влияние внешних фактор.

Библиографические ссылки

1. Пат. 2636797 РФ, МПК G01S 7/497, G01C 25/00. Способ контроля и поверки метеорологического лидарного оборудования типа облакомер и устройство для его осуществления / Ким А. А., Ключков Д. В. № 2017101645 ; заявл. 19.01.2017 ; опубл. 28.11.17, Бюл. № 34.
2. Свидетельство об аттестации рабочего эталона № 01 3.6БНЛ.0001.2017 от 18 апр. 2017, выданное ФГУП «ВНИИМ» им. Д. И. Менделеева.
3. Ильин М. Ю., Ключков Д. В., Ким А. А. Имитация атмосферной трассы для контроля эксплуатационных характеристик метеорологических зондирующих систем // Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды : материалы V Всерос. конф. СПб., 2018.
4. 1782 DWDM High Power CW Source Laser Technical specification: оф сайт. комп. Emcore [Электронный ресурс]. URL: <https://emcore.com/wp-content/uploads/2016/03/1782.pdf> (дата обращения 26.12.2019)
5. Corning: оф. сайт компании [Электронный ресурс]. URL: <https://www.corning.com/optical-communications/worldwide/en/home/products/fiber.html> (дата обращения: 29.11.2019)
6. Alphas: оф. сайт компании Alphas [Электронный ресурс]. URL: <https://www.alphas.com/products/laser-diagnostic-tools/ultrafast-photodetectors-upd-series.html> (дата обращения: 25.12.2019)

References

1. Kim A. A., Klochkov D. V. Spособ controlya I poverki meteorologicheskogo lidarnogo oborudovaniya tipa oblakomer I ustroistva ego osushestvleniya [Method of control and verification of meteorological lidar equipment such as ceilometer and device for its implementation]. Patent RF, № 2636797, 2017.
2. Certificate of attestation of the working standard No. 01 3.6BNL.0001.2017 18.04. 2017 FSUE VNIIM named after D. I. Mendeleev.
3. Il'in M. Yu., Klochkov D. V., Kim A. A. [Simulation of an atmospheric track for monitoring the operational characteristics of meteorological probing systems] // *Problemy voenno-prikladnoy geofiziki I kontrolya sostoyaniya prirodnoy sredy : materialy 5 Vveros. nauch. konf.* [Problems of applied military geophysics and monitoring of the state of the natural environment: materials of the V All-Russian scientific conf.]. SPb., 2018 (in Russ.).
4. 1782 DWDM High Power CW Source Laser [official website of the company] [Electronic resource]. URL: <https://emcore.com/wp-content/uploads/2016/03/1782.pdf> (access: 26.12.2019).
5. Corning [official website of the company] [Electronic resource]. URL: <https://www.corning.com/optical-communications/worldwide/en/home/products/fiber.html> (access: 29.11.2019).
6. Alphas [official website of the company] [Electronic resource]. URL: <https://www.alphas.com/products/laser-diagnostic-tools/ultrafast-photodetectors-upd-series.html> (access: 25.12.2019).

© Далбаева Н. И., Ибрагимова Я. Г., Ким А. А., Терешенкова О. А., 2020

УДК 681.2

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ УСТРОЙСТВА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА

П. Г. Егорова

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

Выполнена сборка устройства согласно разработанной схеме в программе Proteus. Создан скрипт для управления с помощью микроконтроллера в двух режимах: ручном и автоматическом. Созданы программы для проведения испытаний в автоматическом режиме.

Ключевые слова: микроконтроллер arduino, электропривод, автоматическое управление, ручное управление.

RESEARCH OF THE OPERATION OF THE DEVICE FOR CONTROL OF THE ELECTRIC DRIVE OF THE TEST BENCH

P. G. Egorova

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

The device was assembled according to the developed scheme in the Proteus program. A script has been created for controlling using a microcontroller in two modes: manual and automatic. Programs for testing in automatic mode were created.

Keywords: arduino microcontroller, electric drive, automatic control, manual control.

Проведение лабораторных практикумов для исследования различных бортовых измерительных приборов летательных аппаратов составляет неотъемлемую часть процесса обучения студентов. Для этих целей существует испытательный стенд, предназначенный для создания внешних угловых воздействий на бортовые измерительные приборы по углам курса, тангажа, крена. Предполагается автоматизировать стенд с помощью платы ArduinoMega 2560, которая программируется посредством среды разработки Arduino. Плата включает в себя микроконтроллер ATmega2560, который поставляется с записанным загрузчиком, облегчающим запись новых программ без использования внешних программаторов [1].

В процессе разработки схемы автоматизации испытательного стенда необходимо проверить ее работоспособность. Был создан электронный макет, позволяющий отрабатывать режимы работы реального стенда. Микроконтроллер ATmega2560 должен работать в двух режимах: ручное и автоматическое управление. Ручное управление подразумевает, что пользователь выставляет скорость и направление движения и может регулировать процесс в соответствии с задачей, а в автоматическом запускаются заранее прописанные алгоритмы работы привода.

Для эмулирования работы Arduino воспользуемся программой «ProteusDesignSuite». Это пакет программ для автоматизированного проектирования

электронных схем. Отличительной чертой пакета является возможность моделирования работы программируемых устройств: микроконтроллеров, микропроцессоров и т. д. [2].

Была разработана информационно-измерительная система устройства для управления стендом (рис. 1). Данная схема необходима для создания электрической схемы устройства.

В ходе работы необходимо собрать схему, состоящую из: источника питания, микроконтроллера, 2 драйверов L293D, 3 двигателей, кнопок для управления и переключения режимов.

С помощью библиотек подключаем необходимые нам элементы схемы (рис. 2).

Драйвер L293D предназначен для управления двунравленными приводами с токами до 600 мА и напряжениями от 4,5 В до 36 В [3]. L293D – является самой простой микросхемой для работы с двигателями. Драйвер обладает двумя H-мостами, которые позволяют управлять двумя двигателями [4]. Устройствами управления будут служить кнопки и потенциометры, значение уровня сопротивления которых можно задать в определенных пределах. Таким образом, мы можем менять параметры электрических схем, гибко подстраивая их под определенные условия [5]. С помощью потенциометров устанавливалось направление движения и скорость в ручном режиме управления.

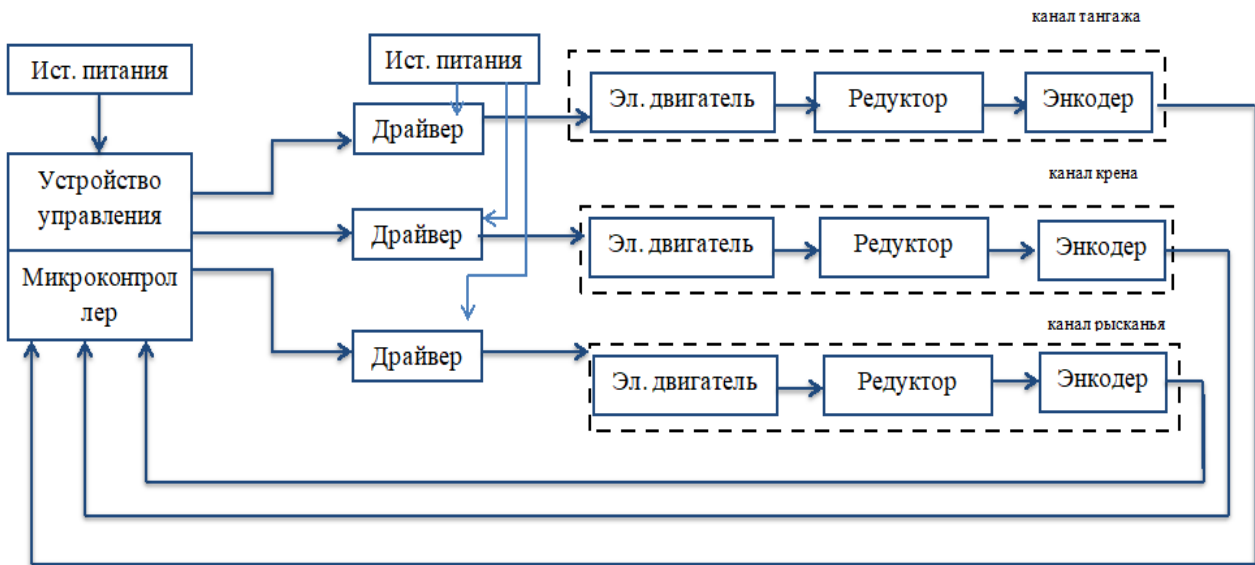


Рис. 1. Схема информационно-измерительной системы устройства для управления электроприводом

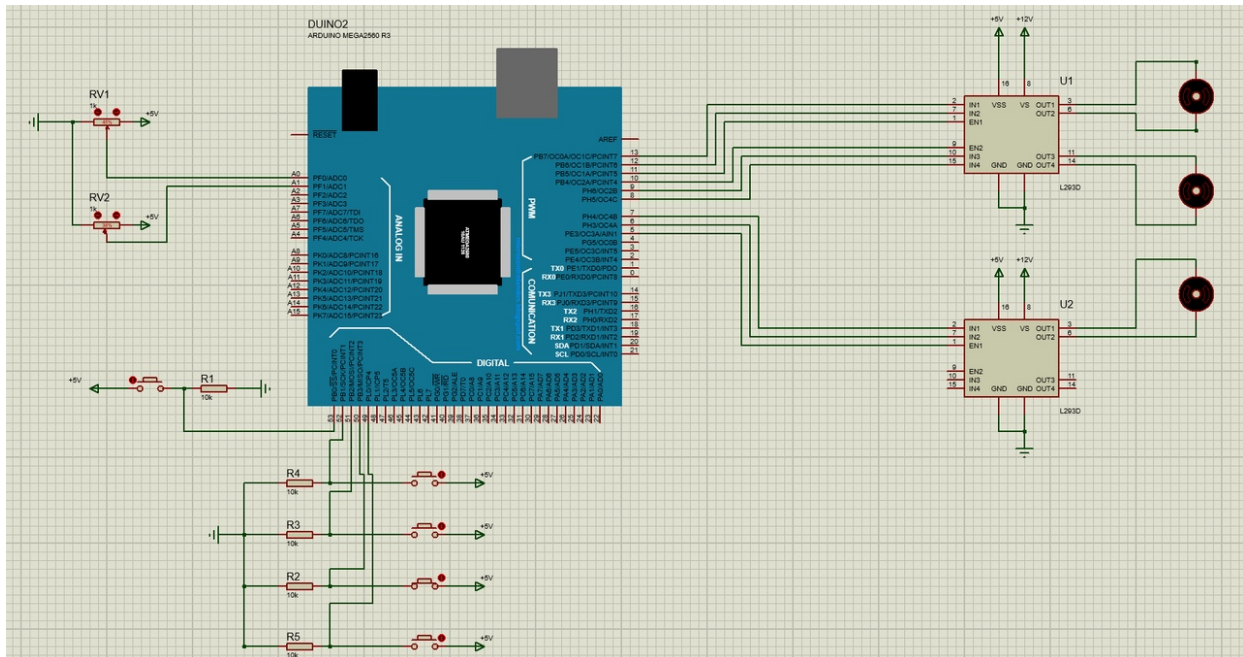


Рис. 2. Схема устройства в программе Proteus

В ручном управлении переключение между режимами предполагается с помощью трех кнопок, отвечающих за каналы «тангаж», «крен» и «рысканье» соответственно.

Пользователь должен выбрать один из режимов и повернуть потенциометры в необходимое положение. Один предназначен для изменения скорости поворота вала двигателя, а второй для установки необходимого направления. При выборе автоматического управления кнопки, отвечающие за каналы ручного управления, переключаются на режим выбора программы.

Был разработан скетч программы, состоящий из двух блоков. Каждый блок соответствует определен-

ному режиму управления. Также, были прописаны программы для тестирования в автоматическом управлении.

В результате выполненного исследования была подтверждена работоспособность автоматизированного испытательного стенда, автоматизация которого выполнена на основе платы Arduino, проверены и отработаны все запланированные алгоритмы работы стенда.

Разработанный электронный макет испытательного стенда будет использован в процессе настройки реального стенда, а также в случае необходимости расширения его функциональных возможностей.

Библиографические ссылки

1. ArduinoMega 2560 [Электронный ресурс]. URL: <http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardMega2560> (дата обращения: 05.09.2020).
2. Proteus (система автоматизированного проектирования) [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Proteus> (дата обращения: 05.09.2020).
3. Плата расширения L293D MotorDriverShield (для Arduino) [Электронный ресурс]. URL: <https://radioprogram.ru/shop/merch/42> дата обращения: 05.09.2020).
4. Драйверы двигателя L298N, L293D и ArduinoMotorShield [Электронный ресурс]. URL: <https://arduinomaster.ru/datchiki-arduino/drajver-dvigatelya-i-motor-shield-arduino> (дата обращения: 05.09.2020).
5. Подключение потенциометра к Ардуино [Электронный ресурс]. URL: <https://arduinomaster.ru/datchiki-arduino/potentsiometr-arduino/> (дата обращения: 05.09.2020).

References

1. Arduino Mega 2560 [Electronic resource]. URL: <http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardMega2560> (access: 05.09.2020).
2. Proteus (sistema avtomatizirovannogo proektirovaniya) [Electronic resource]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Proteus> (access: 05.09.2020).
3. Plata rasshireniya L293D Motor Driver Shield (dlya Arduino) [Electronic resource]. URL: <https://radioprogram.ru/shop/merch/42> (access: 05.09.2020).
4. Drayvery dvigatelya L298N, L293D i Arduino Motor Shield [Electronic resource]. URL: <https://arduinomaster.ru/datchiki-arduino/drajver-dvigatelya-i-motor-shield-arduino> (access: 05.09.2020).
5. Podklyuchenie potentsiometra k Arduino [Electronic resource]. URL: <https://arduinomaster.ru/datchiki-arduino/potentsiometr-arduino/> (access: 05.09.2020).

© Егорова П. Г., 2020

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАШИННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

А. С. Елпатов, Т. Г. Орешенко, С. В. Харлашина*

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

Сборочные единицы электрических машин и ракетно-космической техники, в частности, такие как статор, ротор и другие, нуждаются в проверке по размерам и электрическим параметрам прежде, чем поступить на общую сборку. Осуществить контроль можно с помощью различных методов.

Ключевые слова: электромашины, методы контроля, проверка, точность, регулировка.

METHODS FOR CONTROL OF PARAMETERS OF ELECTRICAL ELEMENTS OF CONTROL SYSTEMS

A. S. Elpatov, T. G. Oreshenko, S. V. Kharlashina *

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: *Kharlashina.v@mail.ru

Assembly units of electrical machines and rocket and space technology, in particular, such as the stator, rotor and others, need to be checked for dimensions and electrical parameters before entering the general assembly. Control can be carried out using various methods.

Keywords: electric machines, control methods, verification, accuracy, adjustment.

Обнаруженные отклонения размеров сборочных единиц определяют зазор ротора. Если зазор выходит за допустимый промежуток от 0,05 до 0,25 мм, то его необходимо компенсировать, а именно подобрать толщину шайбы, поставленную между щитом и подшипником [1]. Эта же процедура позволяет уменьшить потери на трение, если происходит усилие на втягивание ротора, причиной которому может послужить большое осевое смещение пакетов ротора.

Любая машина проходит через этап регулирования параметров, и чем слаженнее их мгновенное изменение, тем лучше, что наводит на мысль об улучшении коммутации. Что касается электромашин с коллекторами, то улучшению коммутации способствует установка щеток по электрической нейтралю. Процесс коммутации машины оценивается искрением, а также определяется ГОСТом 183–66 [2]. Но установка щеток – это конструктивный фактор, кроме него на улучшение коммутации влияют технологические факторы, а именно величина и равномерность давления щеток на коллектор, биение коллектора и другие.

В некоторых случаях требуется регулировка изделия с целью получения его характеристики, как элемента системы управления. Тогда, например, регулируют шунтирующее сопротивление обмотки усилителя.

В целом способы контроля по параметрам характеристики зависят от назначения и конструкции машины. Например, двигатель. Для него контроль за-

ключается в снятии зависимости числа оборотов от момента на валу якоря при номинальном напряжении и силе питающего тока. А что касается электромашинных усилителей, то программа их проверки и контроля заключается во всевозможных видах проверки двигателей и генераторов, которые можно осуществить с помощью специальных стендов [3]. Например, этап снятия внешней характеристики генератора. Он заключается в том, чтобы плавно уменьшать нагрузку до нуля и фиксировать напряжение на выходе после каждого падения нагрузки. Здесь требуется такое оборудование как вольтметры, амперметры и реостаты.

В следящих режимах сельсины работают в трансформаторном режиме как датчики измерения угла рассогласования или датчики положения [4]. Отсюда можно сделать вывод о параметрах, по которым их нужно проверять: величина тока холостого хода, коэффициент трансформации, точность отсчета угла рассогласования и другие.

Точность сельсина определяется как степень приближения изменения напряжения на фазах статора как функции угла поворота ротора к идеальной синусоидальной зависимости. Метод шести нулевых точек позволяет определить погрешности такой идеальной зависимости. Угол поворота ротора от одной точки до другой должен составлять 60 градусов, в противном случае мы имеем дело с неидеальным сельсином. Кроме этого, точность сельсинов зависит от электри-

ческой, магнитной и геометрической симметрии фаз статоров.

Методы контроля параметров электромашинных элементов систем управления также могут осуществляться с помощью использования аппаратуры проверки элементов на точность. Так, например, можно выделить метод последовательных поэлементных проверок, который состоит в том, что поиск неисправностей осуществляется с помощью проверки элементов системы по одному в определенном, заранее установленном порядке. В случае, если обнаружена неисправность, поиск прекращают и заменяют элемент, а затем проверяют работоспособность всей системы.

Следующий метод можно охарактеризовать как метод последовательных групповых проверок. Он заключается в следующем: систему делят на отдельные группы элементов, устройств, блоков и т. п. После этого измеряют один или несколько параметров, выделяя группу элементов, в которой есть неисправность. Далее эту группу последовательно разбивают на подгруппы и сужают область поиска до тех пор, пока не будет выявлен неисправный элемент.

Ещё один метод контроля – комбинированный метод. Его применяют для сложных систем. Он заключается в том, что при поиске неисправностей измеряют определенную совокупность параметров и по результатам делают заключение о неисправном элементе [5]. После контроля всей совокупности параметров анализируют состояние системы и принимают решение. Последовательность проверок значения не имеет.

Библиографические ссылки

1. Гаврилов А. Н., Лебедев И. А. Технология систем управления летательных аппаратов. М. : Машиностроение, 1971. 484 с.
2. Эксплуатация средств автоматизации [Электронный ресурс]. URL: <https://studref.com/663865/>

agropromyshlennost/ekspluatatsiya_sredstv_avtomatiki (дата обращения: 05.09.2020).

3. Контроль деталей. Технические данные измерительных машин [Электронный ресурс]. URL: <http://delta-grup.ru/bibliot/28/47.htm> (дата обращения: 05.09.2020).

4. Сельсины. Принцип действия и особенности [Электронный ресурс]. URL: <https://electrosam.ru/glavnaja/jelektrooborudovanie/ustrojstva/selsiny/> (дата обращения: 06.09.2020).

5. Элементы и устройства систем автоматического управления машин [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/4497848/> (дата обращения: 06.09.2020).

References

1. A. N. Gavrilo, I. A. Lebedev. Aircraft control systems technology. M.: "Mechanical engineering", 1971, 484 p.
2. Operation of automation equipment [Electronic resource]. URL: https://studref.com/663865/agropromyshlennost/ekspluatatsiya_sredstv_avtomatiki (access: 05.09.2020).
3. Parts control. Technical data of measuring machines [Electronic resource]. URL: <http://delta-grup.ru/bibliot/28/47.htm> (access: 05.09.2020).
4. Selsyns. The principle of operation and features [Electronic resource]. URL: <https://electrosam.ru/glavnaja/jelektrooborudovanie/ustrojstva/selsiny/> (access: 06.09.2020).
5. Elements and devices of automatic control systems of machines [Electronic resource]. URL: <https://studfile.net/preview/4497848/> (access: 06.09.2020).

© Елпатов А. С., Орешенко Т. Г.,
Харлашина С. В., 2020

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИОДА 1N4001 В СРЕДЕ SIMINTECH

А. С. Елпатов*, С. В. Харлашина, Т. Г. Орешенко

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

Космическая отрасль повсеместно использует различные электрические элементы, которые чаще всего моделируются перед применением на зарубежном софте. Однако процесс моделирования, например, диода, можно реализовать и в отечественной программе SimInTech.

Ключевые слова: SimInTech, моделирование, диод, вольт-амперная характеристика, импортозамещение.

1N4001 DIODE SIMULATION IN SIMINTECH

А. S. Elpatov*, S. V. Kharlashina, T. G. Oreshenko

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

The space industry uses various electrical elements everywhere, which are modeled before use, mainly on foreign software. This article describes the process of diode modeling in the domestic SimInTech program.

Keywords: SimInTech, modeling, diode, volt-ampere characteristic, import substitution.

На сегодняшний день одной из актуальных проблем является задача импортозамещения. Большинство предприятий использует зарубежный софт для моделирования различных электротехнических схем. Однако программное обеспечение *SimInTech* имеет достаточный набор инструментов для симуляции подобных задач. В качестве примера рассмотрим один из вариантов моделирования электрического элемента – диода 1n4001. Для того чтобы смоделировать диод, необходимо собрать электрическую схему. Пример схемы для моделирования представлена на рис. 1 [1].

В данной схеме используется синусоидальный источник напряжения с амплитудой 60 В, постоянная составляющая которого равна нулю, а также частотой 5000 Гц, фаза равна нулю, активное сопротивление

составляет 0.01 Ом. Вольтметр подключен параллельно диоду, амперметр – последовательно. Выводы значений с вольтметра и амперметра соединены с фазовым портретом для того, чтобы получить вольтамперную характеристику диода.

В соответствии с *Datasheet* диода [2] задаем его *SPICE* [3] параметры, как показано на рис. 2.

В результате расчета была получена вольтамперная характеристика, которую необходимо сравнить с графиком *Datasheet*, рис. 3.

Причиной несоответствия ВАХ является то, что при теоретических расчетах используют идеальные условия, в то время как при практическом испытании в процесс вмешивается ряд других явлений, которые не учитываются в программе [4].

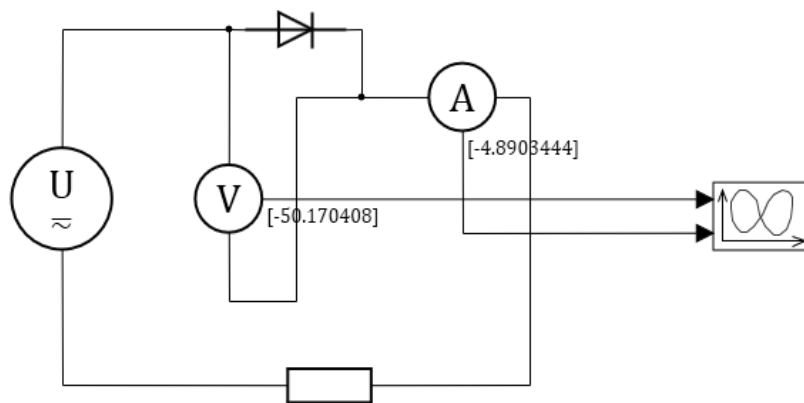


Рис. 1. Схема моделирования

Вид ВАХ	type_vax	1	экспоненциальная
Сопротивление утечки перехода, Ом	RL		1E9
Последовательное сопротивление, Ом	RS		0.015
Ток насыщения, А	IS		2E-8
Коэффициент эмиссии	N		2.06
Время переноса заряда, с	TT		4.32E-6
Барьерная ёмкость при нулевом смещении, Ф	CJO		1.5E-11
Контактная разность потенциалов, В	VJ		1
Коэффициент плавности перехода	M		0.333
Коэффициент нелинейности барьерной ёмкости	FC		0.5
Ширина запрещенной зоны, эВ	EG		1.11
Коэффициенты температурной зависимости EG...	TEG		[0.000473 , 636]
Температурный экспоненциальный коэффицие...	XTI		3
Температурный коэффициент последовательн...	TRS		[0]
Обратное напряжение пробоя, В	BV		50
Начальный ток пробоя, А	IBV		5E-6
Температурный коэффициент обратного напря...	TBV		[0]
Номинальная температура, °С	Tnom		25
Температура, °С	T		25
Дополнительные параметры			
Имя на схеме	sc_name		
Ток начала линейности ВАХ, А	Iexplim		13
DC режим	DCmod		<input checked="" type="checkbox"/> Да

Рис. 2. Параметры диода

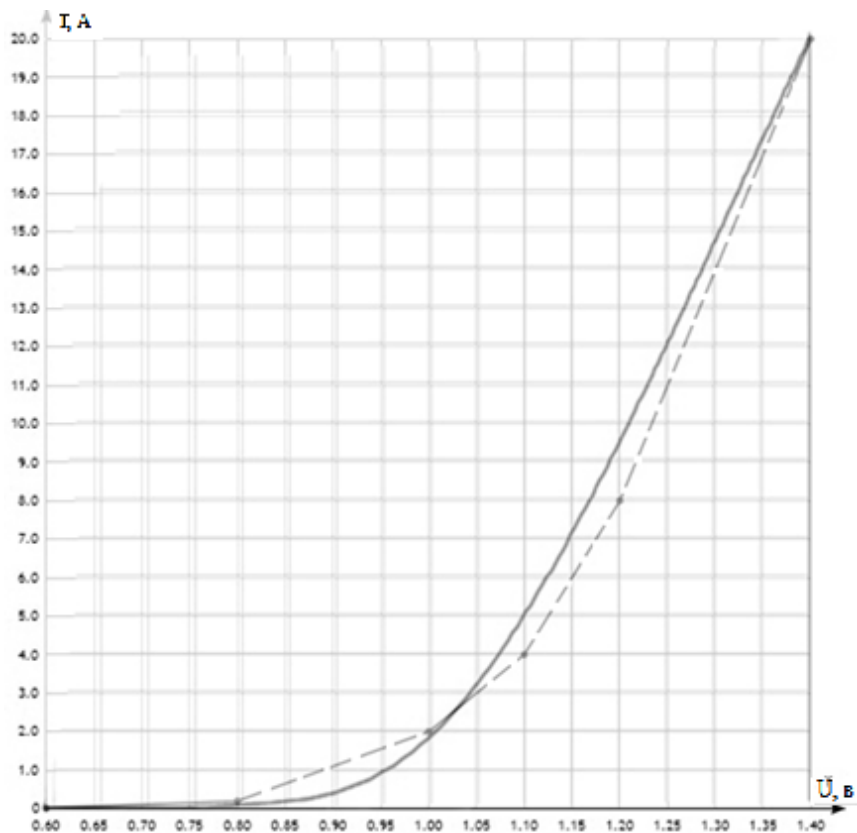


Рис. 3. Сравнение характеристик

С учетом выделенной особенности можно отметить, что *SimInTech* [5] является подходящей программой для данного рода задач, которые являются актуальными на сегодняшний день, когда происходит импортозамещение зарубежного персонального обеспечения. Моделирование диодов и электрических моделей в целом охватывает все области электроники, в том числе при проектировании схем космических аппаратов.

Библиографические ссылки

1. SimInTech Введение в работу с программным обеспечением [Электронный ресурс]. URL: https://help.simintech.ru/doc/SimInTech_Start_guide_Part_1.pdf (дата обращения: 05.09.2020).
2. Электротехнический портал [Электронный ресурс]. URL: <https://datasheet.su/> (дата обращения: 05.09.2020).
3. SPICE модели диодов [Электронный ресурс]. URL: <https://radioprogram.ru/post/210> (дата обращения 05.09.2020).

4. Справочная система SimInTech [Электронный ресурс]. URL: https://help.simintech.ru/#o_simintech/o_simintech.html (дата обращения 05.09.2020).

5. ООО «3В Сервис» [Электронный ресурс]. URL: <https://project797652.turbo.site/page363830> (дата обращения: 05.09.2020).

References

1. SimInTech Introduction to working with software [Electronic resource]. URL: https://help.simintech.ru/doc/SimInTech_Start_guide_Part_1.pdf (accessed: 05.09.2020).
2. Electrotechnical portal [Electronic resource] URL: <https://datasheet.su/> (accessed: 05.09.2020).
3. SPICE diode model [Electronic resource]. URL: <https://radioprogram.ru/post/210> (accessed: 05.09.2020).
4. Reference system SimInTech [Electronic resource]. URL: https://help.simintech.ru/#o_simintech/o_simintech.html (accessed: 05.09.2020).
5. ООО «3В Сервис» [Electronic resource]. URL: <https://project797652.turbo.site/page363830> (accessed: 05.09.2020).

© Елпатов А. С., Харлашина С. В.,
Орешенко Т. Г., 2020

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ ГТД НА БАЗЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРДД_{см}

С. А. Иерусалимов, Г. М. Макарьянц

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева
 Российская Федерация, 443014, г. Самара, Московское шоссе, 34
 E-mail: ierusalimov97@mail.ru

Представлена методика разработки регулятора динамической модели ГТД при помощи концепции ПИД – регулятора. Проведено исследование влияния величины коэффициентов регулятора на характер изменения выходных параметров двигателя.

Ключевые слова: динамическая модель, регулятор, фазо-частотная характеристика, цифровая система, электроавтоматика.

ANALYSIS OF PROBLEM OF CONTROL BASIC ON THE DYNAMIC MODEL OF GAS TURBINE ENGINE

S. A. Ierusalimov, G. M. Makaryants

Samara University
 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443014, Russian Federation
 E-mail: ierusalimov97@mail.ru

The paper presents a methodology for developing the dynamic model controller using the concept PID-controller. A study was made of the influence of the magnitude of the coefficients of controller the nature of the change in the output parameters of the engine.

Keywords: dynamic model, controller, phase-frequency characteristic, digital system, automatic control.

Повышение эффективности работы авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) связано с внедрением новых алгоритмов управления, реализация которых невозможна без использования новых интеллектуальных агрегатов и электронных цифровых систем автоматического управления (САУ) [1; 2]. Работа современных средств электроавтоматики базируется на применении бортовой математической модели объекта управления – газотурбинного. Однако остается открытым вопрос управления данной математической моделью и, соответственно, создания системы управления – регулятора, который и будет рассмотрен в данной статье.

Проектирование регулятора занимает до 75 % времени и усилий от общей разработки законов управления [7]. Это связано с тем, что регулятор должен полностью описывать весь диапазон рабочих режимов двигателя. Вообще, проектирование регулятора преследует две главные цели:

1) отслеживать и управлять изменением режимных параметров двигателя при переходе от одного режима к другому за максимально короткий промежуток времени;

2) предотвратить выход режимных параметров за границы рабочих диапазонов.

В работе представлены методы разработки регуляторов с той или иной степенью точности достигающие первой цели, а также представлены некоторые наработки по достижению второй цели [7]. При раз-

работке регулятора взята концепция PID-controller, схема которой представлена на рис. 1.

Основной проблемой является подбор оптимальных коэффициентов k_i , k_p , k_{pi} , k_d . В теории управления приводится доказательство того, что k_{pi} является универсальной величиной и равняется 0,707. K_i тогда однозначно определяется первым полюсом динамической системы режимного параметра следующей формулой

$$k_i = k_{pi} \cdot P_1;$$

K_d определяется формулой:

$$k_d = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{P_1^2 + C^2}},$$

где P_1 – первый полюс передаточной функции режимного параметра; $C = 0,0063^{-1} \approx 158$ – первый полюс передаточной функции топливной системы. Так как $P_1 \ll C$, то k_d не зависит от коэффициентов передаточной функции режимного параметра. Для нахождения последнего коэффициента k_p необходимо соблюсти два условия: частота, соответствующая -135 градусам на фазо-частотной характеристике (далее ФЧХ) должна совпадать с частотой, соответствующей нулевой амплитуде на амплитудно-частотной характеристике (далее АЧХ). Видно, что изменение коэффициентов передаточной функции режимного параметра приводит к изменению коэффициентов k_d

и k_i . Таким образом, возникает необходимость изменения коэффициентов регулятора в процессе перехода с режима на режим. Эта идея реализуется в программе MATLABSimulink с помощью модуля Look-UpTable, в котором на вход подается параметр, характеризующий соответствующий режим работы двигателя, а на выходе получаем необходимый для регулирования коэффициент регулятора. Структурная схема ПИД-регулятора с изменяющимися коэффициентами представлена на рис. 2.

При тестировании системы управления обнаружилось неприятное явление – при статическом максимальном режиме возникала неустойчивость работы регулятора, которая приводила к резким скачкам сигнала и «развалу» модели. Данную проблему удалось решить посредством внедрения так называемой схемы интегрального насыщения («integralsaturation»), которая представляет собой программный механизм предотвращающий подачу топлива выше, что предусмотрено рабочими ограничениями. При попытке сигнала выйти за пределы ограничений, схема интегрального насыщения подает команду на регулятор, в результате чего сигнал сглаживается. Сравнение тестовых сигналов представлено на рис. 3. Схемы двух концепций регуляторов представлены на рис. 2.

Из сравнения на рисунке 3 видно, что время выхода на максимальный режим повысилось с 0,2 до 5 секунд, однако мы сумели избежать заброса физической

частоты вращения ротора ВД, а также не дали выйти расходу топлива за пределы рабочего диапазона. Как следствие получена стабильная система управления двигателем, позволяющая проводить над ней дальнейшие доработки. В процессе проектирования были решены основные проблемы управления, такие как снижение величины заброса режимного параметра и расхода топлива при выходе на режим, обеспечение устойчивой работы регулятора на всем протяжении работы ГТД и минимизация времени выхода на максимальный режим.

При анализе полученных данных открывается перспектива разработки нового типа регулятора, который будет управлять большим количеством параметров. Для каждого из них будет применяться своя методика регулирования, что сделает рабочий процесс в ГТД более гибким и расширит зону допустимых рабочих режимов двигателя.

В частности планируется тщательная проработка следующих проблем: разработка САУ контролирующего забросы по температуре и физической частоте вращения роторов, САУ, способных адаптироваться к изменяющимся внешним условиям (температура, давление, влажность воздуха), а также контролировать запас устойчивой работы. Данные мероприятия позволят расширить диапазон допустимых режимов работы двигателя и увеличить его эффективность за счет плавного управления.

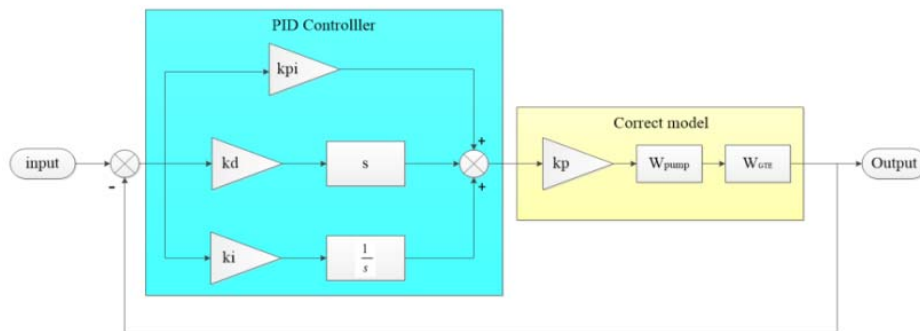


Рис. 1. Схема регулирования выходного параметра

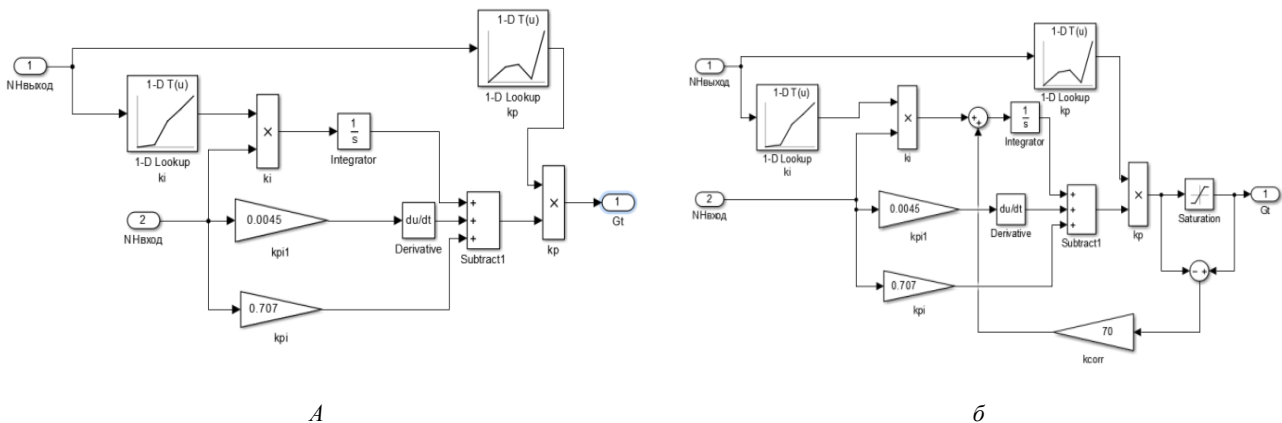
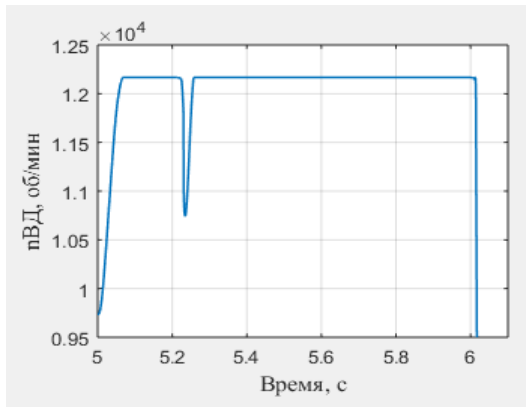
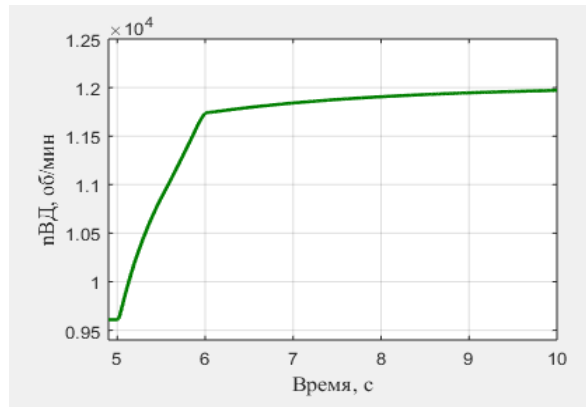


Рис. 2. ПИД – регулятор с изменяющимися коэффициентами (а); ПИД – регулятор с интегральным насыщением (б)



А



б

Рис. 3. Тестирование регулятора с изменяющимися коэффициентами (а); тестирование регулятора с интегральным насыщением (б)

Библиографические ссылки

1. Гуревич О. С. Управление авиационными газотурбинными двигателями : учеб. пособие. М. : Изд-во МАИ, 2001. 100 с.
2. Гольберг Ф. Д., Батенин А. В. Математические модели газотурбинных двигателей как объектов управления: учеб. пособие. М. : Изд-во МАИ, 1999. 80 с.
3. Костюков В. М., Капырин Н. И. Модель газотурбинного двигателя и его системы управления для особых значений углов атаки и метеорологических условий // Труды МАИ. 2011. № 49. 13 с.
4. Казанцев А. В. Метод идентификации динамических моделей авиационных ГТД на основе задач оптимизации с локальными критериями // Уфа, 2019. 18 с.
5. Моделирование неустойчивых режимов авиационных ГТД с учетом гистерезиса границы устойчивой работы компрессора [Электронный ресурс] / Ю. М. Ахметов, Д. А. Ахмедзянов, А. Б. Михайлова, А. Е. Михайлов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2014. Т. 18, № 2 (63). С. 3–9.
6. Применение бортовой математической модели для управления газотурбинным двигателем с дополнительной камерой сгорания [Электронный ресурс] / Ф. Д. Гольберг, О. С. Гуревич, С. А. Зуев, А. А. Петухов // Вестник Московского авиационного института, 2019. Т. 26, № 4. С. 90–97.
7. Jaw Link C., Lack D. Aircraft engine controls: design, system analysis and health monitoring // Mattingly. Restone, Va: Amer. inst. of aeronautics cop. 2009. 361 p.

References

1. Gurevich O. S. Management of aviation gas turbine engines : textbook. M. : MAI Publishing House, 2001. 100 p.
2. Golberg F. D, Batenin A. V. Mathematical models of gas turbine engines as control objects : textbook. M. : Publishing house of MAI, 1999. 80 p.
3. Kostyukov V. M., Kapyrin N. I. Model of a gas turbine engine and its control system for special values of angles of attack and meteorological conditions // Proceedings of the MAI, 2011. № 49. 13 p.
4. Kazantsev A. V. Method of identification of dynamic models of aviation gas turbine engines based on optimization problems with local criteria. Ufa, 2019. 18 p.
5. Modeling of unsteady modes of aviation GTE taking into account the hysteresis of the boundary of stable operation of the compressor [Electronic resource] / Yu. M. Akhmetov, D. A. Akhmedzyanov, A. B. Mikhailova, A. E. Mikhailov // Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University. 2014. T. 18. № 2 (63). P. 3–9.
6. Application of an onboard mathematical model to control a gas turbine engine with an additional combustion chamber [Electronic resource] / F. D. Golberg, O. S. Gurevich, S. A. Zuev, A. A. Petukhov // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2019. T. 26, № 4. P. 90–97.
7. Jaw Link C., Lack D. Aircraft engine controls: design, system analysis and health monitoring // Mattingly. Restone, Va: Amer. inst. of aeronautics cop. 2009. 361 p.

© Иерусалимов С. А., Макарянц Г. М., 2020

АСТРОНАВИГАЦИЯ

И. А. Пинаев¹, Е. П. Олейников

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

¹E-mail: pinaevia@gmail.com

Рассматривается космическое ориентирование, принцип действия и способы дальнейшего развития при освоении космоса.

Ключевые слова: навигация, GPS, космическая паутина, космический аппарат, Солнечная система, орбиты.

ASTRONAVIGATION

I. A. Pinaev¹, E. P. Oleynikov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

¹E-mail: pinaevia@gmail.com

Systems for stabilizing the flight of ballistic missiles, their composition, and operating principle are considered.

Keywords: ballistic missile, stabilization, control system, flight.

Навигация в космосе – непростая задача. Обычно для определения линейного (радиального) расстояния до космического аппарата используются радиосигналы, по времени прибытия которых наземные станции слежения рассчитывают искомую величину. С угловыми координатами сложнее.

Угловое разрешение радиоантенн весьма ограничено, поэтому погрешность определения координат возрастает примерно на 4 км при отдалении космического аппарата от Земли на очередную астрономическую единицу. Это значит, что координаты аппарата, находящегося в районе орбиты Плутона, мы будем знать с точностью плюс-минус 200 км, а для Voyager 1 разбег составляет уже 500 км.

Исследователи из Института Макса Планка (Германия) разработали систему автономной космической навигации, использующую сигналы пульсаров. Их метод позволит определять местоположение аппарата, находящегося в пределах Солнечной системы, с точностью до 5 км. Идея использования пульсаров для ориентирования в космосе не нова. Но ранее её практическая реализация была затруднена, во-первых, недостаточным количеством известных пульсаров, а во-вторых – сложными технологиями их обнаружения. Но за последние годы ситуация значительно изменилась.

Астрономам сегодня известно более 2 тысяч пульсаров, а радиообсерватории следующего поколения должны открыть еще больше.

Система межпланетной навигации основана на принципе, используемом GPS. Измеряя время прибытия импульсов, приходящих от по крайней мере трех различных пульсаров, и сравнивая их с расчетными значениями, можно определить пространственные

координаты приемника. Идентичность импульсов пульсаров создает множество возможных решений, но, ограничив их область относительно небольшим объемом вокруг предполагаемого местоположения аппарата, можно найти, то единственное, которое соответствует действительности.

Размеры, вес, расход энергии и стоимость системы во многом определяются длиной волны принимаемого сигнала. Так, чтобы ориентироваться по пульсарам, излучающим в области волн с длиной около 21 см, потребовалась бы антенна площадью 150 квадратных метров. Но есть идея и получше – использовать сигналы рентгеновских пульсаров. Показателем развития рентгеновских зеркал может служить их масса. Так, зеркало рентгеновской обсерватории Чандра, запущенной в 1999 году, имеет массу 18,5 тонн на каждый квадратный метр эффективной поверхности.

Современные материалы обеспечивают относительную массу 25 кг/м². Поэтому рентгеновские пульсары – перспективные ориентиры для систем межпланетной навигации, работающих с точностью ±5 км. Возможно, в большинстве запланированных на обозримое будущее миссий такая точность ни к чему, но с развитием космонавтики методика вполне может найти применение.

Библиографический список

1. Иванов Н. М., Лысенко Л. Н. Баллистика и навигация космических аппаратов : учебник для вузов. 3-е изд. перераб. и доп. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 523 с.
2. Оберт Г. Международный журнал современной физики. Глава X. Вопросы стабилизации. 1948.

3. Министерство обороны Российской Федерации. Энциклопедия/РВСН. «Система стабилизации движения ракеты» [Электронный ресурс]. URL: https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details_rvsn.htm?id=14264@morfDictionary pdf (дата обращения: 05.09.2020).

References

1. Ivanov N. M., Lysenko L. N. Ballistics and navigation of spacecraft: textbook for universities. 3rd ed. Rev.

and additional. M. : Bauman Moscow state technical University publishing house, 2016. 523 p.

2. Oberth G. International journal of modern physics. Chapter X. Issues of stabilization. 1948.

3. Ministry of defense of the Russian Federation. Encyclopedia/RVSN. "Rocket motion stabilization system" [Electronic resource]. URL: https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details_rvsn.htm?id=14264@morfDictionary pdf (accessed: 05.09.2020).

© Пинаев И. А., Олейников Е. П., 2020

УДК 629.783

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ ПОСТРОЕНИЯ ОРБИТАЛЬНЫХ ГРУППИРОВОК

К. Р. Плыкин¹, О. А. Чурсина¹, М. М. Валиханов¹, Ю. Б. Волошко²

¹Сибирский федеральный университет

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

²Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва

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

E-mail: kplykin@sfu-kras.ru

При повышенных требованиях точности определения координат потребителей ГНСС ГЛОНАСС может быть непригодна для использования. Одним из способов модернизации системы является изменение орбитальной группировки.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, орбитальная группировка, рабочая зона.

RESEARCHING WORK AREA OF THE GLONASS SYSTEM WITH DIFFERENT VARIANTS OF CONSTRUCTION ORBITAL GROUPS

K. Plykin¹, O. Chursina¹, M. Valikhanov¹, Y. B. Voloshko²

¹Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

²Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”

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

GNSS GLONASS with hanging requirements is not suitable for use. One of the ways to modernize the system is to change the orbital constellation.

Keywords: GLONASS, orbital constellation, work area.

Точность определения местоположения потребителей является основной характеристикой глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Именно данная характеристика и определяет рабочую зону системы. Одним из способов увеличения рабочей зоны является изменение орбитальной группировки (ОГ) путем увеличения плоскостей и/или количества космических аппаратов (КА).

Согласно [1] под рабочей зоной ГНСС понимается часть пространства высотой 2000 км от поверхности Земли, когда на определенном временном интервале времени обеспечиваются характеристики навигационного поля (НП), например, сигнала стандартной точности. Известны 3 характеристики НП: покрытия, доступности и точности. В данном исследовании будет использоваться характеристика покрытия, которая позволяет оценить потенциальную точность определения местоположения и не требует проведения реальных измерений (как, например, в характеристике НП точность). В характеристику НП покрытия входит два критерия – это минимальное количество (N_s) наблюдаемых КА и геометрический фактор по положению (P_{DOP}). Для исследования введем следующие ограничения: КА находится в зоне радиовидимости анализируемой точки, если его угол места (УМ) более 5° , а также высота точки анализа равна $H = 0$ м.

Целью работы является рассмотреть различные варианты построения ОГ для системы ГЛОНАСС и провести сравнительный анализ. К задачам исследования относятся:

1. Сформировать альманах для ОГ из 27 КА, которая имеет 3 плоскости с равно-распределённым количеством КА, а также рассчитать рабочую зону для данного типа ОГ (ОГ₁).

2. Сформировать альманахи для семейства ОГ с 30 КА, которые включают в себя следующие типы: ОГ с 3 плоскостями, на которых равномерно распределены по 10 КА (ОГ₂), ОГ с 6 плоскостями при условии, что на трех будет размещено по 7, а на трех дополнительных по 4 КА (ОГ₃), ОГ с 6 плоскостями при условии, что на трех будет размещено по 7, а на трех дополнительных по 3 КА (ОГ₄), ОГ с 6 плоскостями при условии, что на трех будет размещено по 8, а на трех дополнительных по 2 КА (ОГ₅).

3. Сформировать альманахи для семейства ОГ с 33 КА, которые включают в себя следующие типы: ОГ с 3 плоскостями, на которых равномерно распределены по 11 КА (ОГ₆), ОГ с 6 плоскостями при условии, что на трех будет размещено по 7, а на трех дополнительных по 5 КА (ОГ₇), ОГ с 6 плоскостями при условии, что на трех будет размещено по 7, а на трех дополнительных по 4 КА (ОГ₈), ОГ с 6 плоскостями

при условии, что на трех будет размещено по 8, а на трех дополнительных по 3 КА (ОГ₉).

4. Сформировать альманахи для семейства ОГ с 36 КА, которые включают в себя следующие типы: ОГ с 3 плоскостями, на которых равномерно распределены по 12 КА (ОГ₁₀), ОГ с 6 плоскостями, на которых размещено по 6 КА (ОГ₁₁), ОГ с 6 плоскостями при условии, что на трех будет размещено по 7, а на трех дополнительных по 5 КА (ОГ₁₂), ОГ с 6 плоскостями при условии, что на трех будет размещено по 8, а на трех дополнительных по 4 КА (ОГ₁₃).

Алгоритм исследования приведен на рисунке. Для исследования использовался действующий альманах системы ГЛОНАСС от 17.07.2018 [2] для 24 КА. Промежуток времени исследования составил 7,5 суток с шагом 15 минут, на котором количество временных интервалов $T = 720$. Анализируемые точки находятся на земной поверхности в виде сетки по широте и долготе с шагом в 1 градус. Общее число анализируемых точек на сетке составило $M = 181 \cdot 361 = 65341$. Блок 2 (см. рисунок) показан упрощенно и состоит из вложенных циклов перебора по широте,

долготе и КА. Расчет координат КА выполнялся по алгоритму [3]. Расчет P_{DOP} представлен в [4]. Значение рабочей зоны рассчитывается по формуле:

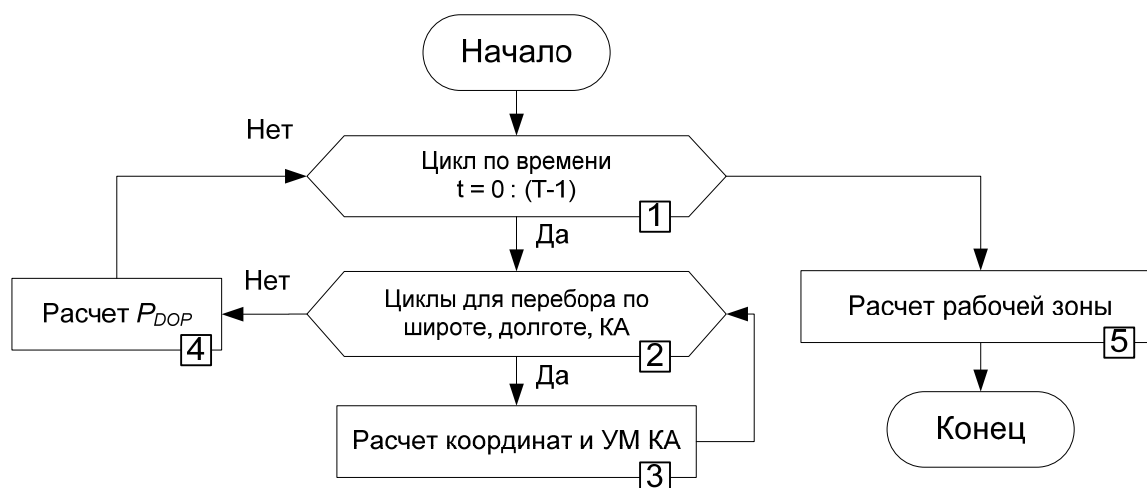
$$S = \frac{100\%}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \frac{K(t)}{M},$$

где K – количество анализируемых точек при заданном моменте времени t удовлетворяющих одновременно двум условиям, например, $N_s \geq 4$ и $P_{DOP} \leq 6$.

Требования к системе, условно, можно разделить на 2 критерия: «минимальные требования», при которых выдвигаются условия $N_s \geq 4$ и $P_{DOP} \leq 6$ и «повышенные требования», при которых выдвигаются другие условия $N_s \geq 9$ и $P_{DOP} \leq 2$.

В таблице в скобках указаны значения улучшения/ухудшения рассчитанной рабочей зоны по сравнению с действующей ОГ₀ ГЛОНАСС в составе 24 КА [5].

В статье [6] проводились подобные исследования только для ГНСС ГЛОНАСС, состоящей из 24 КА при различных построениях ОГ, исследуемые группировки не принесли положительных результатов.



Блок-схема расчета рабочей зоны системы

Требования рассчитанной рабочей зоны по сравнению с действующей ОГ

Состав ОГ	Тип ОГ	Рабочая зона, требования	
		минимальные	повышенные
24 КА	ОГ ₀	99,99	48,69
27 КА	ОГ ₁	100,00(+0,01)	67,87(+19,18)
30 КА	ОГ ₂	100,00(+0,01)	82,67(+33,98)
	ОГ ₃	99,95(-0,04)	81,08(+32,39)
	ОГ ₄	99,92(-0,07)	83,54(+34,85)
	ОГ ₅	100,00(+0,01)	83,53(+34,84)
33 КА	ОГ ₆	100,00(+0,01)	91,41(+42,72)
	ОГ ₇	100,00(+0,01)	89,10(+40,40)
	ОГ ₈	99,99(+0,00)	93,73(+45,04)
	ОГ ₉	100,00(+0,01)	93,27(+44,58)
36 КА	ОГ ₁₀	100,00(+0,01)	97,36(+48,67)
	ОГ ₁₁	100,00(+0,01)	94,89(+46,20)
	ОГ ₁₂	100,00(+0,01)	96,89(+48,19)
	ОГ ₁₃	100,00(+0,01)	97,89(+49,20)

В данном исследовании можно сделать следующий вывод: целесообразно использовать действующие плоскости и формировать три новые, на которые будут добавлены новые космические аппараты. При таком принципе модернизации добавляя до 4 КА на новые плоскости удалось достичь увеличения рабочей зоны на 49 процентов.

Библиографический список

1. ГОСТ 32454–2013 Глобальная навигационная спутниковая система. Параметры радионавигационного поля. Технические требования и методы испытаний. Общие положения: введен впервые; введ. 01.07.2014. М., 12 с.
2. Архив с точными эфемеридно-временными данными для КА ГЛОНАСС за 2018 год [Электронный ресурс]. URL: <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/ALMANAC/> (дата обращения: 12.05.2020).
3. ГЛОНАСС принципы построения и функционирования / Р. В. Бакитко [и др.] ; под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова ; 4-е изд., перераб. и доп. М. : Радиотехника, 2010. 800 с.
4. ИКД Общее описание системы с кодовым разделением сигналов, ред. 1.0. М., 133 с.
5. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС [Электронный ресурс]. URL: <https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/glonass> (дата обращения: 12.05.2020).
6. Плыкин К. Р., Чурсина О. А., Валиханов М. М. Исследование рабочей зоны системы ГЛОНАСС при различных вариантах построения орбитальных

группировок в составе 24 космических аппаратов // Приоритетные направления развития российской науки : V Всерос. науч.-практич. конф. 2020. С. 67–73.

References

1. GOST 32454–2013. Global Navigation Satellite System. Radio navigation field parameters. Technical requirements and test methods. General Provisions: introduced for the first time; entered 01.07.2014. M., 12 p.
2. Archive with accurate ephemeris-time data for GLONASS satellite for 2018 [Electronic resource]. URL: <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/ALMANAC/2018/> (access: 12.05.2020).
3. GLONASS principles of construction and functioning / R. B. Bakitko [et al.] ; under the ed/ of A. I. Perov, V. N. Kharisov ; 4th ed., Rev. and add. M. : Radiotekhnika, 2010. 800 p.
4. ICD General description of the code division signal system, ed. 1.0. M., 133 p.
5. Global navigation satellite system GLONASS [Electronic resource]. URL: <https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/glonass> (access: 12.05.2020).
6. Plykin K. R., Chursina O. A., Valikhanov M. M. Study of working area the GLONASS system with different variants of orbital groups for 24 spacecraft // Priority areas for the development of Russian science : V All-Russian Scientific and Practical Conference. 2020. P. 67–73.

© Плыкин К. Р., Чурсина О. А., Валиханов М. М., Волошко Ю. Б., 2020

УДК 517.977:629.783

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ С НЕЯВНОЙ ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛЬЮ ГРУППИРОВКОЙ МАЛЫХ СПУТНИКОВ*

А. М. Попов^{**}, И. Д. Костин^{*}, Д. Г. Кострыгин, Ю. В. Фадеева

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1
E-mail: ^{*}ilykos97@outlook.com, ^{**}9993868@mail.ru

Рассматривается задача адаптивного управления формацией спутников на круговой орбите Земли

Ключевые слова: адаптивное управление, неявная эталонная модель, группировка спутников, орбита Земли.

ADAPTIVE CONTROL WITH IMPLICIT REFERENCE MODEL OF SMALL SPACECRAFT FORMATION

A. M. Popov^{**}, I. D. Kostin^{*}, D. G. Kostrygin, U. V. Fadeeva

BSTU "VOENMEH" named after D.F. Ustinov
1, 1-ya Krasnoarmeyskaya St., St. Petersburg, 190005, Russian Federation
E-mail: ^{*}ilykos97@outlook.com, ^{**}9993868@mail.ru

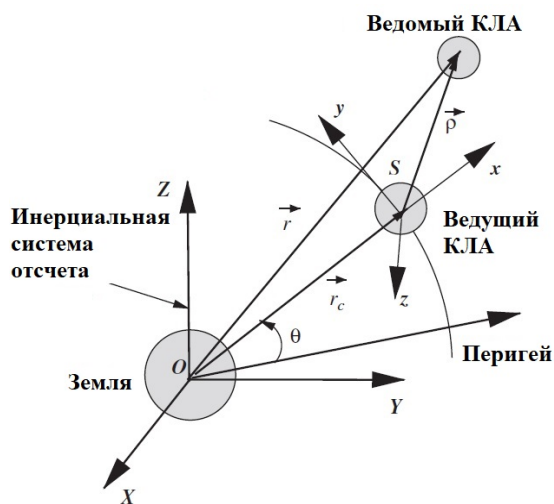
The task of adaptive control over satellite formation in the Earth's circular orbit is considered.

Keywords: Adaptive control, implicit reference model, spacecraft formation, Earth orbit.

Малые спутники, благодаря их небольшому размеру и модульности, позволяют осуществлять групповые полеты. Миссии с несколькими малыми спутниками могут обеспечить сопоставимую или большую функциональность полета, чем один спутник, но со значительно большей гибкостью (адаптивность, масштабируемость и ремонтпригодность) и надежностью (живучесть и отказоустойчивость). Для решения отдельных прикладных задач с помощью групповых полетов спутников необходимо управлять

их движением для достижения требуемой относительной конфигурации [1–3].

Задачи управления конфигурацией проще решать, если рассматривать попарное расположение спутников в группировке, выделяя в паре ведущий спутник, который следует по своей независимой траектории и ведомый, который отслеживает и корректирует свое взаимное положение относительно ведущего. На рисунке представлены системы координат позволяющие описать динамику относительного движения спутников.



Геометрия орбитального движения ведущего и ведомого спутников по [1]

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации («Создание опережающего научно-технического задела в области разработки передовых технологий малых газотурбинных, ракетных и комбинированных двигателей сверхлегких ракет-носителей, малых космических аппаратов и беспилотных воздушных судов, обеспечивающих приоритетные позиции российских компаний на формируемых глобальных рынках будущего» FZWF-2020-0015).

Для круговой орбиты ведущего спутника показано, что если выбрать в качестве управляемых выходов линейную комбинацию фазовых координат и их производных, то система остановится строго минимально-фазовой [4] относительно этих выходов. Это свойство позволяет применить алгоритмы управления с неявной эталонной моделью. Доказательство устойчивости этих алгоритмов для нелинейной нестационарной системы получено с использованием результатов работ [3; 5].

Адаптивный алгоритм управления обеспечивает свойство робастности системы управления, парируя и внешние возмущения, и возможные изменения параметров спутников.

Полученные алгоритмы управления были промоделированы в системе Matlab/Simulink для движений ведомых спутников по проекционным круговым орбитам, относительно ведущего спутника [1]. Результаты показали преимущество выбранного подхода, в сравнении с традиционными методами управления, основанными на линеаризации обратной связью и использованием ПД и ПИД регуляторов.

Библиографические ссылки

1. Alfriend K., Vadali S.R., Gurfil P., How J., Breger L. *Spacecraft Formation Flying: Dynamics, Control, and Navigation*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2010. 402 p.
2. Ulrich S. Nonlinear passivity-based adaptive control of spacecraft formation flying // *Proceedings of the American Control Conference*, art. 2016. № 7526846. P. 7432–7437.
3. Park H. E., Park S. Y., Choi K. H. Satellite formation reconfiguration and station keeping using state-

dependent Riccati equation technique. // *Aerospace science and Technology*. 2011. № 15(6). P. 440–452.

4. Андриевский Б. Р., Фрадков А. Л., Метод пассивации в задачах адаптивного управления, оценивания и синхронизации // *Автомат. и телемех.* 2006. № 11. P. 3–37.

5. Barkana Itzhak. Output feedback stabilizability and passivity in nonstationary and nonlinear systems // *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. 2010. № 24. P. 568–591.

References

1. Alfriend K., Vadali S.R., Gurfil P., How J., Breger L. *Spacecraft Formation Flying: Dynamics, Control, and Navigation*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2010. 402 p.
2. Ulrich S. Nonlinear passivity-based adaptive control of spacecraft formation flying // *Proceedings of the American Control Conference*, art. 2016. № 7526846. P. 7432–7437.
3. Park H. E., Park S. Y., Choi K. H. Satellite formation reconfiguration and station keeping using state-dependent Riccati equation technique. // *Aerospace science and Technology*. 2011. № 15(6). P. 440–452.
4. Andrievskii B. R., Fradkov A. L. [Method of passivation in adaptive control, estimation, and synchronization] // *Avtomat. i telemekh.* 2006. № 11. P. 3–37.
5. Barkana Itzhak. Output feedback stabilizability and passivity in nonstationary and nonlinear systems // *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. 2010. № 24. P. 568–591.

© Попов А. М., Костин И. Д.,
Кострыгин Д. Г., Фадеева Ю. В., 2020

УДК 621.3

СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ

А. В. Пучков, А. А. Дружинин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: puchok_95@mail.ru

Повышение степени интеграции и усложнение электронных устройств космической техники требует совершенствования методов тестирования бортовой аппаратуры. В данной работе проведен анализ существующих способов проверок, и предложен комплексный двухэтапный метод тестирования бортовой аппаратуры.

Ключевые слова: бортовая аппаратура, интегральные микросхемы, функциональное тестирование, периферийное сканирование, автоматизация.

THE SYSTEM OF COMPLEX TESTING OF THE ON-BOARD EQUIPMENT

A. V. Puchkov, A. A. Dryzhinin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: puchok_95@mail.ru

The increase in the degree of integration and the complication of electronic devices in space technics requires improved methods for testing onboard equipment. In this paper, we have carried out the analysis of existing testing methods, and have proposed the two-stage method for testing onboard equipment.

Keywords: on-board equipment, integrated circuits, functional testing, boundary scanning, automation.

На современном этапе развития, в эпоху цифровизации, происходит укрепление промышленных секторов, в частности, модернизируется оборонно-промышленный комплекс, связанный с разработкой и производством космических аппаратов (КА). Современная электронная бортовая аппаратура (БА), входящая в состав КА содержит в себе множество сверхбольших интегральных схем (СБИС) таких как микроконтроллеры или ПЛИС, имеющих высокую степень интеграции и удельные характеристики. Такие элементы реализуют управление и логику функционирования отдельного узла или всего прибора. Увеличение функциональной сложности и плотности монтажа современных печатных плат за счет миниатюризации электронных компонентов, требует совершенствования методов контроля качества их сборки. Вследствие быстро растущей сложности аппаратуры стандартная реализация известных методов тестирования электронных изделий сталкивается со значительным ростом временных и трудовых ресурсов для их подготовки и выполнения. Проблемы особенно актуальны при контроле сложных многослойных печатных плат с корпусами микросхем, не имеющих физического доступа к контактам. При контроле качества БА космического применения, накладываются более жесткие требования и ограничения, поэтому поиск новых подходов к методам тестирования является перспективной задачей.

В процессе разработки электронных изделий, более 40 % времени тратится на верификацию и проверки. С совершенствованием измерительных средств

и применяемых электрорадиоизделий (ЭРИ) стало широко внедряться автоматизированное тестовое оборудование, позволяющее чрезвычайно ускорить нахождение бракованных изделий и определение в них неисправностей. В настоящее время в промышленности распространены следующие виды автоматизированного тестирования радиоэлектронных устройств:

- внутрисхемное тестирование;
- функциональное тестирование;
- периферийное сканирование.

Технология внутрисхемного тестирования позволяет определить короткие замыкания или разрывы в сигнальных линиях на поверхности печатной платы, до подачи напряжения на все устройство. Спроектированное для конкретного типа устройств «ложе гвоздей» производит процесс диагностики с высокой скоростью, но не может быть использовано при переходе к другому типу изделий. Более приспособляемыми являются системы «летающих щупов», однако, в силу особенности данного подхода, осуществляют тестирование изделий со значительно меньшей производительностью [1].

Принцип граничного сканирования заключается в размещении по границам микросхем последовательного сдвигового регистра, ячейки которого находятся между краевыми разъемами электронного устройства и логическим ядром. После подачи на тестовый вход определенной двоичной последовательности, полученный на тестовом выходе результат сравнивается с эталонным.



Структурная схема функционального тестирования

Недостатками этого метода являются его непригодность для проверки аналоговых компонентов и невозможность проверки качества связей, что может существенно повлиять на работу высокоскоростных электронных устройств.

Функциональное тестирование, как следует из названия, правильности выполнения электронными изделиями целевой функции в соответствии с заложенной в них спецификации. Используя программную модель объекта контроля, можно предсказать поведение устройства с возможными неисправностями и проверить это предположение при помощи измерений на реальном устройстве. Применение технологии оправдывается максимальным покрытием проверяемых компонентов устройства и коротким временем тестирования [2].

Данный метод обладает такими недостатками как отсутствие универсальности, невозможность точной локализации неисправности и большие трудозатраты на разработку тестового программного обеспечения. При грамотной комбинации тестовых методов его можно унифицировать и упростить, а в каких-то случаях отказаться от него вообще

На первом этапе проводится функциональное тестирование электронного изделия, с целью уменьшить область поиска неисправностей (если таковые имеются) вплоть до функционального узла. На рисунке показана функциональная схема по проведению проверки методом функционального тестирования.

Для автоматизации и сокращения времени тестирования в систему введен генератор тестовых последовательностей в программной среде LabView [3]. На основе входных данных генератор через интерфейс передачи подает тестовые сигналы на тестируемый объект (электронное изделие). Реакция электронного изделия на тест снимается при помощи персонального компьютера и обрабатывается программным анализатором, который проводит сравнение полученных данных с эталонными значениями.

При обнаружении неисправностей на этапе функционального тестирования осуществляется локализация точного места дефекта на уровне элементов и контактных проводников печатной платы. Для обнаружения дефектов в аналоговых цепях используется Сигнатурный анализ, который является одним из видов внутрисхемного тестирования и основан на сравнении вольт-амперных характеристик цепей реального устройства и эталонного. Для цифровых цепей используется метод Периферийного сканирования, который регламентируется стандартом IEEE 1149.1

и предназначен для поиска коротких замыканий и обрывов на выводах цифровых микросхем [4].

Анализ существующих методов тестирования аппаратуры позволил выявить ряд их недостатков, которые все больше проявляются с ростом числа применяемых в аппаратуре ИМС и сложностью самой аппаратуры. В связи с этим предложена комплексная двухэтапная методика тестирования аппаратуры, которая позволила компенсировать недостатки одних методов путем внедрения других. Применение комплексной системы проверок позволит оптимизировать затраты на разработку и изготовление электронных изделий за счет автоматизации разработки тестов, сокращения времени изготовления и увеличения тестового покрытия.

Библиографические ссылки

1. Городецкий А. Снова о внутрисхемном тестировании ICT. Часть 1 // Компоненты и технологии, 2011. № 7. С. 58–59.
2. Бейзер Б. Тестирование чёрного ящика. Технологии функционального тестирования программного обеспечения и систем. СПб. : Питер, 2004. 320 с.
3. Создание виртуальных приборов и программирование устройств сбора данных NI myDAQ в среде LABVIEW : учеб. пособие / В. В. Монахов, О. В. Огинец, С. Н. Жоголь, М. Г. Яковлева. 2-е изд., перераб. и доп. СПб. : ЛЕМА, 2017. 131 с.
4. IEEE Std. 1149.1 – Standard Test Access Port and Boundary-Scan Architecture [Электронный ресурс]. URL: <http://grouper.ieee.org/groups/1149/1> (дата обращения: 20.08.2020).

References

1. Gorodeckij A. Snova o vnutriskhemnom testirovanii ICT. CHast' 1 // Komponenty i tekhnologii. 2011. № 7. P. 58–59.
2. Bejzer B. Testirovanie chornogo yashchika. Tekhnologii funkcional'nogo testirovaniya programmnogo obespecheniya i sistem. SPb. : Piter, 2004. 320 p.
3. Sozdanie virtual'nyh priborov i programmirovaniye ustrojstv sbora dannyh NI myDAQ v srede LABVIEW : uchebnoe posobie / V. V. Monahov, O. V. Oginec, S. N. Zhogol', M. G. Yakovleva. 2-e izd., pererab. i dop. SPb. : LEMA, 2017. 131p.
4. IEEE Std. 1149.1 – Standard Test Access Port and Boundary-Scan Architecture [Electronic resource]. URL: <http://grouper.ieee.org/groups/1149/1> (access: 20.08.2020).

УДК 629.7; 004.358

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ*

В. Г. Сидоров

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

Рассматриваются особенности и преимущества применения нейронных сетей перед традиционными системами управления объектами.

Ключевые слова: нейронная сеть, система управления, SimInTech.

SIMULATION OF A CONTROL SYSTEM USING NEURAL NETWORKS

V. G. Sidorov

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

The features and advantages of using neural networks over traditional object control systems are considered.

Keywords: neural network, control system, SimInTech.

Информационные технологии не стоят на месте, они постоянно развиваются. Одним из таких примеров могут служить искусственные нейронные сети (ИНС) [1]. В 2016 году технологии ИНС благодаря британской компанией Google DeepMind совершили прорыв в методах обучения и способах применения ИНС, что привлекло внимание ведущих ученых и специалистов в данной области. Многие технические университеты и коммерческие организации также не пропустили данный факт и поспешили направить свои ресурсы в данную область. Среди основных игроков рынка можно отметить такие компании как Google с её подразделениями Google DeepMind, и Google Brain, Microsoft с лабораторией Microsoft Research. Созданием нейронных сетей занимаются в IBM, Facebook (подразделение Facebook AI Research), Baidu (Baidu Institute of Deep Learning), Mail.Ru Group, «Яндекс» и другие [2].

Нейронные сети находят большое применение в науке и технике, они являются одним из лучших методов машинного обучения, который также является довольно простым в использовании по сравнению с традиционными методами. Нейронные сети способны выполнять следующие функции [3; 4]:

- управление динамическими объектами;
- прогнозирование;
- мониторинг различных процессов.

Параллельная обработка информации звеньями ИНС значительно ускоряет процесс обработки. Для ИНС характерна способность к обучению как по за-

ранее предоставленным данным, так и непосредственно в процессе работы. Нейронные сети обладают рядом особенностей и преимуществ перед традиционными системами управления, что позволяет применять их для моделирования и управления динамическими объектами [4; 5]:

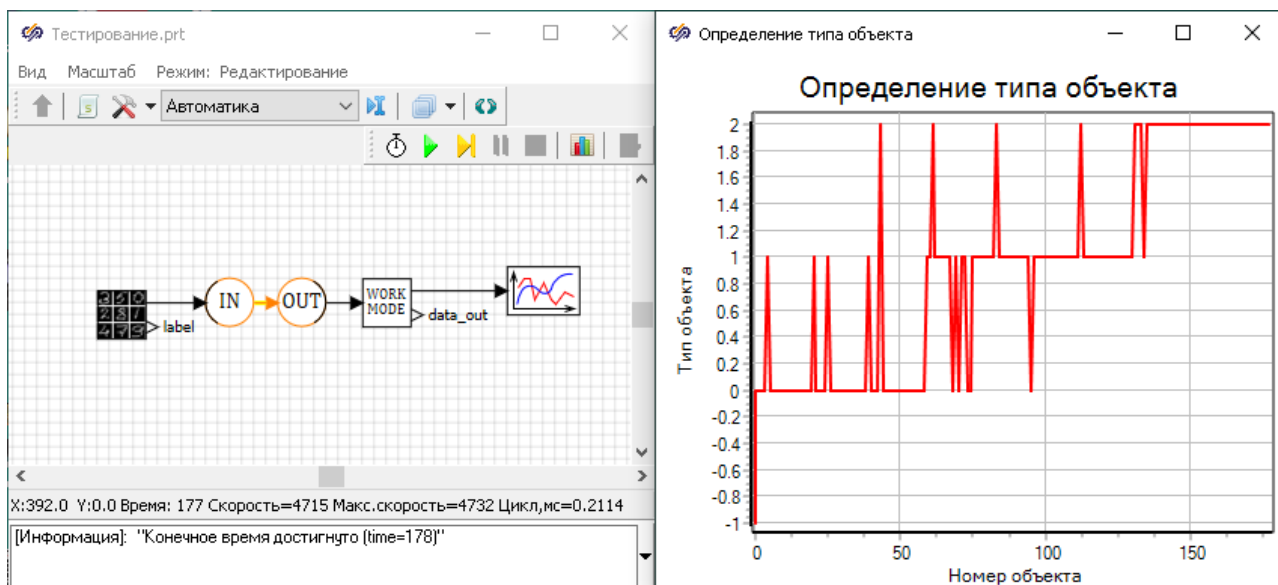
- применение функций активации нелинейного вида позволяет реализовать задачи с существенными нелинейностями;
- благодаря заложенной функции обучения и при наличии достаточного количества данных, ИНС позволяет избежать использования сложного математического аппарата;
- являясь самообучаемыми системами, ИНС может осуществлять управление в условиях существенных нелинейностей и неполных входных данных.

Из этого следует, что ИНС имеют большие перспективы в области управления сложными динамическими объектами. Применение ИНС позволяет не создавать точную математическую модель, а только модель управления, непосредственно по поставленным условиям.

Для моделирования работы систем управления и ИНС требуется соответствующее специализированное программное обеспечение. Одним из таковых является «Среда динамического моделирования технических систем SimInTech» [6].

На рисунке показан фрагмент работы ИНС при решении задачи кластеризации исследуемых объектов.

*Автор (материала) – победитель грантового конкурса Стипендиальной программы Владимира Потанина 2018/2019.



Тестирование ИНС

Библиографические ссылки

1. Цуриков А. Н. Моделирование и обучение искусственных нейронных сетей : учеб. пособие. Ростов н/Д. : РГУПС, 2019. 112 с.
2. Бум нейросетей: Кто делает нейронные сети, зачем они нужны и сколько денег могут приносить [Электронный ресурс]. URL: <https://vc.ru/future/16843-neural-networks> (дата обращения: 26.08.2020).
3. Богомолов Н. П., Гребенюк А. С., Сидоров В. Г. Применение нейронных сетей в радиолокации // Проблемы развития и интеграции науки, профессионального образования и права в третьем тысячелетии : материалы всеросс. науч. конф. с междунар. участием / КГАЦМиЗ. Красноярск, 2001. С. 439–444.
4. Богомолов Н. П., Сидоров В. Г. Нейронные сети в алгоритмах обработки траекторной информации // Информатизация и системы управления : Межвузовский сб. науч. тр. Красноярск, 2002. № 8. С. 135–139.
5. Мальцев Д. Б., Барабанова Е. А. Использование нейронных сетей для повышения эффективности управления станками с числовым программным управлением // Научный результат. Информационные технологии. 2016. Т. 1, № 3.
6. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech: практикум по моделированию систем автоматического регулирования : учеб. пособие / В. А. Карташов, Е. А. Шабаяев, О. С. Козлов, А. М. Щекатуров. М. : ДМК Пресс, 2017. 424 с.

References

1. Curikov A. N. Modelirovanie i obuchenie iskusstvennyh neyronnyh setej : uchebnoe posobie. Rostov n/D. : RGUPS, 2019. 112 p.
2. Bum nejrosetej: Kto delaet nejronnye seti, zachem oni nuzhny i skol'ko deneg mogut prinosit' [Elektronnyj resurs]. URL: <https://vc.ru/future/16843-neural-networks> (access: 26.08.2020).
3. Bogomolov N. P., Grebenyuk A. S., Sidorov V. G. Primenenie neyronnyh setej v radiolokacii // Problemy razvitiya i integracii nauki, professional'nogo obrazovaniya i prava v tret'em tisyacheletii : materialy vseross. nauchnoj konf. s mezhdunar. uchastiem / KGACMiZ. Krasnoyarsk, 2001. P. 439–444.
4. Bogomolov N. P., Sidorov V. G. Neyronnye seti v algoritmah obrabotki traektornoj informacii // Informatizaciya i sistemy upravleniya : Mezhvuzovskij sb. nauchnyh tr. Krasnoyarsk, 2002. № 8. P. 135–139.
5. Mal'cev D. B., Barabanova E. A. Ispol'zovanie neyronnyh setej dlya povysheniya effektivnosti upravleniya stankami s chislovyim programmnyim upravleniem // Nauchnyj rezul'tat. Informacionnye tekhnologii. 2016. T. 1, № 3.
6. Sreda dinamicheskogo modelirovaniya tekhnicheskix sistem SimInTech: Praktikum po modelirovaniyu sistem avtomaticheskogo regulirovaniya : uchebnoe posobie / V. A. Kartashov, E. A. SHabaev, O. S. Kozlov, A. M. Shchekaturov. M. : DMK Press, 2017. 424 p.



Секция

**«КОСМИЧЕСКОЕ И СПЕЦИАЛЬНОЕ
ЭЛЕКТРОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ»**

УДК 629.78.05

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛЁНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КА

А. С. Катков

ООО «ИТР»

Российская Федерация, 191028, г. Санкт-Петербург, Литейный просп., д. 22, помещение 10Н
E-mail: Katkov.Aleksey@intech-rus.com

Долгое время конденсаторы оставались слабым звеном почти любой электронной аппаратуры. Ситуация изменилась с появлением плёночных и полимерных конденсаторов, что позволило существенно увеличить надёжность электронных систем.

Ключевые слова: плёночный конденсатор, полиэтилентерефталат, надёжность, система электропитания КА.

FILM CAPACITORS APPLICATION TO ENSURE RELIABILITY OF THE SPACECRAFT POWER SUPPLY SYSTEM

Aleksey Katkov

ITR Ltd

22, Liteiny prospect, Saint-Petersburg, 191028, Russian Federation
E-mail: Katkov.Aleksey@intech-rus.com

For a long period of time, capacitors remained a weak link in almost any electronic equipment. The situation changed with the advent of film and polymer capacitors, which made it possible to significantly increase the reliability of spacecraft onboard systems.

Keywords: film capacitor, polyethylene terephthalate, reliability, spacecraft power supply system.

В мире не так много компаний, которые способны производить ЭКБ для применения в бортовой аппаратуре космических аппаратов с длительным САС. Компания Eххelia (Франция) уже более 50 лет занимается разработкой и производством широкого перечня пассивных компонентов для ответственных применений, в том числе для применения в составе бортовой аппаратуры космических аппаратов.

Производимая номенклатура включает в себя конденсаторы, с различными типами диэлектриков, точные изделия и помехоподавляющие фильтры. По мере развития технологий шло непрерывное освоение производства новых типов конденсаторов, применялись новые типы диэлектриков [1–6].

Выбор типа конденсатора при разработке различных бортовых систем космических аппаратов определяется спецификой применения. Например, высокоёмкостные керамические и плёночные конденсаторы (на основе полиэтилентерефталата) могут использоваться в системах электропитания космического аппарата. При этом применение любого из этих типов конденсаторов имеет свои преимущества и недостатки, которые будут рассмотрены в докладе.

Рассматриваемые компоненты были успешно применены во многих международных космических миссиях, самыми известными из которых являются IRIDIUM, GlobalStar, InSight, Bepi Colombo, Galileo, Eutelsat, ChangE-4. Это стало возможным благодаря

высокой надёжности изделий, которая обеспечивается проверенными за многие годы технологиями и циклом испытаний в соответствии с требованиями Европейского Космического Агентства.

В докладе будет представлен обзор технических решений, даны примеры их применения, а также будет дан краткий обзор развития новой технологии производства конденсаторов на основе органического диэлектрика.

Библиографические ссылки

1. Аникин А. С. Электропитание космических аппаратов / Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники. Томск, 2014. 177 с.
2. Система энергоснабжения космического аппарата [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0_%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%BE%D1%81%D0%BD%D0%B0%D0%B1%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F_%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%B0%D0%BF%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B0 (дата обращения: 12.05.2020).
3. Черная М. М. Исследование и разработка энергопреобразующей аппаратуры высоковольтных сис-

тем электропитания космических аппаратов. Томск 2017. 218 с.

4. Справочник химика [Электронный ресурс]. URL: <https://www.chem21.info/info/1264530/> (дата обращения: 12.05.2020).

5. Описание и марки полимеров [Электронный ресурс]. URL: <http://www.polymerbranch.com/catalogp/view/7.html&viewinfo=2> (дата обращения: 12.05.2020).

6. ESA published specifications [Электронный ресурс]. URL: <https://escies.org/specification/listpubspecs?pubcode=16&family=5> (дата обращения: 12.05.2020).

References

1. Anikin A. S. Power supply of a spacecrafts / Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Tomsk, 2014. 177 p.

2. Power supply system of the spacecraft [Electronic resource]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0_%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B

[3%D0%BE%D1%81%D0%BD%D0%B0%D0%B1%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F_%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%B0%D0%BF%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B0](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D1%81%D0%BD%D0%B0%D0%B1%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F_%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%B0%D0%BF%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B0) (access: 12.05.2020).

3. Chernaya M. M. Research and development of power-converting equipment for high-voltage power supply systems for spacecraft. Tomsk, 2017. 218 p.

4. Handbook of a chemist [Electronic resource]. URL: <https://www.chem21.info/info/1264530/> (access: 12.05.2020).

5. Description and grades of polymers [Electronic resource]. URL: <http://www.polymerbranch.com/catalogp/view/7.html&viewinfo=2> (access: 12.05.2020).

6. ESA published specifications [Electronic resource]. URL: <https://escies.org/specification/listpubspecs?pubcode=16&family=5> (access: 12.05.2020).

© Катков А. С., 2020

МЕТОДЫ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

С. И. Козлов

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

Рассматриваются методы рекуперации заряженных частиц. Анализируются принципы построения рекуператоров, а также возможность их применения в составе космического аппарата для получения энергии и защиты от воздействия космического пространства.

Ключевые слова: рекуперация энергии, космический аппарат, защита космического аппарата, холодная плазма, энергетика

METHODS OF ENERGY RECUPERATION OF CHARGED PARTICLES

S. I. Kozlov

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

Methods of charged particle recovery are considered. The principles of construction of recuperators are analyzed, as well as the possibility of their use as part of a spacecraft to generate energy and protect against the effects of outer space.

Keywords: energy recovery, spacecraft, spacecraft protection, cold plasma, power engineering

Заряженные частицы, обладают большой энергией, которая может воздействовать на космические аппараты и служить неплохим альтернативным источником энергии различных устройств [1]. Негативное воздействие подобных частиц на спутниковые аппараты в космическом пространстве требует поиска методов радиационной защиты [1].

Одним из решений данного вопроса является возможность использования различных рекуператоров энергии заряженных частиц.

Циклотронный рекуператор, основанный на поперечной модуляции электронного потока, имеет в своем составе следующие узлы: электронную пушку, внешнюю магнитную систему, резонатор, область преобразования и коллектор. Циклотронный преобразователь представляет устройство согласно рис. 1 и следующий принцип действия.

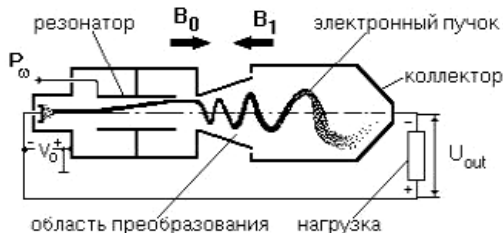


Рис. 1. Циклотронный преобразователь энергии

Электронный поток пушки пронизывает емкостной промежуток резонатора с поперечным высокочастотным электрическим полем, где электроны по-

лучают дополнительную кинетическую энергию в виде циклотронного движения пучка. В области преобразования вращение электронов преобразуется в поступательное движение. Далее электронный поток испытывает торможение, попадая в поле коллектора, где происходит рекуперация энергии электронного потока [2].

Далее рассмотрим способ рекуперации энергии, основанный на инжектировании заряженных частиц в вакуумированный объем с созданием в нем замкнутого контура с током, а также отборе их энергии.

Принцип действия данного рекуператора следующий. Инжектированный поток ускоренных заряженных частиц движется по замкнутому каналу. Стенки данного канала способны получать заряд того же знака, что и движущиеся частицы. Передача энергии заряженных частиц происходит путем индуктирования ЭДС в многовитковой катушке, связанной с вышеуказанным замкнутым каналом [3]. Схематичное устройство данного рекуператора представлено на рис. 2.

Следующим рассматриваемым преобразователем энергии является рекуператор энергии положительно и отрицательно заряженных частиц, включающий в свой состав конический канал, конденсаторы ионисторного типа, супрессор, кольцевой многоколлекторный электрод с игольчатой поверхностью.

Функционирует данный рекуператор следующим образом. Поток заряженных частиц поступает в конический канал, в котором преобразуется его скорость, за счет придания ему направленного движения в супрессор.

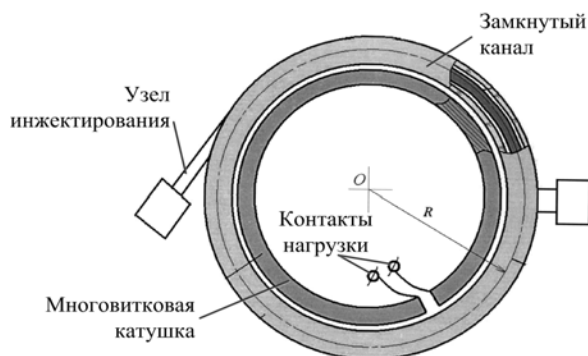


Рис. 2. Рекуператор инжектированного потока заряженных частиц

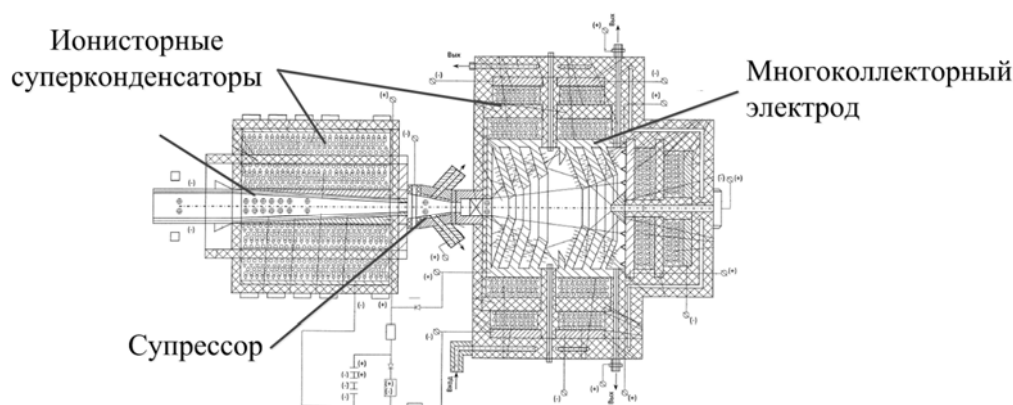


Рис. 3. Многоколлекторный дисковый рекуператор

В супрессоре происходит разделение противоположно заряженных частиц, а затем подача ионов одноименного заряда в многоколлекторный дисковый рекуператор. В рекуператоре происходит обмен энергией между заряженными частицами и наномодифицированными углеродными электродами ионисторных суперконденсаторов [4]. Техническое устройство данного рекуператора представлено на рис. 3.

Рассмотрев представленные рекуператоры, можно сделать вывод, что наиболее подходящим для применения на космическом аппарате подходит третий вариант рекуператора, который отличается малым весом и эффективностью рекуперации энергии заряженных частиц.

Библиографические ссылки

1. Новиков Л. С. Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты. М. : Университетская книга, 2009. 104 с.
2. Пространственный заряд и рекуперация энергии в циклотронном преобразователе / В. Л. Саввин, Г. М. Казарян, А. В. Коннов и др. // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 11.
3. Пат. 2508595, Российская Федерация, МПК Н 02 М 11/00. Способ преобразования и аккумуляции энергии с использованием пучка заряженных частиц и устройство для его осуществления / Кумахов М. А. № 2012132135/07 ; заявл. 27.07.2012 ; опубл. 27.02.2014, Бюл. № 6. 24 с.

4. Пат. 2700583, Российская Федерация, МПК Н 01 J 25/00. Способ создания многоступенчатой рекуперации энергии заряженных частиц и устройство для его реализации / Трифанов И. В. № 2018136007 ; заявл. 11.10.2018 ; опубл. 18.09.2019, Бюл. № 26. 16 с.

References

1. Novikov L. S. *Vozdeystviye tverdykh chastits yestestvennogo i iskusstvennogo proiskhozhdeniya na kosmicheskiye apparaty*. [Impact of solid particles of natural and artificial origin on spacecraft]. M. : University book, 2009. 104 p.
2. *Prostranstvennyy zaryad i rekuperatsiya energii v tsiklotronnom preobrazovatele* [Space charge and energy recovery in a cyclotron Converter] / V. L. Savvin, G. M. Kazaryan, A. V. Konnov et al. // Journal of radioelectronics. 2011. № 11.
3. Patent RF, no. 2508595/ *Sposob preobrazovaniya i akumulirovaniya energii s ispol'zovaniyem puchka zaryazhennykh chastits i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* [A method for converting and accumulating energy using a charged particle beam and a device for its implementation] / Kumakhov M. A. 2014.
4. Patent RF, no. 2700583, *Sposob sozdaniya mnogostupenchatoy rekuperatsii energii zaryazhennykh chastits i ustroystvo dlya yego realizatsii* [A method for creating a multistage energy recovery of charged particles and a device for its implementation] / Trifanov I. V. 2018.

УДК 629.7.05.03

АНАЛИЗ СБОЕУСТОЙЧИВОСТИ РЕАЛИЗАЦИЙ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ НА БОРТУ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Е. С. Лепёшкина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: klepka1111.93@mail.ru

Рассматривается проблема стойкости реализаций криптографических систем космических аппаратов к ионизирующему излучению. Рассмотрены возможные способы оценки сбоеустойчивости аппаратных реализаций на основе СФ-блоков. В отношении программной реализации рассматривается оценка сбоеустойчивости программных криптосистем, память которых защищается помехоустойчивыми кодами SEC-DED и SEC-DED-DAEC с помощью ранее разработанного метода инъектирования сбоев в память микропроцессорных систем типа «система на кристалле», имеющих внутрикристальный аппаратный отладчик.

Ключевые слова: программная реализация, аппаратная реализация, сбоеустойчивость, криптографические системы, космический аппарат, ионизирующее излучение, сложно-функциональный блок.

THE FAULT TOLERANCE ANALYSIS OF CRYPTOGRAPHIC ALGORITHM IMPLEMENTATIONS THE ONBOARD OF SPACECRAFTS

E. S. Lepeshkina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: klepka1111.93@mail.ru

The article deals with the problem of fault tolerance of the cryptographic implementations a spacecraft to ionizing radiation. Possible estimation methods the fault tolerance of hardware implementations based on IP-cores are considered. In terms of software implementation, an assessment of the fault tolerance of software cryptosystems is considered. In this case the memory is protected by noise-immune SEC-DED and SEC-DED-DAEC codes using the developed method of fault injection into the memory of system-on-chip systems with an on-chip hardware debugger.

Keywords: software implementation, hardware implementation, fault tolerance, cryptographic systems, spacecraft, ionizing radiation, IP-core.

Связь между космическими аппаратами (КА) и наземными станциями управления осуществляется по радиоканалу, который с точки зрения информационной безопасности потенциально уязвим к ряду атак. Сюда можно отнести, например, перехват и подмену сообщений. Следовательно, для предотвращения утечки данных, циркулирующих между КА и наземной станцией, появляется необходимость в шифровании.

Несмотря на криптостойкость шифров, программные и аппаратные реализации алгоритмов демонстрируют уязвимости для атак по побочным каналам [1]. Среди этих атак особое место занимают аппаратные сбои электронной аппаратуры, вызванные ионизирующим излучением космического пространства. Подобные сбои и отказы программного обеспечения могут происходить, например, во время криптографических вычислений. В этом случае может возникнуть как «ошибочное» шифрование, так и остановка работы всей криптосистемы при худшем сценарии [2; 3]. Отсюда следует необходимость в проведении дополнительных тестов криптографической системы в со-

ставе бортовой аппаратуры КА на устойчивость к сбоям ионизирующего излучения.

Процессоры криптографических систем могут быть реализованы как программно (с помощью микропроцессорной системы), так и аппаратно (в виде специализированного сложно-функционального (СФ) блока). Поэтому работа велась сразу по этим двум направлениям.

В отношении аппаратной реализации было рассмотрено использование сбоеустойчивых СФ-блоков. Было реализовано несколько методик внесения сбоев для оценки сбоеустойчивости аппаратных СФ-блоков. Некоторые идеи, такие как управляемое внесение сбоев в триггерные элементы, из которых состоят все остальные узлы криптографического СФ-блока, на поведенческом уровне, оказались не имеющими практического смысла, так как сложны в реализации с помощью современных средств разработки при масштабировании данного подхода на весь СФ-блок. Интересной идеей является вариант самодиагностики системы, где каждый узел, составляющий СФ-блок, по некоторым тестовым заготовкам определяет кор-

ректность своего функционирования. Для этого внедряется тестовый агент, самостоятельно решающий задачу диагностики. Однако реализация данного подхода также требует серьезного изменения процесса проектирования СФ-блоков с помощью современных средств их разработки.

В отношении программной реализации планируется с помощью ранее разработанного метода инъектирования сбоев в память микропроцессорных систем типа «система на кристалле», имеющих внутрикристалльный аппаратный отладчик [4], провести сравнительные исследования сбоеустойчивости программных криптосистем, память которых защищается помехоустойчивыми кодами SEC-DED и SEC-DED-DAEC. Последний класс кодов отчасти решает проблему исправления множественных ошибок в кодовом слове, вероятность появления которых повышается с развитием микроэлектронных технологий (уменьшением нормы проектирования интегральных схем). Применение данных SEC-DED-DAEC-кодов в программных криптопроцессорах позволит повысить их сбоеустойчивость к мультибитовым боям. Другим их достоинством является малая избыточность, что позволяет им использоваться в регистровых структурах и элементах памяти криптопроцессоров на базе аппаратных СФ-блоков [5].

Ожидается, что это позволит выявить характер отказов программных криптографических систем при имитации сбоев различного характера, оценить эффективность корректирующих кодов различных типов и дать практические рекомендации для сбоеустойчивой реализации программных криптопроцессоров.

Библиографические ссылки

1. Ordas S., Guillaume-Sage L., Maurine Ph. EM Injection: Fault Model and Locality // Proc. IEEE FDTTC. 2015.
2. Fault injection attacks on cryptographic devices: theory, practice, and countermeasures / A. Barenghi, L. Breveglieri, I. Koren, D. Naccache // Proceedings of the IEEE. 2012. Vol. 100, iss. 11. P. 3056–3076.

3. Electromagnetic Transient Faults Injection on a Hardware and a Software Implementations of AES / A. Dehbaoui, J.-M. Dutertre, B. Robisson, A. Tria // Workshop on Fault Diagnosis and Tolerance in Cryptography. 2012. P. 7–15.

4. Чекмарев С.А. Метод инъектирования сбоев для тестирования сбоеустойчивых микропроцессоров типа система на кристалле : дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 : защищена 25.12.15. Красноярск, 2015. 135 с.

5. Kustov N. D., Lepeshkina E. S., Khanov V. K. Efficiency Estimation of Single Error Correction, Double Error Detection and Double-Adjacent-Error Correction Codes // Applied Informatics and Cybernetics in Intelligent Systems. CSOC. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol 1226. P. 518–525.

References

1. Ordas S., Guillaume-Sage L., Maurine Ph. EM Injection: Fault Model and Locality // Proc. IEEE FDTTC. 2015.
2. Fault injection attacks on cryptographic devices: theory, practice, and countermeasures / A. Barenghi, L. Breveglieri, I. Koren, D. Naccache // Proceedings of the IEEE. 2012. Vol. 100, iss. 11. P. 3056–3076.
3. Electromagnetic Transient Faults Injection on a Hardware and a Software Implementations of AES / A. Dehbaoui, J.-M. Dutertre, B. Robisson, A. Tria // Workshop on Fault Diagnosis and Tolerance in Cryptography. 2012. P. 7–15.
4. Chekmarev S. A. *Metod inyektirovaniya sboyev dlya testirovaniya sboyeustoychivyykh mikroprotsektorov tipa sistema na kristalle* [dis. kand. t. nauk: 05.13.05: zashchishchena 25.12.15]. Krasnoyarsk, 2015. P. 135.
5. Kustov N. D., Lepeshkina E. S., Khanov V. K. Efficiency Estimation of Single Error Correction, Double Error Detection and Double-Adjacent-Error Correction Codes // Applied Informatics and Cybernetics in Intelligent Systems. CSOC. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol 1226. P. 518–525.



Секция

**«ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА
КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ»**

УДК 539.3

ОБЗОР МЕТОДОВ ПОИСКА ЛАТЕНТНЫХ ДЕФЕКТОВ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ*

А. В. Азин¹, С. В. Пономарев¹, С. В. Рикконен¹, Н. Н. Марицкий¹, С. Б. Сунцов²

¹Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики
Томского государственного университета

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

²Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: antonazin@niipmm.tsu.ru

Рассматривается проблема выявления латентных дефектов печатных плат радиоэлектронного оборудования космических аппаратов. Актуальность вызвана технологическим несовершенством испытаний. Рассматриваются существующие методы неразрушающего контроля для тестирования печатных плат.

Ключевые слова: латентный дефект, метод неразрушающего контроля, печатная плата, космический аппарат, надежность.

REVIEW OF METHODS FOR SEARCHING LATENT DEFECTS OF PRINTED CIRCUIT BOARD

A. V. Azin¹, S. V. Ponomarev¹, S. V. Rikkonen¹, N. N. Maritsky¹, S. B. Suntsov²

¹Research institute of Applied Mathematics and Mechanics Tomsk State University
36, Lenina prospekt, Tomsk, 634050, Russian Federation

²Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
E-mail: antonazin@niipmm.tsu.ru

The problem of searching for latent defects of printed circuit boards of spacecraft radio-electronic equipment is considered. The relevance is caused by the technological imperfection of the tests. The article discusses existing non-destructive testing methods for testing printed circuit boards.

Keywords: latent defect, printed circuit board, non-destructive testing method, printed circuit board, spacecraft, reliability.

Длительность и надежность эксплуатации радиоэлектронного оборудования напрямую зависит от его технических характеристик, качества материалов и прочности оборудования, а также устойчивости к внешним воздействиям среды.

Наиболее общей тенденцией в развитии радиоэлектронной техники является сочетание все большей интеграции выполняемых ею функций с все большей ее микроминиатюризацией. Следствием этого является резкое усложнение конструкций современной печатной платы (ПП) и технологических процессов ее изготовления. Так, технология изготовления современных микросхем и печатных плат практически не допускает корректировки их структуры и параметров в процессе изготовления, проще создать новую микросхему, чем скорректировать уже имеющуюся. Это резко уменьшает возможность экспериментальной доводки (наладки и оптимизации) и, соответственно, требует своевременной отработки основных вопросов технологичности конструкций ПП и вопросов повышения надежности технологических процессов ее изготовления.

Решением данных проблем являются аспекты практического применения теории неразрушающего контроля. Методы неразрушающего контроля базируются на наблюдении, регистрации и анализе результатов взаимодействия физических полей (излучений) или веществ с объектом контроля, причем характер этого взаимодействия зависит от химического состава, строения, состояния структуры контролируемого объекта и т. п. Важной характеристикой любых методов неразрушающего контроля является их высокая чувствительность к выявлению дефекта. Она зависит от особенностей метода неразрушающего контроля, условий проведения контроля, материала изделий.

При контроле качества выпускаемой электронной продукции широко используются опико-электрический и рентгеновский методы неразрушающего контроля.

Испытательное оборудование, основанное на совместном использовании оптического и электрического методов контроля, включает 3D-системы автоматической оптической инспекции [1; 2]) и системы измерения с летающими пробниками [3].

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

Системы позволяют контролировать и анализировать результаты работы автоматического сборочно-монтажного оборудования и измерять параметры, характеризующие качество паяных соединений. Данные системы не гарантируют выявления латентных дефектов паяных соединений, которые представляют наибольшую опасность для работоспособности ПП в дальнейшем.

Использование современных томографов [4; 5] в производстве при анализе ПП на наличие дефектов позволяет составить подробную 3D модель исследуемого объекта. На основе модели определяется местоположение и геометрические размеры обнаруженных дефектов. Но на проведение такого анализа требуется значительные временные затраты. Кроме этого, для оценки опасности выявленных дефектов нужны дополнительные исследования.

На протяжении нескольких лет зарубежными и отечественными коллективами ведется активная работа по адаптации метода акустической эмиссии для выявления латентных дефектов в конструкции ПП [6–9]. Данный метод основан на регистрации и анализе акустических волн, возникающих в процессе пластической деформации и разрушения (роста трещин) контролируемых объектов. Для активации скрытых дефектов необходимо в процессе испытания механически нагружать ПП. Проведенные исследования показали, что метод акустической эмиссии при трехточечном изгибе ПП позволяет определить расположение положение дефектов с погрешностью 5 мм в зонах с малой загруженностью компонентами ПП. В зонах с высокой загруженностью – погрешность локации дефектов возрастает в 2 раза. Погрешность такого уровня является неудовлетворительной, например, при локализации дефектов паяных соединений чип-компонента.

Для повышения точности такого метода требуется создание специального алгоритма локации дефектов с учетом особенностей каждой ПП. Однако это не гарантирует достаточной точности локации из-за многослойной структуры ПП, наличия большого количества компонент, технологических отверстий и большого количества различных материалов, используемых в конструкции ПП.

Возможным решением данной проблемы может быть подход, в котором в локальных участках ПП создается напряженно-деформированное состояние, которое является тестирующим нагружением, провоцирующим возможные латентные дефекты в данной зоне, с одновременным электрическим тестированием ПП.

Библиографические ссылки

1. 3D оптическая инспекция – революционные технологии Mirtec [Электронный ресурс]. URL: http://www.elinform.ru/news_6512.htm (дата обращения: 17.08.2020).
2. Современное состояние развития систем автоматической оптической инспекции [Электронный ресурс]. URL: http://www.tech-e.ru/2011_3_44.php (дата обращения: 17.08.2020).
3. Установка функционального контроля SPEA [Электронный ресурс]. URL: <http://ostec-electro.ru/katalog/radio/s-probnikami/4/> (дата обращения: 17.08.2020).

4. Трехмерное качество [Электронный ресурс]. URL: <https://ostec-3d.ru/upload/iblock/cae/caefe4e881a70c9ddd89a342d5671973.pdf> (дата обращения: 17.08.2020).

5. Система XT V 160 Nikon Metrology [Электронный ресурс]. URL: <https://sovtest-ate.com/equipment/xt-v-160/> (дата обращения: 17.08.2020).

6. Bansal A., Ramakrishna G., Liu K.-C. A New Approach for Early Detection of PCB Pad Cratering Failures // Cisco Systems, Inc. 2011. 8 p.

7. Bansal A., Ramakrishna G., Liu K.-C. Investigation of Pad Cratering in Large Flip-Chip BGA using Acoustic Emission // Cisco Systems, Inc. 2011. DOI: 10.1109/ECTC.2011.5898672.

8. Durability Evaluation Method for Contact Component Interconnections in Printed Circuit Boards under Thermal Loads / A. Azin, A. Zhukov, S. A. Ponomarev et al. // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1889, № 060015.

9. Nondestructive testing method for a new generation of electronics / A. Azin, A. Zhukov, A. Narikovich et al. // MATEC Web of Conferences (YSSIP-2017). Vol. 143, № 04007.

References

1. 3D opticheskaya inspeksiya – revolyutsionnye tekhnologii Mirtec [3D optical inspection – revolutionary technologies Mirtec] (In Russ.) [Electronic resource]. URL: http://www.elinform.ru/news_6512.htm (access: 17.08.2020).

2. Sovremennoe sostoyanie razvitiya sistem avtomaticheskoy opticheskoy inspeksii [The current state of the development of automatic optical inspection systems] (In Russ.) [Electronic resource]. URL: http://www.tech-e.ru/2011_3_44.php (access: 17.08.2020).

3. Ustanovka funktsional'nogo kontrolya SPEA [Setting the SPEA function control] (In Russ.) [Electronic resource]. URL: <http://ostec-electro.ru/katalog/radio/s-probnikami/4/> (access: 17.08.2020).

4. Trekhmernoe kachestvo [Three-dimensional quality] (In Russ.) [Electronic resource]. URL: <https://ostec-3d.ru/upload/iblock/cae/caefe4e881a70c9ddd89a342d5671973.pdf> (access: 17.08.2020).

5. Sistema XT V 160 Nikon Metrology [XT V 160 Nikon Metrology System] (In Russ.) [Electronic resource]. URL: <https://sovtest-ate.com/equipment/xt-v-160/> (access: 17.08.2020).

6. Bansal A., Ramakrishna G., Liu K.-C. A New Approach for Early Detection of PCB Pad Cratering Failures. Cisco Systems, Inc, 2011. 8 p.

7. Bansal A., Ramakrishna G., Liu K.-C. Investigation of Pad Cratering in Large Flip-Chip BGA using Acoustic Emission. Cisco Systems, Inc, 2011.

8. Durability Evaluation Method for Contact Component Interconnections in Printed Circuit Boards under Thermal Loads / A. Azin, A. Zhukov, S. A. Ponomarev et al. // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1889, № 060015.

9. Nondestructive testing method for a new generation of electronics / A. Azin, A. Zhukov, A. Narikovich et al. // MATEC Web of Conferences (YSSIP-2017). Vol. 143, № 04007.

© Азин А. В., Пономарев С. В., Рикконен С. В., Марицкий Н. Н., Сунцов С. Б., 2020

УДК 519.6

ПОДБОР ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ В ЗАДАЧЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ГРУППИРОВКИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПРОДУКЦИИ ПО ОДНОРОДНЫМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПАРТИЯМ

Ф. Г. Ахматшин, Л. А. Казаковцев

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

Исследуется проблема подбора информативных параметров в задачи автоматической группировки промышленной продукции по однородным производственным партиям полупроводниковых приборов.

Ключевые слова: информативные параметры, нормирование, автоматическая группировка.

SELECTION OF INFORMATIVE PARAMETERS IN THE PROBLEM OF AUTOMATIC GROUPING OF INDUSTRIAL PRODUCTS BY HOMOGENEOUS PRODUCTION BATCHES

F. G. Ahmatshin, L. A. Kazakotsev

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

Consider the problem selection of informative parameters in the problem of automatic grouping of industrial products by homogeneous production batches.

Keywords: informative parameters, normalization, automatic grouping.

Подбор информативных параметров результатов тестовых испытаний электронных радио изделий (ЭРИ), для комплектации критически важных электронных узлов космических аппаратов (КА) компонентной базой (ЭКБ) соответствующего качества, основывается на предварительном нормировании данных [1]. Для алгоритмов и/или автоматизированных систем автоматической группировки данных, нормирование приводит значения всех преобразованных данных к единому диапазону значений путем выражения через отношение этих значений к некоей величине, отражающей определенные свойства конкретного параметра [2]. Этот подход применяется в моделях k -средних и p -медиан хорошо зарекомендовала себя для решения задач [3–4], в результатах которой должна обеспечиваться стабильность и высокая точность за приемлемое время.

В многомерном пространстве параметров решение задачи k -средних [5] состоит в том, чтобы найти k точек (центров или центроидов) X_1, \dots, X_k в d -мерном пространстве таким образом, чтобы сумма квадратов расстояний от известных точек (векторов данных) A_1, \dots, A_N до ближайшей из требуемых точек достигла своего минимума в формуле:

$$\arg \min F(X_1, \dots, X_k) = \sum_{i=1}^n \min_{j \in \{1, k\}} \|X_j - A_i\|^2.$$

Существуют различные способы нормирования исходных данных [6]. В данном исследовании осуществлялось нормирование по допустимым значениям параметра, стандартного отклонения и по значениям допустимого дрейфа с целью сравнить влияние подбора информативных параметров в задаче автоматической группировки ЭРИ по однородным производственным партиям, основанных на модели k -средних и p -медиан.

Рабочая выборка в проведенном эксперименте состоит из полной смешанной партии. Обучающий набор соответствует рабочей выборке, для которой была проведена кластеризация. Наборы данных пересчитывались с учетом нормирования.

С использованием нормального стандартного отклонения был сгруппирован набор данных, для которого использовались данные с 3 по 18 параметра, параметры 1 и 2 не информативны и занулялись.

Нормирование по значениям допустимого дрейфа рассчитывалась только для 3–6 параметра, для которых соответствующие нормы были установлены, остальные данные занулялись. Разность изменения 3–6 параметров учитывались добавлением 19–22 параметра.

Нормирование по допустимым значениям параметра рассчитывалась для 3–16 параметра, для которых соответствующие нормы были установлены, остальные данные занулялись. Разность изменения 3–6 параметров учитывались добавлением 19–22 параметра.

Результаты были получены методом кластеризации k -средних с евклидовой мерой расстояния (DE), с мерой расстояния Махаланобиса и ковариационной матрицей (DM), с мерой расстояний Махаланобиса и корреляционной матрицей (DM2), с мерой расстояния Махаланобиса и средневзвешенной матрицей (DM3), с прямоугольной мерой расстояния (DR) и методом кластеризации p -медиан с евклидовой мерой расстояния (DE2). Для каждой модели мы провели 30 экспериментов. Средние результаты кластеризации приведены в таблице, представлены максимальное (Max), минимальное (Min), среднее значение (Mean) и стандартное отклонение (Std) для индекса Ранда и целевой функции. Для целевой функции также рассчитываются коэффициент вариации (V) и коэффициент размаха (R).

Сравнение результатов кластеризации с подбором различных информативных параметров при нормировании данных

	DE	DM	DM2	DM3	DR	DE2
Индекс Ранда						
Max	0,623	0,638	0,655	0,600	0,610	0,648
Min	0,520	0,511	0,460	0,559	0,560	0,395
Mean	0,574	0,585	0,590	0,592	0,590	0,591
Std	0,025	0,037	0,048	0,010	0,013	0,049
Целевая функция						
Max	2890	10506	3065	2750	5380	725,9
Min	2750	9716	2851	2421	4570	689,4
Mean	2807	10067	2937	2491	4785	699,5
Std	39,30	184,6	46,36	83,04	174,7	7,883
V	0,013	0,018	0,015	0,033	0,036	0,011
P	139,8	789,5	213,9	329	809,5	36,52

Подбор информативных параметров в способах нормирования по допустимым значениям параметра, с использованием стандартного отклонения и по значениям допустимого дрейфа, были использованы в методах кластеризации k -средних и p -медиан.

Учитывая высокое рассеяние и значение индекса Ранда, подбор информативных параметров в методах кластеризации k -средних и p -медиан с использованием нормализованных данных оказывает существенное влияние на полученные результаты. Высокие показатели кластеризации методами k -средних и p -медиан следствие подбора информативных параметров.

Библиографические ссылки

1. Казаковцев Л. А., Ступина А. А., Орлов В. И. Выбор метрики для систем автоматической классификации электрорадиоизделий по производственным партиям. 2015.
2. Казаковцев Л. А. Методы жадных эвристик для систем автоматической группировки объектов : дис. ... д-ра. техн. наук. Красноярск, 2019. С. 429.
3. Roznov I., Orlov V., Kazakovtsev L. Ensembles of clustering algorithms for problems of detection of homogeneous production batches of semiconductor devices // *2018 School-Seminar on Optimization Problems and their Applications*. 2018. Vol. 2098. P. 338–348.
4. Kazakovtsev L. A., Antamoshkin A. N., Masich I. S. Fast Deterministic Algorithm for EEE Components Classification // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 94*. 2015. Article ID 012015.
5. Орлов В. И. Качество электронной компонентной базы – залог длительной работоспособности космических аппаратов // Решетневские чтения : материалы Междунар. науч.-практ. конф. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. Т. 1, № 17. С. 238–241.
6. О нормализации данных в задаче автоматической группировки промышленной продукции по однородным производственным партиям / Ф. Г. Ахматшин, И. Р. Насыров, В. Л. Казаковцев и др. // Системы

управления и информационные технологии. 2020. № 2(80). С. 86–89.

References

1. Kazakovtsev L. A., Stupina A. A., Orlov V. I. *Vybor metriki dlya sistem avtomaticheskoy klassifikatsii elektroradioizdeliy po proizvodstvennym partiym*. [Selection of metric for systems of automatic classification of electro-radio parts by production lots]. 2015.
2. Kazakovtsev L. A. *Metody zhadnykh evristik dlya sistem avtomaticheskoy gruppировки ob"ektov*. [Greedy heuristic methods for automatic object grouping systems]: dis. ... d-ra. tekhn. nauk. Krasnoyarsk, 2019. P. 429.
3. Roznov I., Orlov V., Kazakovtsev L. Ensembles of clustering algorithms for problems of detection of homogeneous production batches of semiconductor devices. 2018 // *School-Seminar on Optimization Problems and their Applications*. 2018. Vol. 2098. P. 338–348.
4. Kazakovtsev L. A., Antamoshkin A. N., Masich I. S. Fast Deterministic Algorithm for EEE Components Classification // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 94*. 2015. Article ID 012015.
5. Орлов В. И. *Kachestvo elektronnoy komponentnoy bazy – zalog dlitel'noy rabotosposobnosti kosmicheskikh apparatov*. [Quality of electronic component base – a guarantee of long-term operability of spacecraft] // *Reshetnevskiye chteniya : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. ; Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk*, 2013. T. 1, № 17. P. 238–241.
6. *O normalizatsii dannykh v zadache avtomaticheskoy gruppировки promyshlennoy produktsii po odnorodnym proizvodstvennym partiym*. [On data normalization in the problem of automatic grouping of industrial products by homogeneous production batches / F. G. Akhmatshin, I. R. Nasyrov, V. L. Kazakovtsev et al. // *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. 2020. № 2(80). P. 86–89.

© Ахматшин Ф. Г., Казаковцев Л. А., 2020

УДК 629.78.05

**НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ ГИБРИДНЫХ ОБЪЕМНЫХ ИС НА БАЗЕ ПЛИС
ЕВРОПЕЙСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ
В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КА**

К. В. Бердичевский*, А. В. Королев

ООО «ИТР»

Российская Федерация, 191028, г. Санкт-Петербург, Литейный просп., 22, помещение 10Н

*E-mail: Berdichevskiy.Konstantin@intech-rus.com

Рассматриваются аспекты успешного внедрения новых высоконадежных интегральных схем на базе радиационнотойких ПЛИС европейского производства в виде объемных гибридных сборок для применения в перспективном навигационном космическом аппарате (КА) российского разработчика. ИС квалифицированы и рекомендованы для применения в электронных вычислительных системах бортовой аппаратуры научных КА, спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и малых КА орбитальных группировок.

Ключевые слова: радиационнотойкая ПЛИС, электронная вычислительная система, спутник ДЗЗ, космический аппарат, МКА, орбитальная группировка, радиоэлектронная аппаратура.

**NEW DEVELOPMENTS IN HYBRID 3D ICs BASED ON EUROPIAN-MADE FPGAs FOR USE
IN COMPUTER SYSTEM OF ON-BOARD SPACECRAFT EQUIPMENT**

K. V. Berdichevsky*, A. V. Korolev

ITR Company

22, Liteiny prospect, Saint-Petersburg, 191028, Russian Federation

*E-mail: Berdichevskiy.Konstantin@intech-rus.com

The article considers the aspects of successful implementation of new highly reliable integrated circuits (ICs) based on European-made radiation hardened FPGAs in the form of three-dimensional hybrid modules for use in prospective navigation spacecraft developed by a Russian developer. ICs are qualified and recommended for use in electronic computing system of on-board equipment of scientific spacecraft, Earth observation satellites, small spacecraft and constellations.

Keywords: radiation hardened FPGA, electronic computer system, Earth observation satellite, spacecraft, small spacecraft, satellite constellations, radio electronic equipment.

Электронные вычислительные системы бортовой аппаратуры космических аппаратов различного назначения являются наиболее важной составной частью, обеспечивающей долгосрочное и надёжное функционирование и строго соответствие заданным техническим характеристикам космических аппаратов. Быстрое и динамичное развитие технологий создания интегральных схем (ИС), применяемых в бортовой радиоэлектронной аппаратуре (БРЭА) космических аппаратов различного назначения, происходящее в последнее время, непрерывно дополняет номенклатуру ИС новыми изделиями и функциональными модулями.

Каждому новому изделию и функциональному модулю присущи такие технические характеристики как более высокая надёжность, производительность, модульность, компактность (габариты и вес). При этом, новые изделия имеют более низкую стоимость, чем применяемые ранее.

В марте 2019 года встала задача по подбору и рекомендации высоконадежной радиационнотойкой ПЛИС, максимально удовлетворяющей техническому

заданию российского разработчика, при соблюдении условий экономической эффективности и обеспечения необходимой поддержкой на всех стадиях реализации нового проекта построения перспективного навигационного КА.

В результате тщательного анализа доступных на российском рынке радиационнотойких ПЛИС было принято решение сконцентрироваться на новом семействе радиационнотойких модулей FUSIO RT, производства компании 3D PLUS (Франция), содержащих первую европейскую радиационнотойкую ПЛИС NG-Medium (SRAM-based), производства компании NanoXplore (Франция). Аргументами в пользу данного решения стали: наличие космической квалификации ПЛИС NG-Medium, подтвержденной сертификатом Европейского Космического Агентства (ESA), доступность поставок модулей данного семейства на территории Российской Федерации, высокая производительность и передовая блочная конструкция модулей семейства FUSIO RT. Разработчик принял за основу решение от компании 3D PLUS, как более эффективное, компактное, не подпадающее под экс-

портное регулирование государственного департамента США (ITAR Free), обеспеченное квалифицированное технической и консультационной поддержкой.

Компания 3D PLUS (Франция) на протяжении 25 лет занимается разработкой и производством высоконадёжных модулей для ответственных применений: модулей памяти, преобразователей напряжения постоянного тока, интерфейсных модулей, модулей защиты электронных компонентов и «интеллектуальных» функциональных микросборок, в том числе и для применений в космической технике. С развитием технологий и чутко реагируя на потребности заказчиков, инженеры компании 3D PLUS начали работать над более сложными устройствами и создали уникальное семейство модулей космического уровня качества FUSIO RT, состоящее из базового модуля, содержащего первую европейскую радиационностойкую ПЛИС NG-Medium (SRAM-based), производства компании NanoXplore (Франция) и конфигурационную память Flash NOR SPI, и трех вариаций с интегрированными высокоскоростной динамической памятью типа SDRAM емкостью 2 Гб для выполнения большого количества вычислений или/и памятью типа Flash NAND емкостью 64 Гб для организации хранилища данных высокой плотности [1; 2].

Уникальность разработки – все семейство FUSIO RT имеет одинаковое количество и расположение выводов, что позволяет, при необходимости, производить замену одного модуля на другой без изменения конструктива печатной платы. Интегрированная в модуль память позволяет улучшить производительность модуля за счет использования более высоких рабочих частот, повысить общую устойчивость модуля к воздействию электромагнитных помех за счет конструкции. Наличие перепрограммируемой ПЛИС в этом компактном модуле обеспечивает высокую гибкость и производительность разрабатываемой системы, а также оптимизацию затрат.

Семейство модулей FUSIO RT, разработанных компанией 3D PLUS по заказу национального центра космических исследований Франции (CNES) для применения в космической отрасли, обладает такими

ключевыми преимуществами, как миниатюризация, радиационностойкая конструкция, блочная архитектура и длительный срок технической поддержки.

В докладе будет отражена история успешного внедрения модуля FUSIO RT в проект отечественного заказчика: поставленные задачи, трудности, возникшие в ходе реализации проекта, и методы их решения.

Библиографические ссылки

1. Муаллем В., Бердичевский К. В., Нестеров Д. Н. 3D PLUS: от видеокамер космической квалификации до устройств хранения данных – широкий выбор решений для спутников ДЗЗ // Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли : тезисы докладов 4 междунар. научно-техн. конф. М. : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016. 220 с.
2. Mouallem W., Бердичевский К. В., Королев А. В. Новые разработки гибридных объемных ИС для применения в спутниках ДЗЗ // Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли : тезисы докладов 5 междунар. научно-техн. конф. М. : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. 196 с.

References

1. Mouallem W., Berdichevsky K. V., Nesterov D. N. 3D PLUS: from space qualified camera to storage devices – a wide variety of solutions for remote sensing satellites // Actual problems of creation of space systems of Earth observation : Proceedings of the Fourth international scientific-technical conf. M. : JSC "Corporation "VNIIEМ", 2016. 220 p.
2. Mouallem W., Berdichevsky K. V., Korolev A. V. New hybrid 3D ICs for use in remote sensing satellites // Actual problems of creation of space systems of Earth observation : Proceedings of the Fifth international scientific-technical conf. M. : JSC "Corporation "VNIIEМ", 2017. 196 c.

© Бердичевский К. В., Королев А. В., 2020

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ОДНОРОДНЫХ ГРУПП
ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ
КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

С. М. Голованов^{1,2}, В. И. Орлов^{1,2}, В. В. Федосов^{1,2}

¹АО «Испытательный технический центр – НПО ПМ»

Российская Федерация, 662970, г. Железногорск, ул. Молодежная, 20

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

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

E-mail: itcnpopm@atomlink.ru

Изложен подход к использованию алгоритмов формирования однородных групп при проведении испытаний электронной компонентной базы для космического применения в испытательных технических центрах.

Ключевые слова: электронная компонентная база, космическое применение, испытательный технический центр, однородность партии элементов.

**USING OF ALGORITHMS OF THE FORMATION OF HOMOGENEOUS GROUPS
FOR THE TESTING OF ELECTRONIC COMPONENTS FOR SPACE APPLICATION**

S. M. Golovanov^{1,2}, V. I. Orlov^{1,2}, V. V. Fedosov^{1,2}

¹JSC “Testing Technical Center – NPO PM”

Molodezhnaya Str. 20, Zheleznogorsk, 662970, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

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

E-mail: itcnpopm@atomlink.ru

The article describes the use of algorithms of formation of homogeneous groups for the testing of electronic components for space application in testing technical centers.

Keywords: electronic components, space application, testing technical center, homogeneity of the batch of elements.

В процессе развития космической индустрии сроки активного существования (САС) космических аппаратов (КА) неуклонно увеличиваются: если в 80-х годах прошлого века САС КА составлял 3–5 лет, то САС современных КА составляет 10–15 лет. Современный КА содержит порядка 100–200 тысяч электронных компонентов. Так как бортовая аппаратура КА в космическом пространстве не подлежит ремонту, то очевидно, что к электронной компонентной базе (ЭКБ) космического применения предъявляются исключительно высокие требования по надежности [1]. В связи с этим совершенствованию методологий повышения надежности ЭКБ космического применения придается первостепенное значение.

В РФ в настоящих условиях комплектация аппаратуры КА высоконадежной ЭКБ возможна только через испытательные технические центры (ИТЦ) [2]. С учетом накопленного опыта, методология формирования партий ЭКБ космического применения, в общих чертах, выглядит следующим образом [3]:

1. Для формирования партии ЭКБ космического применения в ИТЦ проводятся дополнительные испытания (ДИ) ЭКБ общего военного применения.

2. ДИ состоят из трех видов испытаний:

а) неразрушающие или дополнительные отбраковочные испытания (ДОИ);

б) разрушающий физический анализ (РФА).

в) испытания на радиационную стойкость.

РФА и испытания на радиационную стойкость проводятся на специально сформированных для этих целей тестовых выборках ЭКБ с последующим распространением результатов испытаний на всю партию. Формирование тестовых выборок для РФА и радиационных испытаний производится случайным образом.

Суть изложенных авторами предложений состоит в использовании в технологии ДИ такой обобщенной информации об испытываемой партии ЭКБ, как однородность. При этом можно выделить два понятия однородности.

Первое понятие. Назовем его однородностью первого рода – как возможность разбиения партии ЭКБ на группы (кластеры) элементов, близких друг к другу по своим характеристикам и при этом далеких по характеристикам от элементов других групп.

Второе понятие. Назовем его однородностью второго рода – как меру сходства характеристик элементов внутри группы, обладающей однородностью первого рода.

Предположим, по результатам анализа измерений электрических параметров партия ЭКБ делится на ярко выраженные однородные (первого рода) группы.

Очевидно, этот факт является отражением глубинных свойств, присущих данной партии: вариации в используемом сырье и примененной технологии изготовления, разные условия транспортировки и хранения и т. д. Обладать этой информацией полезно, в первую очередь, при формировании тестовых выборок для проведения РФА и испытаний на радиационную стойкость, так как, очевидно, что для уверенного распространения результатов на всю партию ЭКБ в тестовую выборку должны попасть представители всех выделенных однородных групп.

Информация об однородности второго рода испытываемой партии ЭКБ, в свою очередь, полезна при отбраковке сомнительных по качеству элементов. Анализ однородности второго рода нужен для выявления, так называемых, элементов-выбросов. Элементы-выбросы – это элементы, значительно отличающиеся по своим характеристикам от большинства элементов группы. Элементы-выбросы, судя по всему, обладают определенными дефектами, выделяющими их среди других элементов. Эти дефекты, конечно, могут быть «безвредными». Но, в то же самое время, с определенной довольно большой вероятностью эти дефекты в процессе эксплуатации (а это 10–15 лет) могут привести к преждевременному отказу элемента. Отсюда вывод – элементы-выбросы целесообразно отнести в группу потенциально ненадежных элементов и не допустить их попадание в аппаратуру КА.

Для практического применения понятий однородности партий ЭКБ в процессе ДИ специалистами АО «ИТЦ – НПО ПМ» (г. Железнодорожск) совместно с учеными СибГУ им. М. Ф. Решетнева (г. Красноярск) разработана математическая база и комплекс алгоритмов формирования однородных групп [4; 5].

Осуществлена отработка алгоритмов на архивной базе данных ДИ, проведенных в АО «ИТЦ – НПО ПМ». В настоящее время в АО «ИТЦ – НПО ПМ» идет процесс внедрения алгоритмов формирования однородных групп в методологию ДИ.

Библиографические ссылки

1. Орлов В. И., Федосов В. В. Качество электронной компонентной базы – залог длительной работоспособности космических аппаратов // Решетневские чтения. 2013. Т. 1. С. 238–241.

2. Федосов В. В., Патраев В. Е. Повышение надежности радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов при применении электрорадиоизделий, прошедших дополнительные отбраковочные испытания в специализированных испытательных технических центрах // Авиакосмическое приборостроение. 2006. № 10. С. 50–55.

3. Программа дополнительных испытаний электрорадиоизделий в испытательных технических центрах для обеспечения комплектации бортовой аппаратуры КА по заказам Генерального заказчика. Железнодорожск, 2008.

4. Golovanov S. M., Orlov V. I., Kazakovtsev L. A., Popov A. M. Recursive clustering algorithm based on silhouette criterion maximization for sorting semiconductor devices by homogeneous batches. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 537, Material Science and Aerospace Technology. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/537/2/022035> (дата обращения: 18.09.2020).

5. Орлов В. И., Федосов В. В., Голованов С. М. Применение итеративного алгоритма максимизации критерия силуэта для формирования однородных групп электронной компонентной базы // Решетневские чтения. В 2 ч. Ч. 1. С. 366–368. URL: <https://disk.sibsau.ru/index.php/s/53f2ZJPDKO10hMM> (дата обращения: 18.09.2020).

References

1. Orlov V. I., Fedosov V. V. Kachestvo elektronnoy komponentnoy bazy – zalog dlitel'noy rabotosposobnosti kosmicheskikh apparatov // Reshetnevskiye chteniya. 2013. T. 1. S. 238–241.

2. Fedosov V. V., Patrayev V. E. Povysheniye nadezhnosti radioelektronnoy apparatury kosmicheskikh apparatov pri primeneniі elektroradioizdeliy, proshedshikh dopolnitel'nyye otbrakovochnyye ispytaniya v spetsializirovannykh ispytatel'nykh tekhnicheskikh tsentrakh // Aviakosmicheskoye priborostroyeniye. 2006. № 10. S. 50–55.

3. Programma dopolnitel'nykh ispytaniy elektroradioizdeliy v ispytatel'nykh tekhnicheskikh tsentrakh dlya obespecheniya komplektatsii bortovoy apparatury KA po zakazam General'nogo zakazchika. Zheleznogorsk, 2008.

4. Golovanov S. M., Orlov V. I., Kazakovtsev L. A., Popov A. M. Recursive clustering algorithm based on silhouette criterion maximization for sorting semiconductor devices by homogeneous batches. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 537, Material Science and Aerospace Technology. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/537/2/022035> (data obrashcheniya: 18.09.2020).

5. Orlov V. I., Fedosov V. V., Golovanov S. M. Primeneniye iterativnogo algoritma maksimizatsii kriteriya silueta dlya formirovaniya odnorodnykh grupp elektronnoy komponentnoy bazy // Reshetnevskiye chteniya. V 2 ch. Ch. 1. S. 366–368. URL: <https://disk.sibsau.ru/index.php/s/53f2ZJPDKO10hMM> (data obrashcheniya: 18.09.2020).

© Голованов С. М., Орлов В. И., Федосов В. В., 2020

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СВЧ-ЭНЕРГИИ В ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

С. И. Козлов, О. А. Суханова, И. В. Трифанов

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

Рассмотрены принципы преобразования СВЧ-энергии в постоянный электрический ток.

Ключевые слова: СВЧ-энергия, полупроводниковая матрица, гибридные композиционные покрытия.

CONVERSION OF MICROWAVE ENERGY TO DIRECT ELECTRIC CURRENT

S. I. Kozlov, O. A. Sukhanova, I. V. Trifanov

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

The principles of converting microwave energy into direct electric current are considered.

Keywords: microwave energy, semiconductor matrix, hybrid composite coatings.

Одной из научно-технических проблем при создании электродинамических летательных аппаратов является преобразование сверхвысокочастотной энергии в электрическую энергию постоянного тока, предназначенную для энергообеспечения аэрокосмических летательных аппаратов.

Аналогичная проблема стоит при энергообеспечении за счет преобразования СВЧ-энергии в энергию постоянного электрического тока других энергетических объектов.

Известна система энергообеспечения летательного электродинамического аппарата [1], которая содержит преобразователь СВЧ-энергии в электрическую энергию постоянного тока, выполненный в виде полупроводниковой матрицы, состоящей из смеси двух химических полупроводниковых компонентов с различными атомными номерами, взятых в равных пропорциях, с грануляцией компонентов 30...50 мкм, и нанесенной на поверхность алюминиевой фольгой полупроводникового слоя толщиной до 150 мкм.

Одноименные полюса диполей полупроводниковой матрицы объединены между собой и подключены к соответствующим клеммам управления, что позволяет автоматически создать дипольную выпрямительную матрицу. При высоких мощностях СВЧ-излучения необходимо применять полупроводники с высокой предельной рабочей температурой 600–700 °С и безынерционными свойствами для всего СВЧ-диапазона частот.

К таким полупроводникам можно отнести карбид кремния и нитрид галлия, а также алмазы [2]. Эти полупроводники обладают высокой температурной и химической устойчивостью с сохранением физических свойств при продолжительном СВЧ-облучении,

а также радиационной стойкостью. Тип проводимости карбида кремния и нитрида галлия зависит от модификации их примесями. Для повышения эффективности и надежности процесса преобразования СВЧ-энергии в постоянный электрический путем увеличения поглощения СВЧ-энергии требуется применить гибридное композитное покрытие, которое может наноситься на полупроводниковую матрицу со стороны СВЧ-облучения.

Многослойный СВЧ-поглотитель из наноуглеродных материалов обладает хорошими полупроводниковыми свойствами с допустимой нагрузкой по току 10^9 А/см и проводимостью носителя заряда выше 10^5 см²/В·с [3].

На основании анализа материалов разработаны принципы построения систем преобразования СВЧ-энергии в постоянный электрический ток, позволяющие повысить эффективность преобразования СВЧ-энергии в постоянный электрический ток за счет повышения поглощения СВЧ-энергии гибридным наноконпозиционным покрытием, созданным на основе графена и углеродных нанотрубок, модифицированных ферромагнитными наночастицами, повышающими поглощение СВЧ-энергии.

Библиографические ссылки

1. Пат. 2335061. Российская Федерация, МПК H02J 17/00. Система энергообеспечения летательных электродинамических аппаратов / Клоев В. В., Запужалов В. Г., Матвеев В. И. ; № 2007107896/11 ; заявл. 05.03.2007 ; опубл. 27.09.2008, Бюл. № 27, 6 с.
2. Комов А. Н. Перспективные полупроводниковые материалы для развития СВЧ и нанoeлектроники // Вестник СамГУ. 2014. № 3 (114). С. 121–127.

3. Родионов В. Н. Механизмы взаимодействия СВЧ-излучения с наноструктурированными углеродсодержащими материалами : дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07, 2015. 169 с.

References

1. Klyuev V. V., Zapuskalov V. G., Matveev V. I. *Sistema energoobespecheniya letatel'nykh elektrodinamicheskikh apparatov* [The power supply system of electrodynamic flying vehicles]. Patent RF, № 2335061, 2008.

2. Komov A. N. Promising semiconductor materials for the development of microwave and nanoelectronics // *Vestnik SamGU*. 2014. № 3 (114). P. 121–127.

3. Rodionov V. N. Mechanisms of interaction of microwave radiation with nanostructured carbon-containing materials : *dis. ... kand. fiz.-mat. nauk*: 01.04.07, 2015. 169 p.

© Козлов С. И., Суханова О. А.,
Трифанов И. В., 2020

УДК 629.78

ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ КЛАСТЕРИЗАЦИИ И ПРОВЕРКА ОДНОРОДНОСТИ ГРУПП ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ

И. С. Масич

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

Исследуются подходы к проверке качества результатов формирования однородных групп электрорадиоизделий.

Ключевые слова: электронная компонентная база, электрорадиоизделия, кластеризация.

ASSESSMENT OF CLUSTERING VALIDITY AND HOMOGENEITY VERIFICATION OF EEE GROUPS

I. S. Masich

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

Approaches to checking the quality of the formation of EEE homogeneous groups are investigated.

Keywords: electronic component base, EEE, clustering.

Рассматривается задача классификации изделий микроэлектроники по однородным группам, которая сводится к задаче кластеризации [1; 2]. В литературе предложено широкое разнообразие алгоритмов кластеризации.

Применение алгоритма к набору данных направлено на то, чтобы выявить в них некую кластерную структуру. Однако процесс кластеризации воспринимается как неконтролируемый процесс, так как нет предопределенных классов и нет примеров, которые показали бы, какие отношения в данных являются действительными. Различные алгоритмы кластеризации основаны на некоторых предположениях для определения разделения набора данных. Как следствие, они могут вести себя по-разному в зависимости от особенностей набора данных (геометрия и плотность распределение кластеров) и значений входных параметров.

Очевидно, что проблема, с которой мы сталкиваемся при кластеризации, заключается в том, чтобы определить оптимальное количество кластеров, которые соответствуют набору данных. Во многих экспериментальных оценках алгоритмов кластеризации используются двумерные отображения наборов данных для того, чтобы пользователь мог визуально проверить достоверность результатов (т. е. насколько хорошо алгоритм кластеризации обнаруживает кластеры в наборе данных). Очевидно, что визуализация набора данных является важнейшей проверкой результатов кластеризации. В случае больших многомерных наборов данных (более трех измерений) эффективная визуализация набора данных может быть затруднена.

Общей характеристикой большинства алгоритмов кластеризации является то, что они накладывают некую кластерную структуру на набор данных X , даже если X не обладает такой структурой. В этом случае результаты, полученные после применения алгоритма кластеризации на X , не указывают на структуру X . Необходимо иметь обоснование того, что векторы X образуют кластеры, прежде чем применять алгоритм кластеризации. Проблема проверки того, обладает ли X кластерной структурой, не идентифицируя ее явно, известна как тенденция к кластеризации. Процедура оценки результатов алгоритма кластеризации известна под термином «валидность кластеризации» (cluster validity).

Данная работа направлена на исследование подходов к проверке качества результатов формирования однородных групп электрорадиоизделий (ЭРИ) [3]. Задача состоит в оценке качества кластеризации при наличии информации о группах изделий (внешние критерии), а также при отсутствии такой информации, когда истинное разбиение не известно (внутренние критерии). Эти критерии основаны на проверке статистических гипотез. Также исследуются относительные критерии, предназначенные для выбора наилучшей кластеризации из ряда полученных и определения числа групп. Кроме того, исследуются критерии для оценки однородности некоторого набора объектов. Данные критерии могут быть использованы для оценки правомочности разделения партии ЭРИ на обособленные группы (кластеры) объектов и для оценки однородности как меры близости элементов внутри группы с целью определения элементов-выбросов.

Рассмотрены вопросы оценки однородности выборки и качества результатов группировки. Изложенные теоретические положения направлены на решение следующих задач:

Определение тенденции к кластеризации. Является ли рассматриваемый набор элементов однородным либо содержит в себе какую-либо кластерную структуру?

Валидация кластеризации. Как оценить результат кластеризации? Выбор лучшей схемы кластеризации, в том числе выбор числа групп.

Валидация отдельных кластеров. Насколько полученный кластер является компактным относительно своих элементов и насколько он изолирован по отношению к другим элементам?

Библиографические ссылки

1. Разработка алгоритмического обеспечения анализа однородности партий электрорадиоизделий для комплектации РЭА КА : монография / Л. А. Казаковцев, И. С. Масич, В. И. Орлов, В. В. Проценко, В. В. Федосов ; 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. Masich I. S., Orlov V. I. Identification of logical patterns for classification // *EEE in space application*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. № 537. P. 042073.

References

1. Development of algorithmic support for analysis of homogeneity of electronic and radio products for the assembly of radioelectronic equipment of space vehicles / L. A. Kazakovtsev, I. S. Masich, V. I. Orlov, V. V. Protsenko, V. V. Fedosov ; Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2016. 192 p.

2. The problem of classification of electronic components / L. A. Kazakovtsev, V. I. Orlov, A. A. Stupina, I. S. Masich // *Vestnik SibGAU*. 2014. № 4 (56). P. 55–61.

3. Masich I. S., Orlov V. I. Identification of logical patterns for classification // *EEE in space application*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. № 537. P. 042073.

© Масич И. С., 2020

УДК 519.6

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ СТОИМОСТИ КОМПЛЕКТАЦИИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Д. Л. Михнёв¹, В. И. Орлов^{1,2}, И. П. Рожнов², Ю. В. Ерыгин², В. В. Федосов¹

¹Акционерное общество «Испытательный технический центр – НПО ПМ»
Российская Федерация, 662970, г. Железнодорожск Красноярского края, ул. Молодежная, 20
²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: ris2005@mail.ru

Представлен метод формирования стоимости комплектации бортовой аппаратуры космических аппаратов через испытательные технические центры.

Ключевые слова: электрорадиоизделия, космический аппарат, стоимость.

METHOD OF COST FORMATION OF THE ON-BOARD EQUIPMENT OF SPACE VEHICLES

D. L. Mikhnev¹, V. I. Orlov^{1,2}, I. P. Rozhnov², Y. V. Erygin², V. V. Fedosov¹

¹JSC “Testing Technical Center – NPO PM”
20, Molodezhnaya Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662970, Russian Federation
²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: ris2005@mail.ru

The method of forming the cost of completing the onboard equipment of spacecraft through testing technical centers is presented.

Keywords: semiconductor devices, spacecraft, cost.

Одним из основных способов повышения эффективности функционирования космических аппаратов (КА) и снижения затрат на их создание является увеличение сроков активного существования (САС) КА. С увеличением САС КА возрастает готовность космических систем, уменьшается число КА, необходимых для восполнения и поддержания пропускной способности систем, снижается потребность в ракетах-носителях для осуществления пусков, упрощается система управления функционирующими КА [1]. Следует отметить, что при создании военных КА увеличение САС является технической основой для повышения боеготовности и живучести средств космического вооружения.

Опыт АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» по созданию более 1270 КА показывает, что складываются определенные соотношения между уровнем эксплуатационно-технических характеристик (ЭТХ) КА (целевые характеристики, САС) и экономическими затратами на создание и эксплуатацию [1; 2].

САС КА измеряют календарным отрезком времени с момента выведения КА на орбиту до момента прекращения использования КА по целевому назначению из-за достижения предельного состояния. Такое определение САС эквивалентно характеристикам надежности (вероятность безотказной работы, ресурс, готовность). Чтобы работала характеристика «надежность» КА, необходим высокий уровень качества электронной компонентной базы – электрорадиоизде-

лий (ЭРИ) в составе бортовой аппаратуры. В современных отечественных космических аппаратах в составе аппаратуры функционируют 100–200 тыс. единиц различного типа ЭРИ (интегральные схемы, транзисторы, диоды, реле, конденсаторы, резисторы и т. д.), которые должны обеспечивать надежную длительную работоспособность бортовых систем.

Обеспечение бортовой аппаратуры КА, особенно с длительными сроками активного существования, ЭРИ высокого уровня качества и надежности является сложной задачей. Основной проблемой комплектации космических аппаратов электрорадиоизделиями является отсутствие в России производства ЭРИ для использования в космической технике [2]. Для решения данной проблемы был внедрен новый принцип комплектования аппаратуры через специализированные испытательные технические центры с проведением операций сплошного входного контроля ЭРИ, дополнительных отбраковочных испытаний (ОИ), диагностического неразрушающего контроля (ДНК) с применением выборочного разрушающего физического анализа (РФА) [3; 4]. Затраты на реализацию предложенной схемы комплектации несоизмеримы с возможными материальными, репутационными и иными потерями при эксплуатации КА из-за недостаточного качества электрорадиоизделий.

Затраты на комплектацию бортовой аппаратуры космических аппаратов через испытательные технические центры формируются из стоимости закупки ЭКБ и проведения дополнительных испытаний и/или

сертификации (с учетом стоимости подготовки производства).

Ниже представлен метод формирования стоимости комплектации бортовой аппаратуры космических аппаратов через испытательные технические центры:

Стоимость закупки ЭРИ j -го класса:

$$C_j^3 = A_j (N_j + R_j + P_j) (1 + K_3),$$

где A_j – стоимость 1 шт. ЭРИ j -го класса; N_j – количество ЭРИ j -го класса; R_j – количество ЭРИ на РФА от партий j -го класса, P_j – количество ЭРИ для отработки программного обеспечения от партий j -го класса; K_3 – коэффициент запаса – определяется на основании статистических данных забракования или отнесения ЭРИ j -го класса к категории потенциально ненадежных, т. е. не пригодных для установки в бортовую аппаратуру КА; $(N_j + R_j + P_j) (1 + K_3)$ – количество ЭРИ j -го класса к закупке.

Стоимость испытаний ЭРИ j -го класса:

$$C_j^H = C_{jk} (N_j + R_j + P_j) (1 + K_3) + B_j,$$

где C_{jk} – стоимость испытаний 1 шт. ЭРИ j -го класса; $C_{jk} (N_j + R_j + P_j) (1 + K_3)$ – стоимость испытаний всех ЭРИ j -го класса; B_j – стоимость подготовки производства и проведения дополнительных работ для ЭРИ j -го класса.

Примечание: C_{jk} (стоимость испытаний 1 шт. ЭРИ j -го класса) складывается из трудоемкости проведения испытаний ЭРИ j -го класса, стоимости нормо-часа, установленного на определенный календарный год, общехозяйственных расходов, а также налогов, сборов и иных расходов исполнителя.

Итоговая стоимость комплектации бортовой аппаратуры космических аппаратов через испытательные технические центры представлена ниже:

$$Ck = \sum_{j=1}^l A_j (N_j + R_j + P_j) (1 + K_3) + \sum_{j=1}^l (C_{jk} (N_j + R_j + P_j) (1 + K_3) + B_j),$$

где l – число показывающее количество классов ЭРИ.

В настоящее время, с учетом введения в законодательство Российской Федерации правовых основ государственного регулирования отношений, связанных с формированием, особенностями размещения, выполнения государственного оборонного заказа и государственного контроля (надзора) в сфере государственного оборонного заказа, а также основных принципов и методов государственного регулирования цен на товары, работы, услуги по государственному оборонному заказу, изменился подход к организации процессов комплектации бортовой аппаратуры космических аппаратов и их финансового обеспечения [5].

Особенности банковского и казначейского сопровождения государственного оборонного заказа, а также особенности исполнения законодательства и иных нормативных правовых актов, связанных с контрактной системой в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных

нужд, ставят перед испытательными техническими центрами задачи разработки и реализации превентивных мероприятий, направленных на минимизацию затрат и рисков неисполнения договорных обязательств.

Сегодня решение вышеуказанных задач возможно через цифровизацию, посредством передовых программных продуктов, современных алгоритмов сквозного оперативно – календарного планирования и контроллинга процессов комплектации бортовой аппаратуры космических аппаратов, начиная с момента размещения заявки на закупку до полного исполнения обязательств по контракту (договору).

Библиографические ссылки

1. Федосов В. В., Патраев В. Е. Оценка влияния разрушающего физического анализа на характеристики безотказности изделий микроэлектроники, устанавливаемых в бортовую аппаратуру космических аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. 2008. № 1. С. 37–40.
2. Rozhnov I., Orlov V., Kazakovtsev L. Ensembles of clustering algorithms for problem of detection of homogeneous production batches of semiconductor devices // CEUR Workshop Proceedings Ser. "OPTA-SCL 2018 Proceedings of the School-Seminar on Optimization Problems and their Applications". 2018. P. 338–348.
3. Решение Проблемного совета Росавиакосмоса от 01.12.1997. № 3.
4. Решение Проблемного совета № 3-ПК Научно-технического совета Росавиакосмоса от 26.10.2000. № 23-2000.
5. О государственном оборонном заказе : федер. закон от 29.12.2012 № 275-ФЗ (ред. от 31.07.2020) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 12.05.2020).

References

1. Fedosov V. V., Patraev V. E. [Evaluation of the effect of destructive physical analysis on the reliability characteristics of microelectronic products installed in on-board spacecraft equipment] // Aerospace instrumentation. 2008. Vol. 1. P. 37–40.
2. Rozhnov I., Orlov V., Kazakovtsev L. Ensembles of clustering algorithms for problem of detection of homogeneous production batches of semiconductor devices // CEUR Workshop Proceedings Ser. "OPTA-SCL 2018 – Proceedings of the School-Seminar on Optimization Problems and their Applications". CEUR-WS. 2018. Vol. 2098. P. 338–348.
3. Decision of the Problem Council of Rosaviakosmos dated 01.12.1997. № 3.
4. Decision of the Problem Council No. 3-RK of the Scientific and Technical Council of Rosaviakosmos dated 26.10.2000. № 23-2000.
5. On the State Defense Order : Federal Law No. 275-FZ of December 29, 2012 (as amended on July 31, 2020) [Electronic resource]. URL: <http://www.consultant.ru> (access: 12.05.2020).

© Михнев Д. Л., Орлов В. И., Ерыгин Ю. В., Рожнов И. П., Федосов В. В., 2020

УДК 519.6

ПРИМЕНЕНИЕ АРХИТЕКТУРЫ CUDA ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ

И. П. Рожнов¹, Л. А. Казаковцев¹, В. И. Орлов^{1,2}, Е. В. Лапунова¹¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31²ОАО «Испытательный технический центр – НПО ПМ»
Российская Федерация, 662970, г. Железногорск Красноярского края, ул. Молодежная, 20
E-mail: ris2005@mail.ru

Показано применение программирования на графических процессорах алгоритмов автоматической группировки, основанных на параметрических оптимизационных моделях и методе VNS для формирования электронной компонентной базы космического применения.

Ключевые слова: CUDA, GH-VNS, VNS, кластерный анализ, автоматическая группировка.

APPLICATION OF CUDA ARCHITECTURE TO FORMING AN ELECTRONIC COMPONENT BASE

I. P. Rozhnov¹, L. A. Kazakovtsev¹, V. I. Orlov^{1,2}, E. V. Lapunova¹¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation²JSC «Testing Technical Center – NPO PM»
Molodezhnaya Str. 20, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662970, Russian Federation
E-mail: ris2005@mail.ru

The application of programming on graphic processors of automatic grouping algorithms based on parametric optimization models and the VNS method for the formation of an electronic component base for space applications is shown.

Keywords: CUDA, GH-VNS, VNS, cluster analysis, automatic grouping.

Интенсивное современное развитие технологий автоматического сбора данных, передачи и хранения информации, интеллектуального анализа данных (Data Mining), а также технологический рост во многих отраслях промышленности и экономики привели к появлению гигантских массивов многомерных данных [1]. В связи с ускоренным ростом объемов данных растет и потребность в современных средствах и системах сбора, хранения и обработки массивов данных, вследствие чего увеличивается их многообразие [2; 3]. Непрерывно разрабатываются новые методы и подходы для ускорения расчетов, например, с использованием архитектуры CUDA [4], и прочие перспективные исследования.

В [2; 3] были рассмотрены комбинации алгоритмов метода жадных эвристик с чередующимися окрестностями (для задач k -средних, k -медоид и алгоритма СЕМ) с целью повышения точности методов отбора потенциально ненадежных изделий электронной компонентной базы космического применения.

Для сокращения времени расчетов данных методов было применено программирование на графических процессорах (GPU) с использованием архитектуры CUDA [4].

Производительность базовой жадной агломеративной эвристической процедуры при больших объемах данных во время выполнения расчетов становит-

ся проблемой, особенно когда найти правильный параметр k (число кластеров) в практических задачах можно только путем выполнения нескольких запусков с разным количеством кластеров. При увеличении количества кластеров процедура начинает работать всё медленнее (алгоритм требует все большего количества итераций, и каждая итерация требует возрастающих вычислительных ресурсов), поэтому мы внесли изменения и реализовали удаление кластеров не по одному, а по несколько за одну итерацию [3].

Алгоритм 1 Базовая жадная агломеративная эвристическая процедура для задач с большим числом кластеров

Дано: начальное число кластеров K , необходимое количество кластеров $k < K$, $k > 50$, первоначальное решение S , $|S| = K$.

1: Улучшить решение S двухшаговым алгоритмом локального поиска (если это возможно).

пока $K \neq k$

для каждого $i' \in \{1, K\}$

2: $S' = S \setminus \{X_{i'}\}$. Вычислить $F_{i'}' = F(S')$, где $F(\cdot)$

значение целевой функции.

конец цикла

3. Установить S_{elim} из n_{elim} центроидов, $S_{elim} \subset S$, $|S_{elim}| = n_{elim}$, с минимальными значениями $F_{i'}^l$. Здесь, $n_{elim} = \max\{1, 0.2 \cdot (|S| - k)\}$.

4. Получить новое решение $S = S \setminus S_{elim}$, $K = K - 1$, и улучшить его с помощью двухшагового алгоритма локального поиска.

конец цикла

В настоящее время уже немало параллельных алгоритмов, адаптированных к архитектуре CUDA, реализовано на графических процессорах [5], в особенности один из самых известных алгоритмов k -средних.

Расчет алгоритма k -средних при больших объемах данных становится проблемой. Кроме того, Алгоритм 1 предполагает многократный запуск алгоритма k -средних (или другого метода локального поиска), и число этих запусков растет с ростом числа кластеров (квадратичная зависимость). Мы предлагаем использовать оптимизированную для GPU стратегию для k -средних, а также адаптированную к архитектуре CUDA процедуру исключения кластеров из решения, которая является обязательным и наиболее вычислительно затратным шагом в жадной агломеративной эвристической процедуре. Для этого мы реализовали Шаг 2 Алгоритма 1 на графическом процессоре. На этом этапе Алгоритм 1 вычисляет общее расстояние после удаления одного кластера: $F_{i'}^l = F(S')$, где $S' = S \setminus \{X_{i'}\}$. Вычислив $F(S)$, мы можем рассчитать

$$F_{i'}^l = F(S') = F(S) + \sum_{l=1}^N \Delta D_{l'}$$

$$\Delta D_{l'} = \begin{cases} 0, & C_{i'} \neq l, \\ \left(\min_{j \in \{\overline{1, k}\}, j \neq i'} \|A_j - X_j\|^2 \right) - \|A_j - X_{C_{i'}}\|^2, & C_{i'} = l. \end{cases}$$

где l – номер кластера. Здесь мы использовали 512 потоков (число подобрано экспериментальным путем) для каждого блока CUDA. Сначала переменная $sumD$ инициализируется со значением 0. Затем для каждого вектора данных запускается следующий алгоритм и вычисляется $\Delta D_{l'}$.

Алгоритм 2 CUDA-реализация шага 2 Алгоритма 1

$l = blockDim.x \times blockDim.x + threadIdx.x$.

Если $l > k$ тогда возврат.

Рассчитать $\Delta D_{l'}$ в соответствии с (1).

Если $\Delta D_{l'} > 0$ то $atomicAdd(sumD, \Delta D_{l'})$.

Синхронизировать потоки.

Таким образом, каждый поток алгоритма 2 выполняет функцию интеллектуального агента, определяющего вклад каждого вектора данных $\Delta D_{l'}$ в приращение целевой функции после удаления l -го кластера.

Все остальные алгоритмы работают на центральном процессоре (CPU).

Таким образом, для сокращения времени расчетов отбора потенциально ненадежных изделий электронной компонентной базы космического применения, были предложены параллельные алгоритмы с жадной агломеративной эвристической процедурой для решения задач автоматической группировки большого объема данных, адаптированные к архитектуре CUDA.

Библиографические ссылки

1. Jain A. K. Data clustering: 50 years beyond K-means // Pattern Recognition Letters. 2010. Vol. 31. P. 651–666.
2. Алгоритм для задачи k -средних с рандомизированными чередующимися окрестностями / И. П. Рожнов, Л. А. Казаковцев, М. Н. Гудыма и др. // Системы управления и информационные технологии. 2018. № 3 (73). С. 46–51.
3. Рожнов И. П., Казаковцев Л. А. Подход к разработке алгоритмов автоматической группировки на основе параметрических оптимизационных моделей // Информатика и системы управления. 2020. № 1 (63). С. 24–37.
4. Parallel implementation of the greedy heuristic clustering algorithms / L. A. Kazakovtsev, I. P. Rozhnov, E. A. Popov, M. V. Karaseva, A. A. Stupina // IOP Conf. Series: Engineering-2019. Vol. 537.
5. Рожнов И. П., Казаковцев В. Л. Реализация жадных эвристических алгоритмов кластеризации для массивно-параллельных систем // Системы управления и информационные технологии. 2019. № 2 (76). С. 36–40.

References

1. Jain A. K. Data clustering: 50 years beyond K-means // Pattern Recognition Letters. 2010. Vol. 31. P. 651–666.
2. Algorithm for the k -means problem with randomized variable neighborhood search / I. P. Rozhnov, L. A. Kazakovtsev, M. N. Gudyma, V. L. Kazakovtsev // Control Systems and Information Technology. 2018. Vol. 3 (73). P. 46–51.
3. Rozhnov I. P., Kazakovtsev L. A. [An approach to the development of clustering algorithms based on parametric optimization models] // Informatika i sistemy upravleniya. 2020. № 1(63). P. 24–37.
4. Parallel implementation of the greedy heuristic clustering algorithms / L. A. Kazakovtsev, I. P. Rozhnov, E. A. Popov, M. V. Karaseva, A. A. Stupina // IOP Conf. Series: Engineering-2019. Vol. 537.
5. Rozhnov I. P., Kazakovtsev L. A. [Implementation of the greedy heuristic clustering algorithms for massive-parallel systems] // Control Systems and Information Technology. 2019. Vol. 2 (76). P. 36–40.

© Рожнов И. П., Казаковцев Л. А., Орлов В. И., Лапунова Е. В. 2020

УДК 621.923.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ПРОЦЕССА АНОДНО-АБРАЗИВНОГО ПОЛИРОВАНИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ КАНАЛОВ МАЛОГО СЕЧЕНИЯ

В. И. Трифанов, Т. А. Пчелкина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: tat0401@yandex.ru

Показаны возможные электрические параметры процесса анодно-абразивного полирования каналов малого сечения и выходные метрологические характеристики обрабатываемой поверхности.

Ключевые слова: анодно-абразивное полирование, импульсное напряжение.

INFLUENCE OF THE MODES OF THE ANODIC-ABRASIVE POLISHING PROCESS ON THE SURFACE ROUGHNESS OF SMALL-SECTION CHANNELS

V. I. Trifanov, T. A. Pchelkina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: tat0401@yandex.ru

Possible electrical parameters of the process of anodic-abrasive polishing of channels of small cross-section and output metrological characteristics of the treated surface are shown.

Keywords: anodic-abrasive polishing, pulse voltage.

Электроимпульсное полирование находит широкое применение для повышения качества поверхности деталей машин [1]. Анодно-абразивное полирование является одним из методов электроимпульсного полирования. Механизм анодно-абразивного полирования представляет собой совмещенный процесс анодного растворения микронеровностей в электролите 15 % NaNO_3 с одновременным удалением пассивирующей пленки с гребешков микрорельефа абразивонесущим эластичным катодом-инструментом [2]. При этом в пассивной зоне в микровпадинах практически не происходит анодного растворения, что позволяет уменьшить припуск на полирование обрабатываемой поверхности.

При анодном-абразивном полировании абразивонесущий катод-инструмент совершает вибрацию с частотой f и амплитудой A , а также продольное перемещение со скоростью V вдоль обрабатываемой поверхности. Проведенные экспериментальные исследования показали, что при вибрации катода-инструмента на обрабатываемой поверхности формируется импульсное синусоидальное напряжение с прямым передним фронтом (рис. 1), что повышает локализацию процесса анодного растворения микронеровностей и уменьшает пассивацию их. Установлено, что уменьшение напряжения от 8В до 4В не изменяет конфигурацию импульса напряжения.

На рис. 1 показаны экспериментальные зависимости импульсного напряжения $U_{\text{и}}(t)$, замеренные с использованием цифрового осциллографа DS1052E и специального изолированного электрода, установленного в обрабатываемую пластину, фиксирующего основные электрические параметры при ААП.

Плотность максимального импульса тока i_a определялась при помощи изолированного датчика тока,

который был вмонтирован через отверстие в обрабатываемую поверхность и рассчитывался по формуле:

$$i_a = \frac{U_a}{R_{\text{и}} \cdot S_{\text{эл}}},$$

где U_a – величина импульсного напряжения; $R_{\text{и}}$ – величина измерительного сопротивления; $S_{\text{эл}}$ – площадь сечения измерительного электрода датчика тока.

При напряжении 6В подаваемого на электроды от источника постоянного тока расчетная максимальная плотность тока составляла 38 А/см^2 , что позволило устранить межкристаллическое растравливание обрабатываемой поверхности. Следует отметить, при анодном-абразивном полировании стабилизируются параметры электролита в межэлектродном зазоре (температура электролита, pH, электропроводность), что способствует равномерности распределения средней плотности тока на длине обрабатываемой поверхности и скорости удаления припуска при полировании.

На рис. 2 представлены графики распределения плотности тока и равномерной скорости удаления припуска V_z по длине обрабатываемой поверхности образца сечением $7,6 \times 3,8 \text{ мм}$, изготовленного из сплава 32НКД в электролите 15 % NaNO_3 .

Изменение шероховатости поверхности канала волновода после ААП составила $Ra \ 0,16 - 0,08 \text{ мкм}$, при удаленном припуске $0,015 - 0,025 \text{ мм}$.

Показаны возможные электрические параметры процесса анодно-абразивного полирования обрабатываемой поверхности, которые могут быть получены при применении источника постоянного электрического напряжения и вибрации катода-инструмента, что позволяет отказаться от дорогостоящих импульсных источников тока.

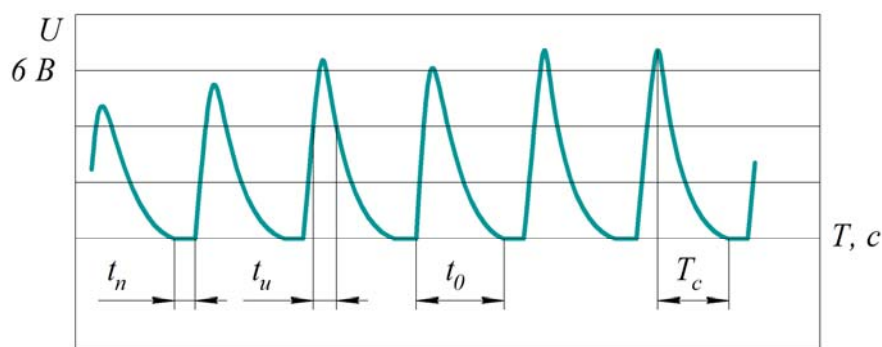


Рис. 1. Изменение импульсного напряжения амплитудой $U = 6$ в промежутке при ААП сплава 32НКД с режимами: $A = 15$ мм – амплитуда АЭКИ, $\Delta x = 50$ м/с – скорость колебаний АЭКИ; $\omega = \frac{1}{\Delta x} = 20$ Гц – частота колебаний АЭКИ; $T_c = 4,5$ мс – постоянная времени спада напряжения; $t_n = 3$ мс – время импульса напряжения; $t_0 = 6$ мс – время обработки; $t_{п} = 3$ мс – время паузы

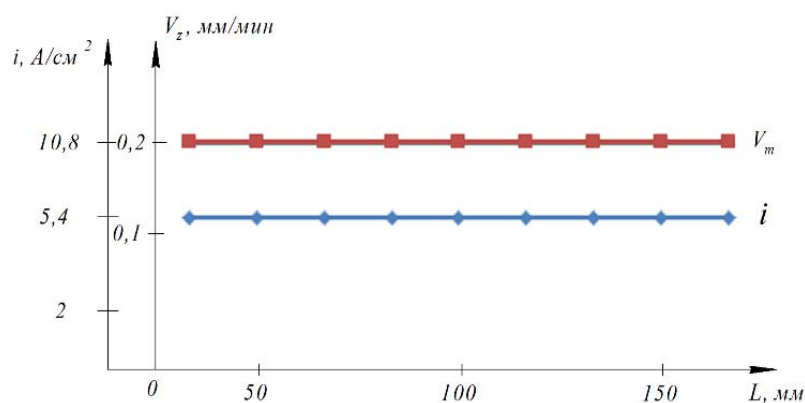


Рис. 2. Распределение плотности тока (i) и скорости удаления припуска V_z на длине обрабатываемой поверхности L : электролит 15 % NaNO_3 , напряжение $U = 6$ В падение напряжения на электродах, $\Delta U = 2$ В

Представлены технологические показатели процесса анодно-абразивного полирования обрабатываемой поверхности большой длины $L = 150$ мм канала малого сечения и полученные выходные метрологические характеристики (Ra 0,16–0,08 мкм, при удалённом припуске 0,015–0,025 мм).

Библиографические ссылки

1. Электроимпульсное полирование на основе железа, хрома, никеля / Ю. В. Синкевич [и др.]. Минск : БНГУ, 2014. 325с.
2. Патент 2588953. РФ МПК В23Н 5/06(2006.01) Способ анодно-абразивного полирования отверстий / И. В. Трифанов, Л. И. Оборина, Д. Р. Рыжов и др. № 2014149535/02 ; заяв. 08.12.2014 ; опубл. 10.07.2016, Бюл. № 19.
3. Improving the process of anodic abrasive polishing of small-section channels / V. I. Trifanov, A. V. Sutyagin, O. A. Sukhanova et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Institute of Physics Publishing. 2020. Vol. 822.

Materials Science and Engineering. Institute of Physics Publishing. 2020. Vol. 822.

References

1. Sinkevich YU. V.. *Elektroimpul'snoe polirovanie na osnove zheleza, hroma, nikelya*[Electric pulse polishing based on iron, chromium, Nickel]. Minsk : BNGU, 2014. 325 p.
2. Trifanov I. V., Oborina L. I., Ryzhov D. R. et al. *Sposob anodno-abrazivnogo polirovaniya otverstij* [Method of anodic-abrasive hole polishing]. Patent RF. № 2588953. 2014.
3. Improving the process of anodic abrasive polishing of small-section channels / V. I. Trifanov, A. V. Sutyagin, O. A. Sukhanova et al. // In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Institute of Physics Publishing. 2020. Vol. 822.



Секция

**«КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЯ
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ»**

УДК 629.78

ВЕРОЯТНОСТНО-ЛИНГВИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАК ОСНОВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПОИСКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

М. Е. Баранов

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

Рассматривается один из перспективных методов диагностирования неисправностей в технических системах.

Ключевые слова: неисправность, диагностирование, лингвистическая модель, техническое состояние.

PROBABILISTIC-LINGUISTIC MODEL AS THE BASIS FOR THE FUNCTIONING OF THE FAULT FINDING SUPPORT SYSTEM IN TECHNICAL SYSTEMS

M. E. Baranov

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

One of the most promising methods of fault diagnosis in technical systems is considered.

Keywords: malfunction, diagnostics, linguistic model, technical condition.

Процесс технического диагностирования с достаточной для практики точностью может быть представлен конечной совокупностью характеристик. При этом внутренняя структура диагностируемого объекта, его физическое состояние, которые определяют ход процесса диагностирования, для наблюдения доступны весьма ограничено. Специалист, который при разработке экспертной системы поддержки поиска неисправностей (ЭСППН) в сложной технической системе (СТС) имеет статус эксперта и является источником необходимой диагностической информации, в силу физических причин способен получить представление только о некоторых свойствах и факторах наблюдаемого процесса. Очевидно, что процесс диагностирования СТС может быть представлен последовательностью диагностических ситуаций, которым соответствуют решения по изменению сложившейся ситуации (поиску неисправностей, эти ситуации вызвавшие). При разработке математической модели ЭСППН СТС важным моментом является анализ доступных для наблюдения признаков и принятия решения о месте расположения в системе отказавшего функционального элемента.

В этих рамках задача диагностирования как задача принятия решения может быть сформулирована следующим образом: имеется множество альтернатив, реализация каждой из которых приводит к определенным исходам, оценивание которых может быть проведено на основании некоторых показателей эффективности и определенным образом характеризует соответствующие альтернативы. Тогда разработка ЭСППН адекватна задаче построения модели выбора

альтернатив при диагностировании элементов СТС опытным специалистом (экспертом).

Среда, в которой эксперт по диагностике осуществляет свою деятельность, характеризуется неопределенностью, обусловленной случайностью исходов. Очевидно, что, решая задачи поиска неисправности, эксперт осуществляет отображение реальной задачи на некоторый формализованный и понятный ему язык. В связи с этим задачей диагностирования, решаемой по экспертным данным, может быть присущи следующие виды неопределенности: физическая неопределенность, которая связана с наличием во внешней среде нескольких возможностей, каждая из которых случайным образом становится действительностью, а также неточностью измерения конкретных физических величин; лингвистическая неопределенность, связанная с использованием для описания задачи естественного языка.

Очевидно, что эксперт в общем случае представляет собой носителя глубоких, но трудно формализуемых знаний. И поскольку цель экспертной системы состоит в тиражировании знаний эксперта, то основной задачей при ее создании является задача разработки базы знаний. При разработке диагностической базы знаний следует учитывать следующие особенности: объем знаний эксперта о предметной области может быть очень велик; перенесение знаний эксперта в диагностическую базу знаний сопряжено с конкретными трудностями, которые обусловлены тем, что эксперт знает многое, и знание его основано на прошлом опыте, на совокупности практических случаев [1].

Однако наряду с кажущейся на первый взгляд конкретностью и разобщенностью отдельных случаев знание, которым пользуется эксперт, представляет результат сопоставления разрозненных фактов, признаков и осмысления существующих между ними закономерностей. Таким образом, в базе знания необходимо предусмотреть механизм анализа, сущность которого не является прямым следствием накопленного практического опыта. Общепризнанным является то, что эксперт знает больше, чем осознает. И даже то, что он осознает, не всегда может быть выражено в четких правилах, регламентирующих процесс поиска. Таким образом, способности эксперта представлять свои знания в виде четких правил достаточно ограничены. Действия эксперта при решении конкретной диагностической задачи во многом определяются особенностями человеческой системы переработки информации. Следовательно, при построении диагностической базы знаний необходимо осознавать особенности используемого для этого источника информации.

Все многообразие известных в настоящее время способов передачи знаний экспертом системе может быть разбито на три группы [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**—**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Во-первых, это способы, которые основаны на использовании логических конструкций вида: «если ..., то ...». Во-вторых, способы, предполагающие определение экспертом вероятности влияния отдельных признаков на принадлежность к конкретным состояниям. В-третьих, способы построения базы знаний на примерах, когда в базу знаний вводятся описания реальных ситуаций с точной их диагностикой.

Очевидно, что качество экспертной системы во многом определяется теми возможностями, которые предоставляет способ, используемый для передачи экспертом базе знаний своего опыта. В этой связи необходимо отметить, что для каждой из отмеченных групп способов характерны существенные недостатки. Способы первой группы отличает то, что перед тем как втиснуть в конструкцию «если ..., то ...» обычно используемые экспертом комплексно знания ему приходится разлагать их на отдельные гранулы. Использование при построении базы знаний способов второй группы позволяет резко снизить трудоемкость ее построения, однако, как правило, не сами отдельные признаки, а их сочетания определяют определенное техническое состояние. Использование же отдельных признаков не позволяет эксперту составить целостную картину диагностической ситуации. Положительной стороной способов, составивших третью группу, является то, что они позволяют эксперту передавать свои знания в форме наиболее близкой к обычной своей деятельности, т. е. той, которая ему свойственна при анализе неисправностей. Вместе с этим, эти способы замкнуты на использование знаний одного эксперта, а потому их применение при разработке реальной диагностической базы знаний малоперспективны.

С учетом вышеизложенного при разработке математической модели для ЭСППН СТС будем использовать теорию нечетких множеств и понятие лингвистической переменной. При этом в качестве базовых будем использовать принципы, разработанные в [0].

Расширение круга диагностических данных, в частности за счет привлечения знаний высококвалифицированных специалистов-ремонтников (экспертов), делает неправомочными предположение только о вероятностной интерпретации исходных данных и использование статистических методов их обработки. Действительно, хотя отказы элементов СТС являются событиями случайными, но неопределенность, свойственная задаче поиска вызывающих их неисправностей, вызвана неполнотой, недостаточностью, недоопределенностью исходных данных. Это обуславливает целесообразность разработки методов диагностирования, которые позволяют эффективно бороться с отмеченными видами неопределенности.

Необходим метод, позволяющий эффективно формализовать и использовать диагностическую информацию, существующую в виде опыта лучших специалистов по поиску и устранению неисправностей в СТС.

Отмеченный метод должен быть положен в основу базы знаний и механизма логического вывода базы эвристических диагностических знаний, аккумулирующей знания некоторой наиболее квалифицированной группы экспертов по диагностике и предоставляющей в ответ на запрос пользователя в удобной для него форме «разумные» рекомендации по поиску неисправностей.

Вероятностно-лингвистическая модель как основа базы знаний ЭСППН в СТС, должна позволять фиксировать опыт наиболее квалифицированных специалистов (экспертов) в области диагностирования СТС, накапливать знания и осуществлять «рассуждения», предлагая лицу, принимающему решения обоснованные гипотезы о предполагаемых альтернативах при поиске и устранении неисправностей.

Очевидно, что математическая модель лежит в основе всех исследований по техническому диагностированию конкретной системы или определенного класса систем и, в свою очередь, определяет содержание диагностической модели в целом. С учетом сказанного выше при разработке математической модели для ЭСППН СТС целесообразно принять следующие допущения:

1. Структура СТС известна и содержит дискретные, аналоговые и гибридные устройства.
2. В качестве штатного алгоритмически реализованного метода диагностирования используется метод последовательного функционального анализа при допущении только одиночных неисправностей.
3. Поиск неисправностей в СТС на основе штатного диагностического обеспечения приводит к ситуациям, когда искомая неисправность (вызвавшая отказ) находится в классе неразличимых неисправностей, объем которых от 2-х до 30.
4. Для сокращения мощности классов неразличимых неисправностей и оптимизации стратегии поиска

места неисправности используются знания экспертов, имеющих большой опыт эксплуатации и диагностирования объектов данного и аналогичного типа.

5. Вероятностные и стоимостные факторы поиска неисправностей среди множества неразличимых учитываются опытом и знаниями эксперта по диагностике.

6. Вероятности неисправностей СТС различны.

Библиографические ссылки

1. Гаврилова Т., Червинская К. Извлечение и структурирование знаний для экспертных систем. М. : Радио и связь, 1992. 200 с.

2. Алиев Р. А., Церковный А. Э., Мамедова Г. А. Управление производством при нечеткой исходной информации. М. : Энергоатомиздат, 1991. 240 с.

3. Экспертная система реального времени для поддержки операторов атомных станций // Приборы и системы управления. 1994. № 4. С. 10–14.

4. Выявление экспертных знаний (процедуры и реализации) / О. И. Ларичев, А. И. Мечитов, Е. М. Мошквич и др. М. : Наука, 1989. 128 с.

5. Данилюк С. Модели и алгоритмы формализации и обработки информации для экспертных систем поддержки поиска неисправностей на основе вероятностно-лингвистического метода диагностирования. М. : Изд-во ВА РВСН им. Петра Великого (филиал в г. Серпухове Московской области), 2013. 224 с.

References

1. Gavrilova T., Chervinskaya K. *Izvlechenie i strukturirovanie znaniy dlya ekspertnykh sistem* [Extracting and structuring knowledge for expert systems]. M. : Radio and communications, 1992, 200 p.

2. Aliev R. A., Tserkovnyy A. E., Mamedova G. A. [Production management with unclear source information]. M. : Energoatomizdat, 1991. 240 p.

3. *Ekspertnaya sistema real'nogo vremeni dlya podderzhki operatorov atomnykh stantsiy* // Instruments and control systems. 1994. № 4. p.10–14.

4. Larichev O. I., Mechitov A. I., Moshkevich. E. M. [Identification of expertise (procedures and implementations)]. M. : Nauka, 1989, 128 p.

5. Danyluk S. *Modeli i algoritmy formalizatsii i obrabotki informatsii dlya ekspertnykh sistem podderzhki poiska neispravnostey na osnove veroyatnostno-lingvisticheskogo metoda diagnostirovaniya*. [Models and algorithms for formalization and processing of information for expert support systems for Troubleshooting based on the probabilistic-linguistic method of diagnosis]. Publishing house OF the VA RVSН. Peter the Great (branch in Serpukhov, Moscow region), 2013, 224 p.

© Баранов М. Е., 2020

УДК 620.179.14

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ЭФФЕКТА БАРКГАУЗЕНА

Г. М. Гринберг

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

Каждая технология изготовления ответственной продукции должна предусматривать использование системы неразрушающего контроля. В промышленности находят применение довольно много видов и методов неразрушающего контроля, в основу которых положены различные физические явления. Представлено описание метода, основанного на регистрации параметров магнитного шума.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, метод эффекта Баркгаузена

NON-DESTRUCTIVE INSPECTION OF PRODUCTS BY THE BARKHAUSEN EFFECT METHOD

G. M. Grinberg

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

Each technology for the manufacture of critical products must provide for the use of a non-destructive inspection. In industry, quite a few types and methods of non-destructive inspection are used, which are based on various physical phenomena. The paper presents a description of the method based on recording the parameters of magnetic noise.

Keywords: non-destructive inspection, Barkhausen effect method.

Сложность и высокая стоимость современной аэрокосмической техники, особые требования к обеспечению ее надежности и безопасности эксплуатации выдвигает на передний план контроль качества в процессе производства. Контроль качества производимых изделий – чрезвычайно важная область диагностических исследований, в которых обычно выделяют разрушающий и неразрушающий контроль.

В аэрокосмической промышленности преимущественно используется неразрушающий контроль (НК), который органично входит в технологический процесс изготовления сложных технических систем. Неразрушающий контроль включается во все стадии производства, начиная с входного контроля материалов и полуфабрикатов и кончая монтажными операциями. Ни один прогрессивный технологический процесс получения ответственной продукции не рекомендуется для внедрения в промышленность без соответствующей системы неразрушающего контроля.

Неразрушающий контроль – это наука о принципах, методах и средствах обнаружения и измерения дефектов, то есть наука, с помощью которой проверяется соблюдение стандартов качества материалов и полуфабрикатов, надежность деталей и безопасность работы машин и механизмов при эксплуатации. Термин «неразрушающие испытания» используется в качестве собирательного названия всех методов, позволяющих испытывать или контролировать мате-

риал изделия без ущерба для его последующего использования [1].

В основе НК лежат процессы взаимодействия различных физических полей и веществ с дефектом. Преимущество НК – возможность его применения по единой методике с однозначной оценкой результатов как при изготовлении и монтаже оборудования, так и при его ремонте и обследовании. С помощью НК можно выявить малейшие признаки ухудшения состояния узлов и деталей системы задолго до возможного разрушения [2].

Методы НК, классифицируемые по характеру взаимодействия различных физических полей с контролируемым объектом, разнообразны [3]. Ниже рассмотрим магнитный метод контроля, основанный на измерении и анализе результатов взаимодействия электромагнитного поля с контролируемым объектом.

Можно выделить два главных направления магнитного НК:

1) дефектоскопия – выявления дефектов нарушения сплошности материала изделия (трещины, поры, включения, расслоения и т. д.);

2) структуроскопия – определение структуры и фазового состава материала изделия и оценка физико-механических свойств материала изделия по одному или нескольким его магнитным параметрам [1].

К числу различных информативных параметров, используемых в магнитном НК, относятся параметры шумов (скачков) Баркгаузена, Физический принцип,

положенный в основу измерительного преобразования шумов Баркгаузена, находит широкое применение в магнитном НК и носит название «Метод эффекта Баркгаузена» [3].

Эффект Баркгаузена - это скачкообразное изменение намагниченности ферромагнитных материалов при непрерывном изменении внешнего магнитного поля [4].

Одним из первых промышленных приборов для неразрушающего контроля с использованием эффекта Баркгаузена является измеритель шумов Баркгаузена ИБШ-2. Он предназначен для контроля изменения структуры и степени пластической деформации проволок и тонких прутков из ферромагнитных материалов. Этот измеритель позволяет также контролировать марку материала и изменение диаметра проволоки (прутка) [5].

Метод эффекта Баркгаузена (МЭБ) имеет ряд преимуществ. Информативные параметры МЭБ обладают высокой чувствительностью к микро концентраторам напряжений и любым изменениям структуры ферромагнетика. Как правило, не требуется специальная подготовка поверхности, а аппаратурная реализация метода обеспечивает получение локальной информации, преимущественно, с поверхностных слоев ферромагнитного изделия [6–8].

В рамках исследований, проведенных группой под руководством Ломаева Г. В. был расширен диапазон практического использования эффекта Баркгаузена в различных областях измерений, контроля и автоматизации. По результатам проведенных группой исследований был написан отчет, в котором представлены данные о разработанных датчиках для измерения перемещения, температуры и давления. Физической основой датчиков является бистабильный эффект в ферромагнетиках. В физике такой эффект называют большими скачками Баркгаузена [9].

Библиографические ссылки

1. Костин В. Н. Магнитные методы структуроскопии и дефектоскопии ферромагнитных изделий : учеб. электронное издание. Екатеринбург : Изд-во ГОУ-ВПО УГТУ-УПИ, 2007. 95 с.
2. Контроль и испытания при изготовлении оборудования [Электронный ресурс]. URL: <https://all4study.ru/proizvodstvo/kontrol-i-ispytaniya-pri-izgotovlenii-oborudovaniya-2.html> (дата обращения: 30.09.2020).
3. ГОСТ 18353–79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-18353-79> (дата обращения: 27.09.2020).
4. Овseenко А. Н., Серебряков В. И., Гаек М. М. Технологическое обеспечение качества изделий машиностроения : монография. М. : Янус-К, 2003. 296 с.
5. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий : справ. В 2 кн. Кн. 2 / под ред.

В. В. Клюева. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1986. 352 с.

6. Рудяк В. М. Эффект Баркгаузена // Успехи физических наук. 1970. Т. 101, вып. 3. С. 54–93.
7. Венгринович В. Л. Магнитшумовая структуроскопия. Минск. : Наука и техника, 1991. 285 с.
8. Венгринович В. Л., Бусько В. Н. Особенности контроля методом эффекта Баркгаузена параметров поверхностных слоев, упрочненных поверхностной пластической деформацией // Дефектоскопия. 1988. № 10. С. 56–61.
9. Ломаев Г. В. Теоретическая оценка возможности регистрации давлений, перемещений и температур в объекте контроля беспроводным способом с использованием бистабильных ферромагнетиков : отчет о научно-исследовательской работе по теме. [Электронный ресурс]. URL: <https://lektsia.com/2xc0d1.html> (дата обращения: 27.09.2020).

References

1. Kostin V. N. Magnitnye metody strukturoskopii i defektoskopii ferromagnitnyh izdelij Uchebnoe elektronnoe tekstovoe izdanie. Ekaterinburg : Izdatel'stvo GOU-VPO UGTU-UPI, 2007. 95 p.
2. Kontrol' i ispytaniya pri izgotovlenii oborudovaniya [Electronic resource]. URL: <https://all4study.ru/proizvodstvo/kontrol-i-ispytaniya-pri-izgotovlenii-oborudovaniya-2.html> (access: 30.09.2020).
3. GOST 18353–79. Kontrol' nerazrushayushchij. Klassifikaciya vidov i metodov [Electronic resource] / URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-18353-79> (access: 27.09.2020).
4. Ovseenko A. N., Serebryakov V. I., Gaek M. M. Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva izdelij mashinostroeniya : monografiya. M. : Yanus-K, 2003. 296 p.
5. Pribory dlya nerazrushayushchego kontrolya materialov i izdelij : spravochnik. V 2 kn. Kn. 2 / pod red. V. V. Klyueva. 2-e izd., pererab. i dop. M. : Mashinostroenie, 1986. 352 p.
6. Rudyak V. M. Effekt Barkgauzena // Uspekhi fizicheskikh nauk. 1970. T. 101, № 3. P. 54–93.
7. Vengrinovich V. L. Magnitoshumovaya strukturoskopiya. Mn. : Navuka i tekhnika, 1991. 285 p.
8. Vengrinovich V. L., Bus'ko V. N. Osobennosti kontrolya metodom effekta Barkgauzena parametrov poverhnostnyh sloev, uprochnennyh poverhnotsnoj plasticheskoy deformaciej // Defektoskopiya. 1988. № 10. P. 56–61.
9. Lomaev G. V. Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote po teme: Teoreticheskaya ocenka vozmozhnosti registracii davlenij, peremeshchenij i temperatur v ob"ekte kontrolya besprovodnym sposobom s ispol'zovaniem bistabil'nyh ferromagnetikov [Electronic resource]. URL: <https://lektsia.com/2xc0d1.html> (access: 27.09.2020).

© Гринберг Г. М., 2020

УДК 621.32; 629.78

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИМИТАТОРОВ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Г. В. Двирный¹, А. А. Шевчук^{1,2*}, О. В. Пастушенко²

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

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

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

Предложен перспективный комбинированный имитатор солнечного излучения условий AM0 на основе последних разработок светодиодных источников в видимой области и ламп накаливания в преимущественно инфракрасной области солнечного спектра.

Ключевые слова: наземная отработка космических аппаратов, термовакуумные испытания, имитатор солнечного излучения, светоизлучающий диод.

WAYS TO IMPROVE THE TECHNICAL AND OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF SOLAR SIMULATORS FOR GROUND TESTING OF SPACECRAFT

G. V. Dvirniy¹, A. A. Shevchuk^{1,2}, O. V. Pastushenko²

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

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

²Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”

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

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

We offer a perspective combined AM0 solar simulator based on the latest developments of LED sources in the visible area and incandescent lamps in the predominantly infrared area of the solar spectrum.

Keywords: ground testing of spacecraft, thermal vacuum testing, solar simulator, light emitting diode.

Одним из базовых и наиболее сложных элементов испытательного оборудования, применяемого при комплексных термовакуумных испытаниях (ТВИ) космических аппаратов (КА), является имитатор солнечного излучения (ИСИ). Подавляющее большинство крупногабаритных ИСИ, применяемых при ТВИ КА, построено на основе газоразрядных ксеноновых ламп, при помощи которых создаются высокие уровни энергетической освещенности на большой освещаемой площади. В то же время таким ИСИ присущ ряд неустраняемых недостатков, в частности, низкая энергоэффективность, вызванная низким КПД газоразрядных ксеноновых ламп, удаленностью световых источников от объекта испытаний, высокими потерями в сложной оптической системе; сложность настройки, малый ресурс газоразрядных ксеноновых ламп (около 500 часов) и их высокая стоимость.

Очевидно, что перспективный ИСИ с более высокими техническими и эксплуатационными характеристиками должен быть основан на иных технических решениях, в частности, иметь максимально компактный световой источник с простой оптической системой, расположенный внутри термовакуумной камеры. При этом наиболее рационально исполнение светово-

го источника в виде матрицы из множества равномерно распределенных одиночных элементов с простыми оптическими системами, формирующими узкоугольные световые распределения, которые, в свою очередь, суммируются непосредственно на освещаемой площади – объекте испытаний [1].

Известно, что наибольшей спектральной точностью обладают комбинированные ИСИ, состоящие из ламп накаливания в преимущественно инфракрасной области и газоразрядных ксеноновых ламп с корректирующими светофильтрами в преимущественно видимой области спектра [2]. Однако на практике размещение газоразрядных ксеноновых ламп в термовакуумной камере по ряду причин невыполнимо [1]. Кроме этого, производство газоразрядных ксеноновых ламп с каждым годом сокращается, что вызвано стремительным развитием новых перспективных световых источников – высокоэффективных светодиодов.

Главной проблемой светодиодных источников при их применении в ИСИ считается сложность получения непрерывного спектра излучения, близкого к солнечному, так как максимум излучения любого светодиода сосредоточен в узком спектральном диапазоне.

Спектральное соответствие АМ0 комбинированного ИСИ

Диапазоны длин волн, нм	400–500	500–600	600–700	700–800	800–900	900–1000
Спектральное соответствие	0,79	1,04	0,92	1,05	1,04	0,98



Спектр комбинированного ИСИ на основе интегральных светодиодных сборок и ламп накаливания

Это требует объединения в световых источниках видимой части спектра комбинированного ИСИ нескольких типов светодиодов с различными, с определенным шагом, длинами волн. В то же время для правильной работы оптической системы каждый такой световой источник матрицы, состоящий из нескольких типов высокоэффективных светодиодов, по своим геометрическим характеристикам должен приближаться к точечному [1].

Одно из решений проблемы, применяемое производителем OSRAM, заключается в объединении нескольких типов высокоэффективных светодиодов различных длин волн в одной интегральной сборке малых размеров, на минимальном расстоянии друг от друга, благодаря чему результирующее излучение интегральной светодиодной сборки приближается к излучению точечного источника [3]. Для дальнейшего формирования светового потока производителем рекомендуется несколько видов оптических систем. Одна из них [4] содержит световод, в котором смешиваются световые потоки светодиодов различных длин волн, далее при помощи регулируемой линзы формируется узкоугольное световое распределение восьмиугольной формы.

Результаты проведенного авторами математического моделирования с использованием измеренных световых характеристик интегральной светодиодной сборки OSRAM LZ7-04M2PD в нормальных условиях подтвердили принципиальную возможность применения последних разработок высокоэффективных светодиодов в качестве точечных источников видимой области солнечного спектра в световой матрице комбинированного ИСИ совместно с точечными ис-

точниками на основе ламп накаливания. При этом с интегральными светодиодными сборками из светодиодов всего шести длин волн уже возможно обеспечить спектральное соответствие ИСИ не хуже 0,75–1,25 по методике измерений, приведенной в п. 5.2 ГОСТ 60904–9 [5], что соответствует классу А (см. таблицу).

Спектр ИСИ, полученный в результате моделирования, показан на рисунке.

Библиографические ссылки

1. Анализ возможности создания имитатора солнечного излучения на основе светодиодных источников для наземной обработки космических аппаратов / Г. В. Двирный, А. А. Шевчук, В. В. Двирный [и др.] // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 2. С. 271–280.
2. Schubert F., Spinner D. Solar simulator spectrum and measurement uncertainties // Energy Procedia. 2016. № 92. P. 205–210.
3. OSRAM LED Engin LuxiGen™ LED Emitters [Электронный ресурс] // OSRAM URL: <https://www.osram.us/ledengin/products/luxigen/lz7.jsp> (дата обращения: 04.10.2020).
4. FRAEN FXCM-7-H + FCX-53-01-0R Zoom System for LED Engin LZ7 LED [Электронный ресурс] // OSRAM. URL: http://mktg.ledengin.com/files/products/lenses/FXCM-7-H_FCX-53-01-0R.pdf (дата обращения: 04.10.2020).
5. ГОСТ Р МЭК 60904–9–2016. Приборы фотоэлектрические. Часть 9. Требования к характеристикам имитаторов солнечного излучения. Введ. 2017-10-01. М. : Стандартинформ, 2017. 12 с.

References

1. *Analiz vozmozhnosti sozdaniya imitatora solnechnogo izlucheniya na osnove svetodiodnykh istochnikov dlya nazemnoy otrabotki kosmicheskikh apparatov* [Analysis of LED-based solar simulator development capability for spacecraft ground testing applications] / G. V. Dvirniy, A. A. Shevchuk, V. V. Dvirniy et al. // *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii*. 2018. Vol. 19, № 2. P. 271–280 (In Russ).
2. Schubert F., Spinner D. Solar simulator spectrum and measurement uncertainties // *Energy Procedia*. 2016. № 92. P. 205–210.
3. OSRAM LED Engin LuxiGen™ LED Emitters [Electronic resource] // OSRAM. URL: <https://www.osram.us/ledengin/products/luxigen/lz7.jsp> (access: 04.10.2020).
4. FRAEN FXCM-7-H + FCX-53-01-0R Zoom System for LED Engin LZ7 LED [Electronic resource] // OSRAM. URL: http://mktg.ledengin.com/files/products/lenses/FXCM-7-H_FCX-53-01-0R.pdf (access: 04.10.2020).
5. *GOST R MEK 60904–9–2016. Pribory fotoelektricheskie. Chast' 9. Trebovaniya k harakteristikam imitatorov solnechnogo izlucheniya*. [State Standard R IEC 60904–9–2016. Photovoltaic devices. Part 9. Solar simulator performance requirements]. М. : Standartinform Publ., 2017. 12 p.

© Дvirный Г. В., Шевчук А. А.,
Пастушенко О. В., 2020

ИСПЫТАНИЯ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ ЛОКАЛЬНОГО НАГРЕВА

А. В. Хахленков^{1*}, А. А. Кишалов²

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

*E-mail: hahlenkov@iss-reshetnev.ru

² НПП волоконно-оптического и лазерного оборудования,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, В. О. 17-я линия, 4-6

E-mail: grinfo@mail.ru

Представлен результат испытаний нового источника излучения для проведения термовакуумных испытаний космических аппаратов на основе волоконных лазеров, излучающих на длине волны 1,07 мкм.

Ключевые слова: наземная экспериментальная отработка КА, термовакуумные испытания, система локального нагрева.

TESTS OF LOCAL HEATING LASER SYSTEM

A. V. Hahlenkov^{1*}, A. A. Kishalov²

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

*E-mail: hahlenkov@iss-reshetnev.ru

RPA of fiber optic and laser equipment,
4-6, 17-th line of Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199034, Russian Federation

E-mail: grinfo@mail.ru

This material presents the result of testing a new radiation source for thermal vacuum testing of spacecraft based on ytterbium lasers.

Keywords: ground-based experimental testing of spacecraft, thermal vacuum tests, local heating system.

В ходе термовакуумных испытаний космических аппаратов испытательный комплекс должен обеспечивать такие параметры как вакуум определенного качества, наличие азотных криогенных экранов с определенными температурами и характеристиками поверхности, возможность проведения измерения температурных значений, давления среды вокруг КА, возможность управления имитаторами тепловых потоков [1]. При этом требуемое распределение температур на объекте испытаний может содержать большое количество контролируемых точек и высокие градиенты температур.

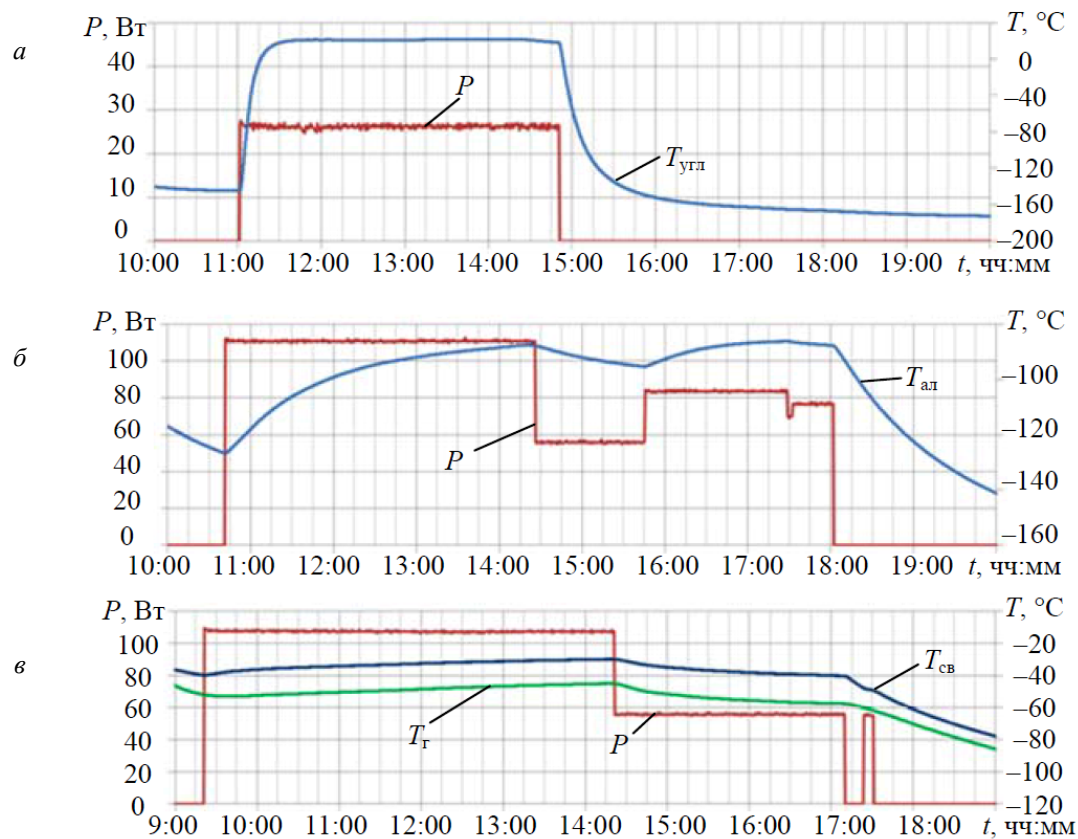
В качестве источников излучения имитирующих тепловые потоки обычно применяются нагреватели на базе инфракрасных галогеновых ламп, из которых собираются панели фонового теплового потока или устройства локального нагрева [2; 3]. Однако существуют контрольные точки, расположенные в оптически труднодоступных местах. Обеспечение температурных режимов таких точек галогеновыми лампами невозможно ввиду того, что лампа рассеивает тепловой поток на относительно большую площадь.

ООО «НПП Волоконно-оптического и лазерного оборудования» г. Санкт-Петербург предложило новый источник излучения на основе иттербиевых волоконных лазеров, излучающих на длине волны

1,07 мкм. На основе этих источников разработана и изготовлена система локального нагрева, содержащая 20 источников излучения с выходной мощностью 110 Вт, предназначенная для работы в качестве испытательного оборудования.

Испытания лазерной системы локального нагрева проведены на территории АО «ИСС» г. Железногорск в составе вакуумной установки ГВУ-600. В качестве образцов использованы детали из листового алюминиевого сплава и сотовые панели с алюминиевой и углепластиковой обшивками.

Ниже приведены полученные при испытаниях зависимости температуры образцов (T) от мощности лазерного излучения (P) и времени воздействия (t). На рисунке, *a* показано влияние облучения лицевой стороны сотовой панели с углепластиковой обшивкой на температуру поверхности обратной ее стороны ($T_{\text{угл}}$). На рисунке, *b* показано влияние облучения на разных уровнях мощности лицевой стороны сотовой панели с алюминиевой обшивкой на температуру обратной ее стороны ($T_{\text{ал}}$). На рисунке, *в* показана зависимость температуры оптической формирующей головки (T_f) и защитной рубашки световода ($T_{\text{св}}$) от мощности лазерного излучения (P), иллюстрирующая тот факт, что головка оптическая формирующая не является вторичным источником излучения [4].



Зависимость температуры от мощности лазерного излучения и времени воздействия

Технические характеристики системы локальных нагревателей с фокусировкой пятна, подтвержденные при испытаниях в АО «ИСС» позволяют использовать источники излучения на основе иттербиевых лазеров в качестве имитаторов локального нагрева существенно расширяя возможности испытательных комплексов.

Библиографические ссылки

- ГОСТ Р 56469–2015. Аппараты космические автоматические. Термобалансные и термовакуумные испытания : утв. и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 июня 2015 г. № 707-ст.
- Куликов Д. С., Бирюк В. В., Моисеев В. В. Экспериментальное исследование теплового режима трубчатой галогенной лампы накаливания // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2019. № 56. С. 92.
- Анализ возможности создания имитатора солнечного излучения на основе светодиодных источников для наземной отработки космических аппаратов / Г. В. Двирный, А. А. Шевчук, В. В. Двирный и др. // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19. С. 271.
- Лазерная система локального нагрева для термовакуумных испытаний космических аппаратов / А. А. Кишалов, В. М. Журба, А. Г. Попов и др. // Известия вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 8. С. 739–748.

References

- GOST R 56469–2015. *Apparaty kosmicheskie avtomaticheskie. Termobalansnye i termovacuurnye ispytania: utverjden I vveden v deistvie Prikazom Federal'nogo agenstva po tehničeskomu regulirovaniju I metrologii ot 15 iunja 2015 g. № 707-st.* [Automatic spacecraft. Thermal balance and thermal vacuum tests].
- Kulikov D. S., Biryuk V. V., Moiseev V. V. *Ekspperimentalnoe issledovanie teplovogo rejima trubchatoi galogennoi lampy nakalivaniya* [Experimental study of the thermal conditions of a tubular halogen incandescent lamp] // Vestnik PNIPIU. Aerokosmicheskaya tehnika. 2019. № 56. P. 92.
- Analiz vozmojnosti sozdaniya imitatora solnechnogo izlucheniya na osnove svetodiodnyh istochnikov dlya nazemnoi otrabotki kosmicheskikh apparatov* [Analysis of the possibility of creating a solar radiation simulator based on LED sources for ground-based testing of spacecraft] / G. V. Dvirnyi, A. A. Shevchuk, V. V. Dvirnyi et al. // *Sibirskii jurnal nauki I tehnologii* [Siberian journal of science and technology]. 2018. Vol. 19. P. 271.
- Lazernaya Sistema lokalnogo nagreva dlya termovacuurnyh ispytanii kosmicheskikh apparatov* [Laser local heating for thermal vacuum testing of spacecraft] / A. A. Kishalov, V. M. Jurba, A. G. Popov et al. // *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [News of universities. Instrumentation]. 2020. Vol. 63, № 8. P. 739–748.



Секция

**«МАЛЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ:
ПРОИЗВОДСТВО, ЭКСПЛУАТАЦИЯ
И УПРАВЛЕНИЕ»**

УДК 629.78.05

ИННОВАЦИОННЫЕ КВАРЦЕВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

П. Л. Евграфов

ООО «ИТР»

Российская Федерация, 191028, г. Санкт-Петербург, Литейный просп., 22, помещение 10Н

E-mail: Evgrafov.Pavel@intech-rus.com

Перспективная отрасль развития малых космических аппаратов требует разработки новых электронных компонентов, сочетающих в себе повышенную надежность с выгодной ценой. Появление на рынке новой серии кварцевых генераторов позволяет обеспечить высокие технико-эксплуатационные характеристики и высокую стойкость к воздействию спецфакторов, что является критическим для применения в бортовой аппаратуре.

Ключевые слова: кварцевый генератор, малый космический аппарат, надёжность, бортовое оборудование КА.

INNOVATIVE QUARTZ GENERATORS FOR ON-BOARD EQUIPMENT OF SMALL SATELLITES

P. L. Evgrafov

ITR Ltd

22, Liteiny prospekt, Saint-Petersburg, 191028, Russian Federation

E-mail: Evgrafov.Pavel@intech-rus.com

Promising trend towards small satellites requires new electronic components that combine increased reliability with a competitive price. Launch of a new series of quartz oscillators on the market provides high technical and operational parameters with high tolerance to radiation and harsh environment, which is critical for use in on-board equipment.

Keywords: quartz generator, small satellite, reliability, spacecraft on-board equipment.

Приоритетными направлениями деятельности новозеландской компании Rakon являются разработка и производство компонентов для военных и космических применений. Кварцевые изделия компании Rakon были успешно применены во многих международных космических миссиях, самыми известными из которых являются GlobalStar, Sentitel, Galileo, Rosetta, JUNO, EgyptSat, ATV и т. д. [1–3].

В настоящее время компания Rakon активно развивает новую линейку (New Space) кварцевых генераторов и подсистем, оптимизированную для применения в составе бортовой аппаратуры космических аппаратов, рассчитанных на ограниченный срок активного существования (САС).

Целевым рынком применения компонентов линейки New Space является формат малых и сверхмалых искусственных спутников Земли Cubesat, в которых обычно используются стандартные комплектующие класса COTS. Для данного сегмента рынка Rakon предлагает ряд инновационных продуктов, сочетающих в себе повышенную стойкость к воздействию спецфакторов с выгодной ценой. Изделия New Space обладают стойкостью к радиации уровня Rad-Tolerant, имеют компактные размеры и низкое энергопотребление, что является критическим фактором для применения в бортовой аппаратуре [4; 5].

Надежность изделий новой линейки генераторов подтверждена программой испытаний в соответствии с требованиями Европейского Космического Агентства (ESA). В докладе будет представлен обзор новых кварцевых генераторов для малых космических аппаратов, представлены их преимущества по сравнению с традиционными решениями, а также будут даны примеры применения в различных космических миссиях.

Библиографические ссылки

1. Романов А. А., Селиванов А. С., Тюлин А. Е. Перспективы разработки малоразмерных космических аппаратов различного целевого назначения АО «Российские космические системы» // Известия вузов. Приборостроение. 2016. № 6.

2. Radiation Environment and its Effects in EEE Components and Hardness Assurance for Space Applications [Электронный ресурс]. URL: https://indico.cern.ch/event/635099/contributions/2570674/attachments/1456398/2249969/Radiation_Effects_and_RHA_ESA_Course_9-10_May_2017_TID_MP_FINAL_WIN.pdf (дата обращения: 12.05.2020).

3. Старченко А. Е. Оптимизация поглощенной дозы радиации при перелётах на геостационарную орбиту с малой тягой (РКК «Энергия» им. С. П. Королёва), Московский физико-технический институт

(государственный университет) [Электронный ресурс]. URL: <https://mipt.ru/upload/medialibrary/c44/192-204.pdf> (дата обращения: 12.05.2020).

4. Талеро К. И., Улимов В. Н., Членов А. М. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения [Электронный ресурс]. URL: <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785001014454.html> (дата обращения: 12.05.2020).

5. Белоус А. И., Солодуха В. А., Шведов С. В. Космическая электроника. М. : Техносфера, 2015. 697 с.

References

1. Romanov A. A., Selivanov A. S., Tyulin A. E. Perspectives of small size spacecraft development for various purposes at JSC Russia Space Systems // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*. 2016. № 6.

2. Radiation Environment and its Effects in EEE Components and Hardness Assurance for Space

Applications [Electronic resource]. URL: https://indico.cern.ch/event/635099/contributions/2570674/attachments/1456398/2249969/Radiation_Effects_and_RHA_ESA_Course_9-10_May_2017_TID_MP_FINAL_WIN.pdf (access: 12.05.2020).

3. Starchenko A. E. Optimization of the total radiation dose on flights to a geostationary orbit with a low drive, Moscow Institute of Physics and Technology (State University) [Electronic resource]. URL: <https://mipt.ru/upload/medialibrary/c44/192-204.pdf> (access: 12.05.2020).

4. Tapero K. I., Ulimov V. N., Chlenov A. M. Radiation effects in silicon integrated circuits for space applications [Electronic resource]. URL: <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785001014454.html> (access: 12.05.2020).

5. Belous A. I., Solodukha V. A., Shvedov S. V. Space electronics. M. : Technosphere, 2015, 697 p.

© Евграфов П. Л., 2020

УДК 629.78

АРХИТЕКТУРА БОРТОВОЙ КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ МНОГОЦЕЛЕВОЙ ПЛАТФОРМЫ «СИНЕРГИЯ» БЛОЧНО-МОДУЛЬНОГО ТИПА

Д. В. Малыгин

Лаборатория «Астрономикон»
Российская Федерация, 192286, г. Санкт-Петербург, Альпийский переулок, 29, оф. 403
E-mail: Malygin.DV@astronomikon.ru

Представлена технология построения и архитектура бортовой кабельной сети многоцелевой платформы «Синергия» блочно-модульного типа.

Ключевые слова: малый космический аппарат, наноспутник, пикоспутник, платформа, CubeSat, бортовая кабельная сеть, USB-C.

THE ARCHITECTURE OF ON-BOARD CABLE NETWORK MULTI-PURPOSE BLOCK-MODULAR PLATFORM “SYNERGY”

D. V. Malygin

“Astronomikon Lab.”
29, of. 403, Alpiyskiy alley, St. Petersburg, 192286, Russian Federation
E-mail: Malygin.DV@astronomikon.ru

The paper considers a technology of design and architecture the on-board cable network of multi-purpose block-modular platform “Synergy” for assembling nanosatellites is presented.

Keywords: smal spacecraft, nanosatellite, pikosatellite, platform, CubeSat, cable network, USB-C.

Представим кратко концептуальные основы нового направления развития миниатюризации комплектующих космических аппаратов сверхмалого класса (СМКА, наноспутник). То есть рассмотрим возможные области целевого применения и аспекты технической реализации общедоступной электронно-компонентной базы (ЭКБ *COTS*) класса «*industrial*» по основным составляющим бортовой кабельной сети (БКС) наноспутника: корпусное исполнение, энергетика, интерфейс, стандартизация и унификация.

Новые технологии ведения космических исследований базируются в значительной мере на идеях о доступных и удобных инструментах, позволяющих различным потребителям: НИИ, КБ, вуз, отдельный исследовательский коллектив, реализовать научные, технологические и образовательные эксперименты в космическом пространстве.

Главным принципом применения таких инструментов в данном случае становится привлечение минимально необходимых средств и ресурсов [1].

Одним из типов таких технологий, вызывающего особый интерес в последнее время, стали наноспутники, построенные по стандарту CubeSat. Известные проекты СМКА разработаны или разрабатываются в большинстве своем для целей проведения исследовательских и технологических экспериментов, при этом являются спутниками одного эксперимента, хотя в концептуальном плане просматриваются различные варианты многоэтапного целевого применения, в том числе в качестве долгосрочных космических миссий [2].

Очевидно, что содержание решаемых задач будет зависеть от уровня применяемой ЭКБ. При этом в качестве важного отличительного свойства стоит выделить аппаратную и программную возможность реконфигурации конечного изделия. Так как большинство наноспутников – изделие одного эксперимента, как отмечалось ранее, то такой концепт трудно достижим [3]. Однако, для решения этой задачи в платформе «Синергия» применена иная структура БКС в отличие от большинства СМКА.

Применяемый разъем *PC-104* для БКС формирует определенные проблемы при сборке конечного устройства: отсутствие симметрии, наличие дополнительных разъемов при подключения кабельных сборок, для работы с изделием необходимы дополнительные переходники и т. п. (рис. 1).

В противовес представленным проблемам в основе платформы «Синергия» положен блочно-модульный принцип построения наноспутника из типовых служебных систем и полезной нагрузки, позволяющий формировать масштабируемую архитектуру и технические характеристики аппарата по принципу конструктора. Подход основан на применении открытых *PnP* [4] спецификациях (построение бортовой кабельной сети по принципу компьютерной технологии *Plug-n-Play*), описывающих механические, электрические, информационные интерфейсы между служебными системами и полезной нагрузкой. Таким образом подход *PnP* пронизывает всю архитектуру платформы «Синергия» по умолчанию.

Для реализации и отработки такой технологии БКС служебных и целевых систем было разработано несколько устройств: БКУ «Гидра» [5], БРТК «Полиморф» [6], СТК «Интер» [7]. На основе полученного опыта сформирован окончательный облик структуры БКС (рис. 2).

Ключевым компонентом БКС является разъем *USB-C* [8]. В отличие от различных промышленных

соединителей, разъем *USB-C* симметричен по горизонтали и подключается к устройству любой стороной (рис. 3). Более того такое подключение позволяет управлять электропитанием и скоростью передачи данных (возможно внедрить любые интерфейсы), а также дает возможность без дополнительных переходников работать на прямую с конечным изделием (рис. 4).

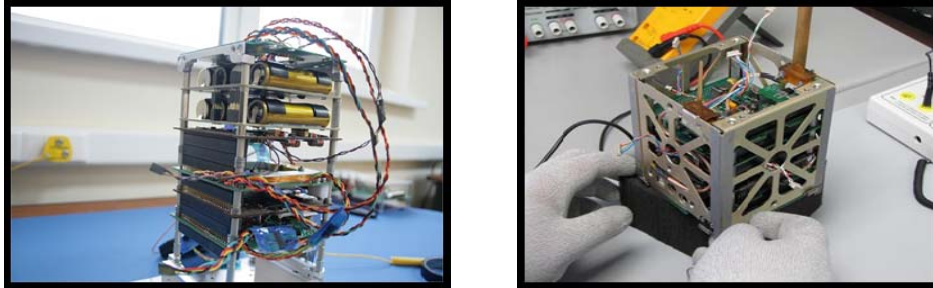


Рис. 1. Применяемый разъем PC-104 CMKA

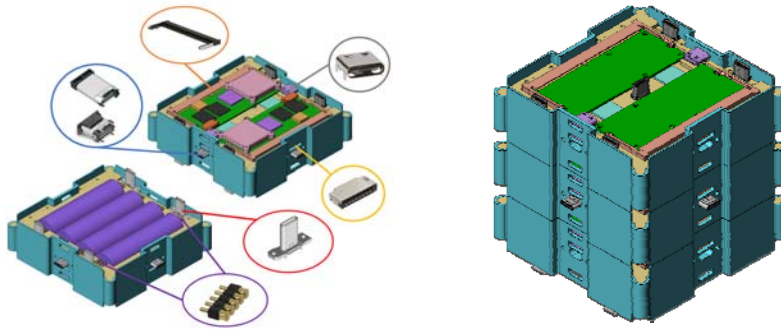


Рис. 2. Внешний вид сборки типовой служебной системы

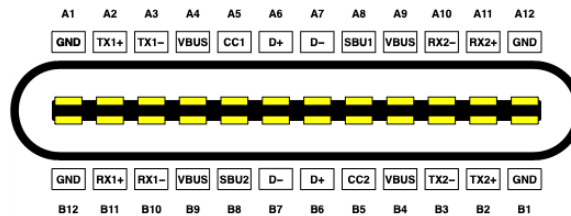


Рис. 3. Конфигурация разъема *USB-C*

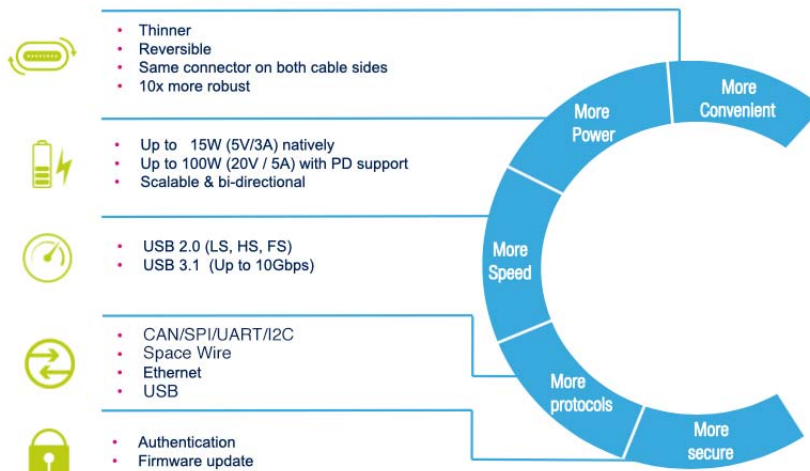


Рис. 4. Архитектура разъема *USB-C* БКС платформы «Синергия»

Библиографические ссылки

1. Каширин А. В., Глебанова И. И. Анализ современного состояния рынка наноспутников как подрывной инновации и возможностей его развития в России // Молодой учёный : Междунар. научный журнал. 2016. № 7 (111). С. 855–867.
2. Сайт [Электронный ресурс]. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.11.002> (дата обращения: 10.05.2020).
3. БКС SAMSAT-QB50 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29668944> (дата обращения: 10.05.2020).
4. Plug-n-Play [Электронный ресурс]. URL: https://www.en.wikipedia.org/wiki/Plug_and_play (дата обращения: 10.05.2020).
5. БКУ «Гидра» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32290852> (дата обращения: 10.05.2020).
6. БРТК «Полиморф» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29871618> (дата обращения: 10.05.2020).
7. СТК «Интер» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37539938> (дата обращения: 10.05.2020).
8. USB-C [Электронный ресурс]. URL: <https://www.usb.org/sites/default/files/USB%20Type-C%20Spec%20R2.0%20-%20August%202019.pdf> (дата обращения: 10.05.2020).

References

1. Kashirin A. V., Glebanova I. I. Analiz sovremennogo sostoyaniya rynka nanospudnikov kak podryvnoy innovatsii i vozmozhnostey ego razvitiya v Rossii // Molodoy uchënyy : Mezhdunar. nauchnyy zhurnal. 2016. № 7 (111). P. 855–867.
2. [Electronic resource]. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.11.002> (access: 10.05.2020).
3. OBCN SAMSAT-QB50 [Electronic resource]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29668944> (access: 10.05.2020).
4. Plug-n-Play [Electronic resource]. URL: https://www.en.wikipedia.org/wiki/Plug_and_play (access: 10.05.2020).
5. OBC «Hydra» [Electronic resource]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32290852> (access: 10.05.2020).
6. OBT «Polymorph» [Electronic resource]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29871618> (access: 10.05.2020).
7. TCS «Inter» [Electronic resource]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37539938> (access: 10.05.2020).
8. USB-C [Electronic resource]. URL: <https://www.usb.org/sites/default/files/USB%20Type-C%20Spec%20R2.0%20-%20August%202019.pdf> (access: 10.05.2020).

© Малыгин Д. В., 2020

ВНУТРЕННИЙ ТЕПЛОВОЙ АНАЛИЗ НАНОСПУТНИКА НА БАЗЕ ПЛАТФОРМЫ «СИНЕРГИЯ»

Д. В. Малыгин, О. Я. Яковлев

Лаборатория «Астрономикон»
Российская Федерация, 192286, г. Санкт-Петербург, Альпийский переулок, 29, оф. 403
E-mail: Malygin.DV@astronomikon

Представлена методика проведения внутреннего теплового анализа наноспутника, построенного на базе многоцелевой платформы «Синергия» блочно-модульного типа.

Ключевые слова: малый космический аппарат, наноспутник, пикоспутник, платформа, CubeSat, тепловой анализ.

INTERNAL THERMAL ANALYSIS OF THE NANOSATELLITE BASED ON BLOCK-MODULAR MULTIPURPOSE PLATFORM “SYNERGY”

D. V. Malygin, O. Ya. Yakovlev

“Astronomikon Lab.”
29, of. 403, Alpiyskiy alley, St. Petersburg, 192286, Russian Federation
E-mail: Malygin.DV@astronomikon.ru

The paper considers a technique for conducting internal thermal analysis of a nanosatellite based on multi-purpose block-modular platform “Synergy” is presented.

Keywords: smal spacecraft, nanosatellite, pikosatellite, platform, CubeSat, thermal analysis.

Срок активного существования наноспутника составляет от месяца до нескольких лет на низких околоземных орбитах (НОО) для решения целевой задачи космического комплекса совместно с наземным комплексом управления (НКУ). Состав, устройство и параметры орбиты КА определяются, в первую очередь, его назначением и воздействующими на него факторами космического пространства (которые, в свою очередь, зависят от параметров орбиты) [1]. К таким факторам относятся: глубокий вакуум и невесомость, инерционные и тепловые нагрузки, ионизирующее излучение и магнитное поле Земли, а также микрометеороиды. Для обеспечения работоспособности целевой системы в этих условиях и взаимодействия КА с НКУ на орбите в состав КА входят служебные системы. Системы (см. таблицу) могут состоять из подсистем, выполняющих определенные задачи, соответствующие цели системы КА, к которой они относятся. Подсистемы, в свою очередь, состоят из электронно-компонентной базы (ЭКБ), механизмов и элементов конструкции.

Существует множество вариантов декомпозиции космических аппаратов с применением различной терминологии. Элементы КА, выполняющие определенные функции, в разных источниках могут относиться к разным системам и по-разному называться [2]. Для определенности в настоящей работе излагается один из вариантов, который ориентирован на описание устройства наноспутника. К уровню «системы» отнесены (см. таблицу) целевая система, корпус и 8 служебных систем: 4 системы для обеспечения

условий функционирования (СЭО, СОС, СОТР, ДУ), 4 системы для взаимодействия КА с НКУ и систем между собой (БРТК, СТК, БКУ, БКС).

Под температурным режимом наноспутника подразумевается его температурное поле, которое обусловлено внешними и внутренними (в смысле источников по отношению к корпусу) тепловыми нагрузками и его физическими свойствами. Внутренние тепловыделения в системах наноспутника определяются устройством и функционированием их подсистем. Тепловой расчет каждой подсистемы имеет свои особенности и зависит от режимов работы системы к которой она относится [3]. Наибольшие тепловые потоки производят СЭО, БРТК и БКУ.

В статье представлена методика расчета тепловыделений для электронных компонентов, которые могут входить в разные подсистемы, и отдельно для наиболее значимых подсистем с точки зрения теплового анализа. Для теплового расчета конкретных элементов используются спецификации, в которых представлена информация разного вида. В некоторых из них указывается значение мощности рассеиваемой в окружающее пространство тепловой энергии (тепловыделений) для определенных режимов работы элементов, а для большинства известны только их входные, выходные и физические параметры. На основании этой информации, а также физических принципов и режимов работы рассматриваемых элементов, необходимо определить их мощность тепловыделений, что позволит в дальнейшем определить температурный режим КА.

Структура наноспутника

		1. Наноспутник				
2. Системы		3. Подсистемы				
1	Целевая система (полезная нагрузка, ПН)	Целевая аппаратура	Интерфейс полезной нагрузки			
С л у ж е б н ы е	2	Система энергообеспечения (СЭО)	Солнечные батареи (СБ)	Аккумуляторные батареи (АКБ)	Модуль управления энергетическими потоками	Система электропитания (СЭП)
	3	Система ориентации и стабилизации (СОС)	Исполнительные органы	Контрольно-измерительные приборы (КИП)	Вычислительный модуль Силовые драйверы	(Навигационная аппаратура)
	4	Система обеспечения теплового режима (СОТР)	Средства активного терморегулирования	Средства пассивного терморегулирования	Контрольно-измерительные приборы (КИП)	
	5	Двигательная установка (ДУ)	Двигатель	Система хранения и подачи рабочего тела	Модуль управления	
	6	Бортовой радиотехнический комплекс (БРТК)	Антенно-фидерное устройство (АФУ)	Трансивер	Бортовой маяк (БМ)	Память
	7	Система телеметрического контроля (СТК)	Контрольно-измерительные приборы (КИП)	Вычислительный модуль	Аналогово-цифровые преобразователи (АЦП) и ЦАП	
	8	Бортовой комплекс управления (БКУ)	Бортовая цифровая вычислительная машина (БЦВМ)	Навигационная аппаратура (НАП)	Контрольно-измерительные приборы (КИП)	Память
	9	Бортовая кабельная сеть (БКС)	Интерфейсы	Коммутационные разъемы		
	10	Корпус	Силовой набор	Крепежная фурнитура		

В общем случае для элемента наноспутника можно записать баланс энергии в виде равенства подводимой энергии $E_{вх}$ сумме полезной работы $E_{раб}$ и тепловой энергии E_T , часть которой расходуется на нагрев элемента $E_{наг}$, а другая рассеивается в виде тепла в окружающее пространство $E_{рас}$:

$$E_{вх} = E_{раб} + E_T = E_{раб} + E_{наг} + E_{рас}. \quad (1)$$

Для стационарного теплового режима, когда температура элемента не изменяется в рассматриваемом промежутке времени, $E_{наг} = 0$ и тогда мощность рассеиваемой тепловой энергии P_T определяется:

$$P_T = P_{вх} - P_{раб} = (1 - \eta) P_{вх}, \quad (2)$$

где $P_{вх}$ – подводимая мощность, $P_{раб}$ – мощность полезной работы, η – КПД рассматриваемого элемента.

В случае если известно тепловое сопротивление элемента θ (К/Вт) и перепад максимальной рабочей температуры $T_{раб}^{max}$ относительно температуры окружающей среды T_{oc} , то оценить максимальную мощность тепловыделений можно следующим образом:

$$P_m^{max} = \frac{T_{раб}^{max} - T_{oc}}{\theta}. \quad (3)$$

Библиографические ссылки

1. База данных миссий наноспутников [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nanosats.eu/database> (дата обращения: 10.05.2020).
2. Малыгин Д. В. Многоцелевая платформа «Синергия» блочно-модульного типа для сборки наноспутников // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61, вып. 8. С. 692–700.
3. Атамасов В. Д. Системы обеспечения тепловых режимов космических аппаратов : учеб. пособие. СПб. : Балт. гос. техн. ун-т., 2017.

References

1. Database nanosatellites missions [Electronic resource]. URL: <https://www.nanosats.eu/database> (access: 10.05.2020).
2. Malygin D. V. *Mnogocелеvaya platforma «Siner-giya» blochno-modul'nogo tipa dlya sborki nanosputnikov* [Multi-purpose block-modular type platform «Synergy» for nanosatellites assembling] // Journal of Instrument Engineering. 2018. Vol. 61, № 8. P. 692–700. (In Russ.)
3. Atamasov V. D. *Sistemy obespecheniya teplovykh rezhimov kosmicheskikh apparatov* [Systems for providing thermal conditions of spacecraft]. SPb. : Baltic State Technical University, 2017. (In Russ.)



Секция

**«ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ
И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ
ДЛЯ МОНИТОРИНГА И МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ»**

**АНАЛИЗ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОЛИГРАФА УССУРИЙСКОГО
В ЛЕСАХ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ
ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

В. Л. Авдеенок*, В. П. Тубольцев

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

*E-mail: avdeyonok@gmail.com

Рассматриваются результаты ГИС-анализа о повреждениях лесных массивов полиграфом уссурийским на территории Красноярского края на основе данных дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: полиграф уссурийский, дистанционное зондирование Земли, ГИС-анализ.

**ANALYSIS OF ACTIVITIES OF THE USSURIISKY POLYGRAPH IN FORESTS
OF KRASNOYARSKY KRAI ACCORDING TO REMOTE SENSING DATA**

V. L. Avdeenok*, V. P. Tuboltsev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: avdeyonok@gmail.com

The article consider the results of GIS-analysis of damage to forest tracts by the ussuriisky polygraph on the territory of Krasnoyarsk Krai on the basis of remote sensing data.

Keywords: the ussuriisky polygraph, remote sensing of the Earth, GIS-analysis.

Введение. Эффективное использование природных ресурсов требует развития информационных средств за их контролем. Наиболее совершенными средствами исследования природных ресурсов являются методы дистанционного зондирования (ДЗ) с привлечением аэрокосмических аппаратов. Поэтому реализация средств комплексного ГИС-анализа данных дистанционного зондирования, обеспечивающих оперативность получения требуемой информации и поддержку в принятии управленческих решений и их применение позволяет значительно повысить точность и оперативность решения задач принятия решений [1; 2].

В работе рассматривается анализ полученных данных в результате ГИС-анализа поведения полиграфа уссурийского на территории Красноярского края, а также оценивание ущерба древостоев, нанесенного в результате массового размножения и распространения полиграфа уссурийского.

ГИС-анализ. Была создана мозаика из продуктов ЦМР LP DAAC SRTMGL3, а также на основе классификации мультимедийной мультиспектральной космической в которой показаны площади поврежденных лесных массивов полиграфом уссурийским был произведен ГИС-анализ, который отображает общую площадь повреждений, распределение поврежденных древостоев по азимутальным направлениям, по высо-

те, по крутизне и кривизне поверхности, а также среднюю температуру в летний период на территориях вспышек.

Результаты применения. На основе данных ГИС-анализа было установлено, что в период распространения полиграфа уссурийского с 2011 по 2018 гг., было повреждено свыше 893 000 га. Основными характеристиками распространения полиграфа уссурийского можно считать:

1. Высотная распространенность составляет от 200 до 700 метров, где 200–300 составляет основной объем повреждений.

2. Основная масса поврежденных древостоев приходится на древостои крутизной от 0 до 5 градусов.

3. Наибольший объем повреждений зафиксированы на северных, северо-западных, северо-восточных, западных и восточных склонах на протяжении всего периода исследования.

4. На территории распространения полиграфа уссурийского в период с 2010 по 2019 года средняя летняя температура возросла примерно на 0,64 °С. Из этого можно сделать вывод что, климат стал теплее, что, вероятно, могло стать благоприятным условием для начала распространения полиграфа уссурийского на исследуемой территории.

На рис. 1–6 графически изображены результаты ГИС-анализа.



Рис. 1. График пространственно-временного распределения поврежденных древостоев полиграфа уссурийским по годам



Рис. 2. График пространственно-временного распределения поврежденных лесных массивов по азимутальным направлениям

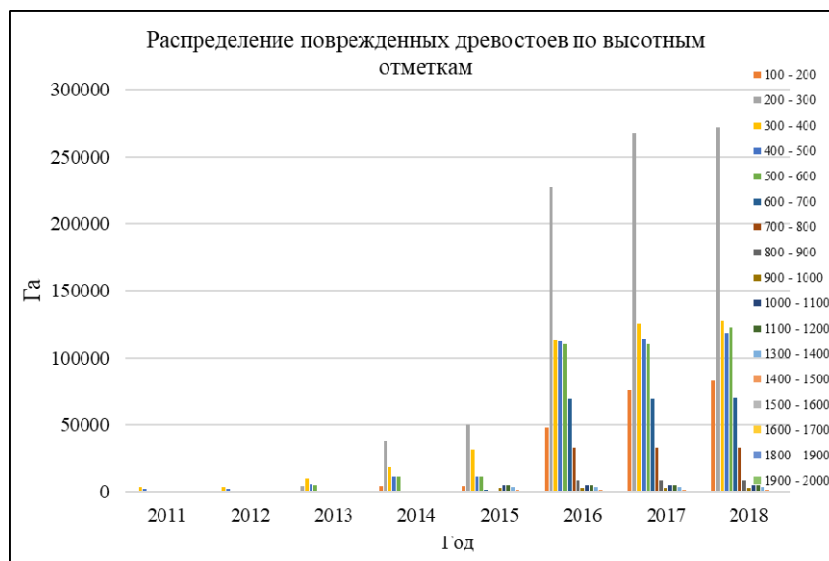


Рис. 3. График распределения поврежденных древостоев по высотным отметкам



Рис. 4. График распределения поврежденных древостоев полиграфом уссурийским по крутизне поверхности



Рис. 5. График пространственно-временного распределения поврежденных древостоев по кривизне поверхности



Рис. 6. График динамики средней температуры на территорию исследования

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. Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным много-спектральных спутниковых измерений / С. А. Барталев, В. А. Егоров, А. М. Крылов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 3. С. 215–225.
4. Использование данных дистанционного зондирования Земли [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kspu.edu/FileDownload.ashx/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%8F%20%D0%94%D0%97%D0%97.pdf> (дата обращения: 06.09.2020).
5. Дистанционное зондирование Земли [Электронный ресурс]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/ Дистанционное_зондирование_Земли](https://ru.wikipedia.org/wiki/Дистанционное_зондирование_Земли) (дата обращения: 06.09.2020).

References

1. Tsypkin Ya. Z. Fundamentals of Learning Systems Theory. M. : Nauka, 1970. P. 251
2. Vasliev V. I., Esh S. N. Peculiarities of the Algorithms of Self-Learning and Clasterization // Control systems and machines. 2011. № 3. P. 3–9
3. The Evaluation of Possibilities to Assess a Few Years After the Fire Forest Burnt Severity Using Multi-Spectral Satellite Data / S. A. Bartalev, V. A. Egorov, A. M. Krylov [et al.] // Information Technologies in Remote Sensing of the Earth. 2010. T. 7, № 3. P. 215–225.
4. Using remote sensing data [Electronic resource]. URL: <http://www.kspu.edu/FileDownload.ashx/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%8F%20%D0%94%D0%97%D0%97.pdf> (access: 06.09.2020).
5. Remote sensing [Electronic resource]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Remote_sensing (access: 06.09.2020).

© Авдеенок В. Л., Тубольцев В. П., 2020

НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ КОМПЛЕКСНОГО ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

А. В. Бахтина

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

Предлагается методика оценивания состояний природных объектов и степени надёжности принимаемых решений по данным дистанционного зондирования. Её основу составляют непараметрические алгоритмы обработки информации ядерного типа.

Ключевые слова: непараметрические алгоритмы распознавания образов, ядерные оценки плотности вероятности, оценивания состояний природного объекта, надёжность решений, данные дистанционного зондирования.

MODIFICATION OF A NONPARAMETRIC ALGORITHM FOR AUTOMATIC CLASSIFICATION OF LARGE VOLUME STATISTICAL DATA

A. V. Bakhtina

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

A method is proposed for evaluating the state of natural objects and the degree of reliability of decisions made based on remote sensing data. It is based on nonparametric algorithms for processing information of the kernel type.

Keywords: nonparametric algorithms of pattern recognition, kernel estimators of probability density, evaluating the state of a natural object, reliability of decisions, remote sensing data.

Непараметрические алгоритмы распознавания образов, основанные на оценках плотности вероятности типа Розенблатта – Парзена, широко используются при исследовании объектов различной природы в условиях априорной неопределённости [1-3].

В данной работе рассматривается их использование при оценивании состояний объектов по данным дистанционного зондирования.

Предлагается модификация непараметрического алгоритма распознавания образов, применение которого позволяет оценивать не только состояние объекта исследования, но и надёжность принимаемого решения.

Пусть при обработке данных дистанционного зондирования имеется обучающая выборка $V = (x_1^i, \dots, x_k^i, \sigma(i), i = \overline{1, n})$, составленная из спектральных данных $x = (x_1, \dots, x_k)$ элементов земной поверхности и указаний об их принадлежности к классам $\Omega_j, j = \overline{1, M}$. Классы определяют свойства элементов земной поверхности. Например, типы лесных массивов по степени усыхания.

Сформируем по обучающей выборке V непараметрическое решающее правило классификации

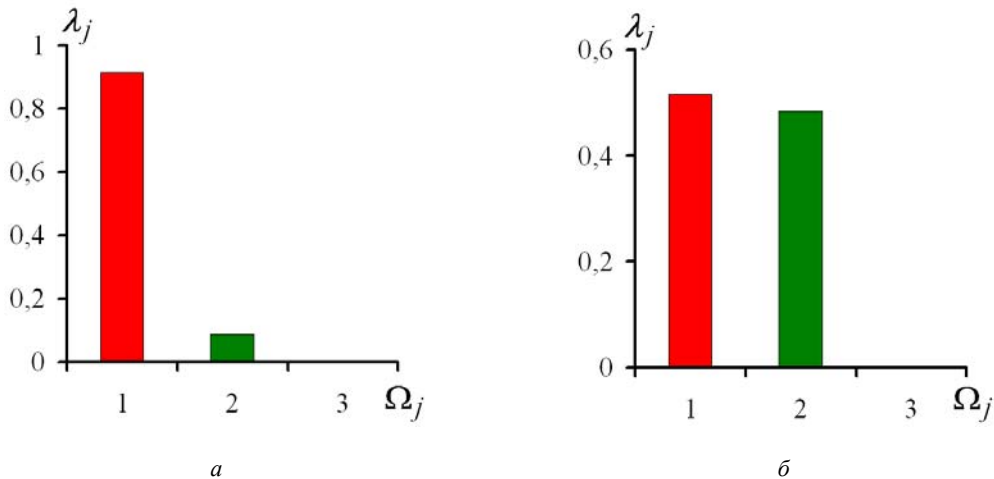
$$\bar{m}(x): x \in \Omega_j, \text{ если } \bar{p}_j(x) = \max_{t=\overline{1, M}} \bar{p}_t(x), \quad (1)$$

$$\text{где } \bar{p}_t(x) = \left(n_t c^k \prod_{v=1}^k \sigma_v^t \right)^{-1} \sum_{i \in I_t} \prod_{v=1}^k \Phi \left(\frac{x_v - x_v^i}{c \sigma_v^t} \right), \quad t = \overline{1, M} -$$

непараметрическая оценка плотности вероятности распределения x в t -ом классе. Здесь I_t – множество номеров ситуаций из V , принадлежащих классу Ω_t , а n_t – их количество. Ядерные функции $\Phi(u_v)$ удовлетворяют условиям положительности, симметричности и нормированности. Коэффициенты размытости ядерных функций $c_v^t = c \sigma_v^t$ убывают с ростом объёма n_t ; σ_v^t – среднее квадратическое отклонение наблюдений $x_v, v = \overline{1, k}$ в классе $\Omega_t, t = \overline{1, M}$.

Оптимальный параметр c коэффициента размытости определяется из условия минимума оценки вероятности ошибки распознавания образов, например, в режиме «скользящего экзамена» [1], либо используя «быстрые» алгоритмы оптимизации [5; 6].

В соответствии с решающим правилом (1) спектральные данные $x = (x_1, \dots, x_k)$ контрольного элемента земной поверхности относятся к классу Ω_j (состоянию объекта исследования) с максимальной оценкой плотности вероятности $\bar{p}_j(x)$. Если в условиях x существуют несколько плотностей вероятности, которые не равны нулю, то возникает проблема оценивания надёжности принимаемых решений $x \in \Omega_j$.



Результаты оценивания состояний древостоев при $x_1 = 46$, $x_2 = 20$, $x_3 = 14$, $x_4 = 77$, $x_6 = 26$,
которые отличаются значениями $x_5 = 71$ (а), $x_5 = 67$ (б)

Для решения этой задачи предлагается рассчитывать степень принадлежности принимаемому решению

$$\lambda_j = \bar{p}_j(x) / \sum_{t=1}^M \bar{p}_t(x).$$

Значение λ_j принадлежит интервалу $[0; 1]$.

Предлагаемая методика использовалась при оценивании состояний лесных массивов: темнохвойный лес (Ω_3), усыхающие (Ω_2) и сухие древостои (Ω_1).

Элементы земной коры характеризовались шестью спектральными признаками $x = (x_1, \dots, x_6)$, которым соответствуют следующие длины волн (нанометры): 450–515 (x_1), 525–600 (x_2), 630–680 (x_3), 845–885 (x_4), 1560–1660 (x_5), 2100–2300 (x_6). Пример контрольного расчёта приведён на рис. 1. Столбец красного цвета соответствует состоянию Ω_1 , а зелёного – состоянию Ω_2 . Высота столбцов определяет степень принадлежности участка древостоев их состояниям Ω_1, Ω_2 .

Библиографические ссылки

1. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрические алгоритмы оценивания состояний природных объектов // *Автометрия*. 2018. Т. 54, № 5. С. 33–39.
2. Непараметрический алгоритм выделения классов, соответствующих одномодальным фрагментам плотности вероятности многомерных случайных величин / А. В. Лапко, В. А. Лапко, С. Т. Им и др. // *Автометрия*. 2019. Т. 55, № 3. С. 22–30.
3. Лапко А. В., Лапко В. А. Методика проверки гипотез о распределениях многомерных спектральных данных с использованием непараметрического алгоритма распознавания образов // *Компьютерная оптика*. 2019. Т. 43, № 2. С. 238–244.
4. Программные средства реализации непараметрического алгоритма автоматической классификации статистических данных большого объема / А. В. Лап-

ко, В. А. Лапко, С. Т. Им и др. // *Информатика и системы управления*. 2019. № 3(61). С. 81–87.

5. Лапко А. В., Лапко В. А. Методика быстрого выбора коэффициентов размытости ядерных функций в непараметрическом алгоритме распознавания образов // *Измерительная техника*. 2019. № 4. С. 4–8.

6. Лапко А. В., Лапко В. А. Быстрый выбор коэффициентов размытости в многомерном непараметрическом алгоритме распознавания образов // *Измерительная техника*. 2019. № 8. С. 8–13.

References

1. Lapko A. V., Lapko V. A. Nonparametric algorithms for estimating the states of natural objects // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2018. Vol. 54, № 5. P. 451–456.
2. Lapko A. V., Lapko V. A., Im S. T., Tuboltsev V. P., Avdeenok V. A. Nonparametric algorithm of identification of classes corresponding to single-mode fragments of the probability density of multidimensional random variables. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2019. Vol. 55, № 3. P. 230–236.
3. Lapko A. V., Lapko V. A. A technique for testing hypotheses for distributions of multidimensional spectral data using a nonparametric pattern recognition algorithm, *Computer Optics*. 2019. Vol. 43, № 2. P. 238–244.
4. Lapko A. V., Lapko V. A., Im S. T., Tuboltsev V. P., Avdeenok V. L., Bakhtina V. A. Software implementation of the nonparametric algorithm of big statistical data automatic classification, *Informatika i sistemy upravleniya*. 2019. Vol. 61, № 3. P. 81–87.
5. Lapko A. V., Lapko V. A. Methods for rapid selection of kernel function blur coefficients in a nonparametric pattern recognition algorithm // *Measurement Techniques*. 2019. Vol. 62, № 4. P. 300–306.
6. Lapko A. V., Lapko V. A. Fast selection of blur coefficients in a multidimensional nonparametric pattern recognition algorithm, *Measurement Techniques*. 2019. Vol. 62, № 8. P. 665–672.

УДК 528.88

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ С ПРИМЕНЕНИЕМ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

К. А. Галакова¹, Е. А. Охоткина^{2*}

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

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

*E-mail: y.evgenia@mail.ru

Целью работы является проведение анализа и оценки использования земель сельскохозяйственного назначения на территории Минусинского района с применением средств и методов дистанционного зондирования.

Ключевые слова: обработка данных дистанционного зондирования, космическая съемка, спутники LANDSAT, дешифрирование сельскохозяйственных культур, ГИС проект, контролируемая классификация, эталонные области, тематическая обработка данных.

ANALYSIS AND ASSESSMENT OF AGRICULTURAL LAND USE USING REMOTE SENSING TOOLS AND METHODS

К. А. Galakova¹, Е. А. Okhotkina^{2*}

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

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: y.evgenia@mail.ru

The purpose of this scientific work is to analyze and evaluate the use of agricultural land of the Minusinsky region using remote sensing tools and methods.

Keywords: remote sensing data processing, satellite imagery, LANDSAT satellites, crop decoding, GIS project, controlled classification, reference areas, thematic data processing.

Применение данных дистанционного зондирования (ДДЗ) охватывает многие сферы жизнедеятельности человека. Ежегодный спрос в заинтересованности космической съемкой заставляет специалистов, ученых, программистов разрабатывать новые методы и алгоритмы при обработке ДДЗ. В настоящее время немаловажную роль играет применение ДДЗ в сельскохозяйственной (с.-х.) отрасли, что в свою очередь позволяет проводить статистический анализ данных для учета использования земель, а также аналитический, при изучении состояния и изменения с.-х. культур во время посевного сезона.

Территория Минусинский района, расположенная на Юге Красноярского края выбрана не случайно, т. к. на ней сосредоточено большое количество с.-х. земель, требующие своевременного контроля во время всего посевного сезона. Основная отрасль Минусинского района – сельское хозяйство. Общая площадь земель сельскохозяйственного назначения составляет около 176 тысяч гектар. Климатические условия позволяют выращивать как яровые и озимые зерновые культуры (пшеница, рожь, ячмень, овес), так и технические (кукуруза, сахарная свекла и т. д.). В качестве тестового полигона для наземных исследований была выбрана территория сельскохозяйст-

венного предприятия ЗАО «Искра Ленина», общая площадь с.-х. земель, которой составляет около 14 тыс. га [1].

Культуры, выращиваемые на предприятии: пшеница; овес; ячмень; рожь; горох; кукуруза; рапс; однолетние и многолетние травы. Все культуры, за исключением ржи, являются яровыми.

В данной работе для того, чтобы определить границы природных объектов и все информационные классы сельскохозяйственного назначения взят весь посевной период за 2015 год. Выбор данного года также обусловлен наличием безоблачных снимков изучаемой территории за каждый месяц посевного сезона. Остальные данные (1990, 2001, 2010, 2016 гг.) использованы в качестве вспомогательной информации в процессе визуального дешифрирования и контролируемой классификации. Снимки получены с бесплатного интернет-ресурса [2].

В качестве рабочего взят снимок за 18 августа 2015 года, так как в этот период можно выделить используемые и неиспользуемые земли, а также поля, засеянные с.-х. культурами, многолетними насаждениями, пастбища и пары. Выбрана комбинация каналов 5-4-3, где растительность изображена в оттенках лилового, открытая почва представлена в оттенках

темно-голубого, светло-голубым отображены поля с посевными культурами.

Для улучшения визуального восприятия снимка, перед проведением классификации использовано преобразование Tasseled Cap (ТС) для того, чтобы выделить территории, занятые с.-х. полями. Теоретические аспекты и практическая значимость данного преобразования представлены в работах [3–5].

На начальном этапе классификации выделены эталонные области, которые согласно полевым исследованиям на тестовой территории Минусинского района относятся к следующим информационным классам: яровые; озимые; травы. Так как озимые культуры и пары в середине августа отличить невозможно, они объединены в один класс, а после проведения классификации, путем визуального дешифрирования разделены на два: пары и озимые культуры. Земли, занятые пастбищами, также не использованы при классификации из-за их схожести с землями, занятыми многолетними насаждениями и используемыми в качестве сенокосов. Неиспользуемые земли, как и пастбища не задействованы в классификации, они выделены путем визуального дешифрирования с использованием космических снимков за 1990–2010 гг.

После выделения эталонных областей запущен процесс контролируемой классификации с использованием метода максимального правдоподобия. Для оценки точности полученной классификации в программном пакете ERDAS IMAGINE, использован метод каппа-статистики, который по результатам работы составил 95 %, что говорит о высокой точности классификации и правильном выборе эталонных областей.

На следующем этапе классификации определены используемые типы с.-х. культур на территории исследования. Опираясь на полученные знания в результате полевых исследований, сформированы эталонные области, соответствующие информационному классу выращиваемой с.-х. культуры (пшеница, ячмень, овес и т. д.). При формировании эталонных областей также были учтены спектральные особенности, относящиеся к определенному классу пикселей на снимке и как следствие, установлены информативные каналы.

После выделения необходимых эталонных областей, также, как и на первом уровне, запущен процесс классификации. Общая точность классификации составила 92,31 %, а согласованность между картой и снимком $k = 89$ %. Данные результаты также показывают высокую точность классификацию и хорошую согласованность их данных.

По итогам тематической обработки данных космической съемки (классифицированные снимки) создана база совмещенных пространственных и атрибутивных данных учета состояния и использования с.-х. земель, по результатам которой разработан геоинформационный проект (ГИС-проект), отражающий состояние сельского хозяйства на территории Минусинского района за 2015 год. Так, согласно рис. 1 используемые земли занимают 97 % от всей территории исследования, это говорит о том, что на данной территории земли с.-х. назначения используются продуктивно и по своему прямому назначению.

Из рис. 2 видно, что преобладающей посевной культурой является пшеница, на ее долю приходится 56 %, самую наименьшую площадь занимают поля, занятые рапсом – 2 %.

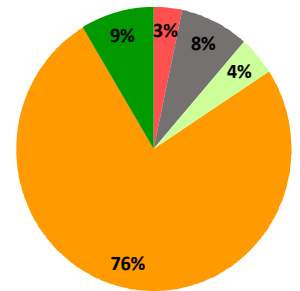


Рис. 1. Распределение с.-х. земель по виду использования

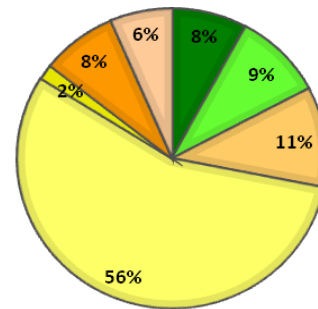


Рис. 2. Распределение площадей полей по посевным культурам

В результате работы, проведена тематическая обработка космических снимков и с использованием преобразования ТС для повышения точности и улучшения качественных показателей визуального дешифрирования с.-х. полей. По результатам применения преобразования ТС, на космических снимках выделены основные информационные классы используемых с.-х. полей на территории исследования, по которым далее заданы эталонные области и проведена классификация с обучением. По итогам тематической обработки данных разработан ГИС-проект, отражающий состояние сельского хозяйства в Минусинском районе за 2015 год.

Библиографические ссылки

1. Тесинское сельхозпредприятие «Искра Ленина» [Электронный ресурс]. URL: <http://my.krskstate.ru/docs/agrokomplex/tesinskoe-selkhozpredpriyatie-iskra-lenina/> (дата обращения: 21.09.2020).
2. EarthExplorer [Электронный ресурс]. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения: 15.03.2017).

3. Алтынцев М. А. Оценка точности рассчитанных коэффициентов преобразования Tasseled Cap для космических снимков FORMOSAT-2 // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2011. Т. 4. С. 34–39.

4. Алтынцев М. А. Преобразование Tasseled Cap по космическим снимкам IKONOS для дешифрирования растительности // Аэрокосмические съемки и фотограмметрия. 2011. С. 67–73.

5. Хворостухин Д. П., Кликунов А. А. Применение ГИС, данных дистанционного зондирования Земли и преобразования Tasseled Cap для изучения современной растительности ландшафтов региона // Известия Саратовского университета. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2013. Т. 13, вып. 2. С. 40–42.

References

1. Tesinskoe selkhozpredpriyatie «Iskra Lenina» [Electronic resource]. URL: <http://my.krskstate.ru/docs/>

agrokomplex/tesinskoe-selkhozpredpriyatie-iskra-lenina/ (access: 21.09.2020).

2. EarthExplorer [Electronic resource]. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov> (access: 15.03.2017).

3. Altyntsev M. A. Otsenka tochnosti rasschitannykh koeffisientov preobrazovaniya Tasseled Cap dlya kosmicheskikh snimkov FORMOSAT-2 // Interexpo Geo-Sibir. 2011. T.4. P. 34–39.

4. Altyntsev M. A. Preobrazovaniye Tasseled Cap po kosmicheskim snimkam IKONOS dlya deshifirovaniya rastitelnosti // Aerokosmicheskie s'emki i photogrammetriya. 2011. P. 67–73.

5. Khvorostukhin D. P., Klikunov A. A. Aplication of GIS, Remote Sensing and Tasseled Cap Transformation for the Study of Modern Landscape Plants region // Izvestiya Saratovskogo universiteta. Nov. ser. Ser. Nauki o Zemle. 2013. T. 13, vip. 2. P. 40–42.

© Галакова К. А., Охоткина А. Е., 2020

УДК 528.88

КАРТОГРАФИЧЕСКИЕ СЕРВИСЫ И ИНДУСТРИАЛЬНАЯ АРХЕОЛОГИЯ ЗАПАДНОГО ТАЙМЫРА*

А. Е. Гончаров, А. А. Городов, А. Р. Оголь, А. С. Бондарев, С. В. Апанасенко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
Email: goncharovae@sibsau.ru

Рассмотрены вопросы применения данных наиболее популярных картографических сервисов для изучения памятников новейшей истории (индустриальная археология), расположенных на правом берегу устьевого участка реки Енисей.

Ключевые слова: индустриальная археология, Арктика, Енисей, Таймыр, космоснимки, картографические сервисы, дистанционное зондирование земли.

ONLINE MAPPING SERVICES AND THE INDUSTRIAL ARCHAEOLOGY OF THE WESTERN TAIMYR

A. E. Goncharov, A. A. Gorodov, A. R. Ogol', A. S. Bondarev, S. V. Apanasenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
Email: goncharovae@sibsau.ru

Online mapping services provide simple access to various geospatial data and are practical tools for conducting archaeological research. In this brief review, we address some issues concerning the usage of the most popular online mapping services for studying industrial archaeological sites on the right bank of the Arctic reaches of the Enisei River.

Keywords: industrial archaeology, Arctic, Enisei River, Taimyr, satellite imagery, online mapping services, remote sensing

Введение. Использование данных космической съемки является неотъемлемой составляющей современных археологических исследований, в частности для установления местоположения и оценка древних поселений, оборонительных и инженерных сооружений, захоронений. В последние десятилетия проводились многочисленные исследования, как отдельных археологических памятников, так и целых регионов [1] дистанционными методами, главным образом космосъемки. Этот вопрос хорошо освещен в научной литературе [2–3]. Однако в связи с тем, что направление известное за рубежом, как «индустриальная» или «промышленная» археология малоразвита в современной России, применение технологий дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) для изучения объектов новейшей истории, а также памятников истории науки и техники ограничено. Однако если для густонаселенных районах страны разрушенные объекты промышленности, инфраструктуры и другие сооружения возведенные в последние 100 лет, как правило, не представляют особой ценности, то для отдаленных районов, таких как Крайний Север и Арктика, где стремительное освоение происходило именно в течение этого периода, многие объекты представляют историческую и культурную ценность.

Космосъемка, являющаяся незаменимым инструментом для выявления и изучения исторических памятников, применима также для их охраны [4]. Проблема сохранения объектов культурно-исторического наследия предельно актуальна для отдаленных районов, в том числе Севера.

Картографические сервисы. Среди наиболее распространенных интернет картографических сервисов, которые были использованы в настоящей работе были выбраны три – «Яндекс.Карты», «Google Maps», «Bing Maps» и «Earth Explorer», геологической службы США. Спутниковые снимки первых трех сервисов представлены в виде отдельных переключаемых слоев в географической энциклопедии «Wikimapia», что дает возможность быстрого сравнения космоснимков заданной местности. В результате сравнения снимков западного побережья Таймыра и правого берега устьевого участка реки Енисей было установлено, что сервис, предоставляющий изображения с наибольшим разрешением – Bing Maps (рис. 1, в) и Earth Explore (рис. 1, з)).

Объекты. В настоящем обзоре рассмотрены космоснимки двух исторических объектов, находящихся на правом берегу устьевого участка реки Енисей.

*Статья опубликована с использованием гранта Президента Российской Федерации на развитие гражданского общества, предоставленного Фондом президентских грантов.

Первый объект – останки деревянного несамоходного судна (баржи), построенного между 1930 и 1957 гг. Судно находится на одном из островов Луковой протоки, где оказалось во время высокого подъема воды (рис. 1–2, *а*). Второй объект – памятная стела на могиле погибших в 1943 г. участников полярной экспедиции в районе поселка Усть-Порт (рис. 2, *б*; 3). Оба объекта удалось обнаружить при работе с космоснимками, до проведения полевых исследований. Сухая деревянная поверхность палубы баржи, длина которой около 90 метров позволяет определить этот объект в любом из картографических сервисов. Обильная

зеленая растительность вокруг объекта – заросли тундрового кустарника, в частности – карликовой ивы. На ее фоне объект и его контуры четко различимы. На снимках видно, что кормовая часть баржи повреждена сильнее чем, носовая, что подтверждено данными полевых исследований.

Второй объект представляет памятный знак – стелу. Высота объекта – 12 метров. Поскольку местность тундровая, объект подобной высоты резко выделяется и заметен даже на снимках с низким разрешением благодаря отбрасываемой тени. Основания стелы – бетонное, что также видно по снимкам из космоса.

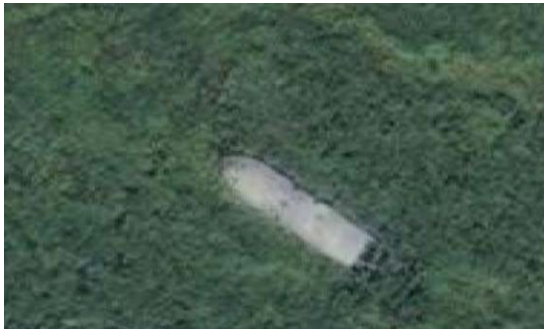
*а**б**в**г*

Рис. 1. Сравнение снимков одного объекта с четырех картографических сервисов:
а – Google; *б* – Yandex; *в* – Bing; *г* – USGS

*а**б*

Рис. 2. Рассматриваемые объекты:
а – палуба баржи в луковой протоке; *б* – памятник



Рис. 3. Космоснимки объекта «Стела» с сервисов Earth Explorer и Bing.
В обоих снимках отчетливо видна тень от объекта

Таким образом, на примере двух исторических объектов мы показали, что открытые картографические сервисы являются ценным инструментом для выявления и изучения объектов в тундровой зоне. Сервисы должны применяться вместе, что существенно увеличивает шансы на обнаружения ранее неизвестных исторических объектов новейшей истории.

Библиографические ссылки

1. Kennedy C., Bishop M.C. Google earth and the archaeology of Saudi Arabia. A case study from the Jeddah area // *Journal of Archaeological Science*. 2011. № 38. P. 1284–1293.
2. Parcak S. H. *Satellite Remote Sensing for Archaeology*. London–New York : Routledge, 2009. 320 p.
3. Goodman D., Piro S. *GPR Remote Sensing in Archaeology*. Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. 233 p.
4. Кенинг А. В., Зайцева Е. А. Применение технологии ГИС и методов ДЗЗ в системе выявления, мониторинга и охраны объектов археологического

наследия // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. 2013. Т. 8. С. 48–51.

References

1. Kennedy C., Bishop M.C. Google earth and the archaeology of Saudi Arabia. A case study from the Jeddah area // *Journal of Archaeological Science*. 2011. № 38. P. 1284–1293.
2. Parcak S. H. *Satellite Remote Sensing for Archaeology*. London–New York : Routledge, 2009. 320 p.
3. Goodman D., Piro S. *GPR Remote Sensing in Archaeology*. Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. 233 p.
4. Kening A. V., Zaitseva E. A. Primenenie tekhnologii GIS i metodov DZZ v sisteme vyivleniia, monitoring i okhrany ob"ektov arkheologicheskogo nasledia // *Interekspo GEO-Sibir'*. 2013. Vol. 8. P. 48–51.

© Гончаров А. Е., Городов А. А., Оголь А. Р.,
Бондарев А. С., Апанасенко С. В., 2020

УДК 528.88, 630

ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕНИЙ ТЕМНОХВОЙНЫХ ЛЕСОВ СИБИРСКИМ ШЕЛКОПРЯДОМ МЕТОДОМ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ*

С. Т. Им

Институт леса имени В. Н. Сукачева СО РАН (обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН)
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/28
Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: stim@ksc.krasn.ru

Оценена возможность применения непараметрической автоматической классификации для выделения поврежденных сибирским шелкопрядом темнохвойных древостоев по данным дистанционного зондирования Landsat-8/OLI.

Ключевые слова: автоматическая непараметрическая классификация, сибирский шелкопряд, данные дистанционного зондирования, Landsat.

ASSESSMENT OF DARKNEEDLE STAND MORTALITY CAUSED BY SIBERIAN SILKMOTH USING AUTOMATIC NONPARAMETRIC CLASSIFICATION METHOD

S. T. Im

V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS (FRC KSC SB RAS)
50/28, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: stim@ksc.krasn.ru

Applicability of nonparametric automatic classification to identify darkneedle stands damaged by Siberian silkmoth based on the Landsat-8/OLI remote sensing data was assessed.

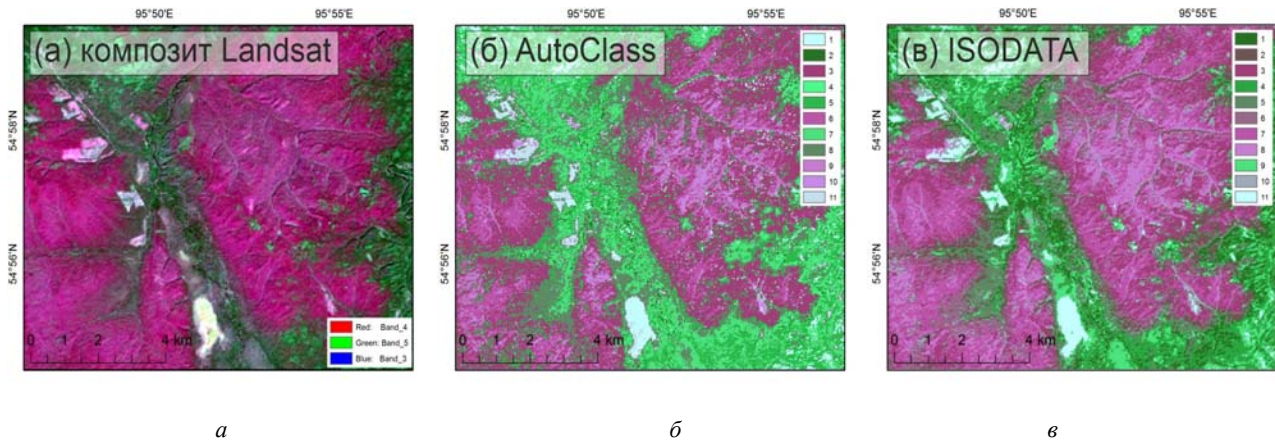
Keywords: automatic nonparametric classification, Siberian silkmoth, remote sensing data, Landsat-8/OLI.

Сибирский шелкопряд является одним из наиболее опасных насекомых вредителей для таежных лесов Сибири, который может уничтожит темнохвойные на обширных территориях за несколько лет [1]. Потепление климата позволило сибирскому шелкопряду начать осваивать территории, расположенные северные зон их предыдущих вспышек [2]. В Средней Сибири последняя вспышка наблюдалась в 2017–2019 гг., когда погибло 32 тыс. га темнохвойных лесов [3]. Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют анализировать вспышки массового размножения сибирского шелкопряда. Однако, остается вопрос поиска эффективных методов выделения лесных территорий с различной степенью повреждения древостоев по данным ДЗЗ. Цель данной работы заключалась в анализе возможностей непараметрического алгоритма классификации для выделения поврежденных сибирским шелкопрядом темнохвойных древостоев по данным съемки Landsat-8.

Объект исследования. Анализировались поврежденные сибирским шелкопрядом темнохвойные древостои, расположенные в Ирбейском районе Красноярского края (54°57' с. ш., 95°53' в. д.). Преобладают темнохвойные леса, представленные пихтой (*Abies sibirica*) и кедром (*Pinus sibirica*), произрастающие на высотах 300–1700 м на у. м.

Материалы. В анализе использовалась съемка Landsat-8/OLI, датированная 9 сентября 2019 г., скачанная с геопортала EarthExplorer (URL: <https://earthexplorer.usgs.gov>). Данные предварительно атмосферно скорректированы алгоритмом LaSRC (URL: <https://www.usgs.gov/media/files/land-surface-reflectance-code-lasrc-product-guide>). Пространственное разрешение 30 м. Использованы 7 спектральных канала, включая видимые и инфракрасные. Размер анализируемого фрагмента снимка составил 11 тыс. га (123134 пикселей).

*Работа поддержана грантами РФФИ 18-01-00251 и 18-05-00432.



Сопоставление (а) исходного топографически нормализованного снимка Landsat с результатами классификации (б) непараметрическим методом и (в) ISODATA. RGB композит снимка Landsat представлен красным, ближним инфракрасным и зеленым каналами. Цифры обозначают номера классов

Методика. Снимок Landsat был топографически нормализован с помощью алгоритма С-коррекции (см. рисунок, а). Классификация составлялась с помощью алгоритма автоматической непараметрической классификации, разрабатываемой в ИВМ СО РАН, Лапко А. В. и Лапко В. А., для анализа больших объемов статистических данных [4]. Алгоритм непараметрического алгоритма обнаружения классов, соответствующих одномодальным фрагментам плотности вероятности, основывается на новой методике декомпозиции области значений многомерной случайной величины [4].

Использовалось оригинальное программное обеспечение AutoClass 2.0 [5]. Для сравнения результатов дешифрирования производилась классификация снимка с помощью метода ISODATA (Iterative Self Organizing Data), реализованного в программном пакете Erdas Imagine. При этом количество классов задавалось равным количеству, полученному при использовании непараметрического алгоритма. Оценка качества дешифрирования производилось на основе ранее полученных результатов, опубликованных в статье [3].

Результаты. Непараметрический алгоритм, при использовании параметров по умолчанию, позволил выделить 11 классов наземной поверхности за ~44 минуты. Древоостой с различной степенью повреждения в основном соответствовали четырем классам (см. рисунок, б). Классификация методом ISODATA произведена за ~10 секунд и поврежденным древоостоям соответствовали в основном пять классов (см. рисунок, в).

Экспертный анализ показал сопоставимость результатов выделения поврежденных древоостоев. Установлено, что полученные непараметрическим методом классы имеют большее варьирование по площади (~25 %), чем классы, созданные методом ISODATA (~12 %). Отмечается значительное варьирование спектральных яркостей внутри классов, полученных непараметрическим методом. В среднем, стандартные отклонения яркостей внутри классов больше таковых,

полученных методом ISODATA на 28–90 %. Перекрестное пространственное сопоставление показало значительные различия между результатами рассмотренных классификаций. Для сравнительной оценки точности выделения разных категорий поврежденных древоостоев на классифицированных изображениях необходимо проведение полевых исследований.

Заключение. В целом, использованный непараметрический метод автоматической классификации достаточно хорошо выделяет поврежденные сибирским шелкопрядом темнохвойные древоостой. Однако, для оценки достоверности выделения классов разной степени повреждения древоостоев необходимы более точные исходные данные, такие как полевые исследования. Выделяемые непараметрическим методом классы значительно отличаются от получаемых стандартным методом классификации ISODATA.

Библиографические ссылки

1. Landsat-based analysis of insect outbreaks in southern Siberia / V. I. Kharuk, K. J. Ranson, V. V. Kuz'michev et al. // *Canadian Journal of Remote Sensing*. 2003. Vol. 29(2). P. 286–297.
2. Kharuk V. I., Im S. T., Yagunov M. N. Migration of the Northern Boundary of the Siberian Silk Moth // *Contemporary Problems of Ecology*. 2018. Vol. 11, № 1. P. 26–34.
3. Kharuk V. I., Im S. T., Soldatov V. V. Siberian silkmoth outbreaks surpassed geoclimatic barrier in Siberian Mountains // *Journal of Mountain Science*. 2020. Vol. 17. P. 1891–1900.
4. Непараметрический алгоритм выделения классов, соответствующих одномодальным фрагментам плотности вероятности многомерных случайных величин / А. В. Лапко, В. А. Лапко, С. Т. Им и др. // *Автометрия*. 2019. Т. 55, № 3. С. 22–30.
5. Программные средства реализации непараметрического алгоритма автоматической классификации статистических данных большого объема / В. Л. Авдеенок, А. В. Бахтина, С. Т. Им и др. // *Информатика и системы управления*. 2019. № 3(61). С. 81–87.

References

1. Landsat-based analysis of insect outbreaks in southern Siberia / V. I. Kharuk, K. J. Ranson, V. V. Kuz'michev et al. // *Canadian Journal of Remote Sensing*. 2003. Vol. 29(2). P. 286–297.
2. Kharuk V. I., Im S. T., Yagunov M. N. Migration of the Northern Boundary of the Siberian Silk Moth // *Contemporary Problems of Ecology*. 2018. Vol. 11, № 1. P. 26–34.
3. Kharuk V. I., Im S. T., Soldatov V. V. Siberian silkmoth outbreaks surpassed geoclimatic barrier in Siberian Mountains // *Journal of Mountain Science*. 2020. Vol. 17. P. 1891–1900.
4. Nonparametric algorithm of identification of classes corresponding to single-mode fragments of the probability density of multidimensional random variables / A. V. Lapko, V. A. Lapko, S. T. Im et al. // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2019. Vol. 55, № 3. P. 230–236.
5. *Programnye sredstva realizacii neparametricheskogo algoritma avtomaticheskoi klassifikacii statisticheskikh dannyh bolshogo ob'ema* [Software tools of implementation of nonparametric automatic algorithm of big statistical data classification] / V. L. Avdeenok, A. V. Bahtina, S. T. Im et al. // *Informatika i sistemy upravleniya* [Informatics and management systems]. 2019. № 3(61). P. 81–87.

© Им С. Т., 2020

УДК 528.88, 630

ДИНАМИКА ПРОЕКТИВНОГО ПОКРЫТИЯ ДЕРЕВЬЯМИ В ТЕМНОХВОЙНЫХ ЛЕСАХ КУЗНЕЦКОГО АЛАТАУ ПО ДАННЫМ СЪЕМКИ MODIS*

С. Т. Им^{1,2,3*}, В. Г. Ли⁴

¹Институт леса имени В. Н. Сукачева СО РАН (обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН)
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/28

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

³Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

⁴Красноярский государственный аграрный университет
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, просп. Мира, 90

*E-mail: stim@ksc.krasn.ru

Исследована динамика проективного покрытия деревьями в темнохвойных лесах Кузнецкого Алатау на основе данных дистанционного зондирования MODIS (продукт MOD44B) за 2000–2018 гг.

Ключевые слова: MODIS, MOD44B, проективное покрытие деревьями, темнохвойные леса, Кузнецкий Алатау.

PERCENT TREE COVER DYNAMICS IN DARKNEEDLE FOREST OF KUZNETSKY ALATAU BASED ON MODIS DATA

S. T. Im^{1,2,3*}, V. G. Lee⁴

¹V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS (FRC KSC SB RAS)
50/28, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

³Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

⁴Krasnoyarsk State Agrarian University
90, Mira Av., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation

*E-mail: stim@ksc.krasn.ru

Percent tree cover dynamics in darkneedle forests of Kuznetskiy Alatau was analyzed based on MODIS remote sensing data (MOD44B product) for the period 2000–2018.

Keywords: MODIS, MOD44B, percent tree cover, darkneedle forest, Kuznetskiy Alatau.

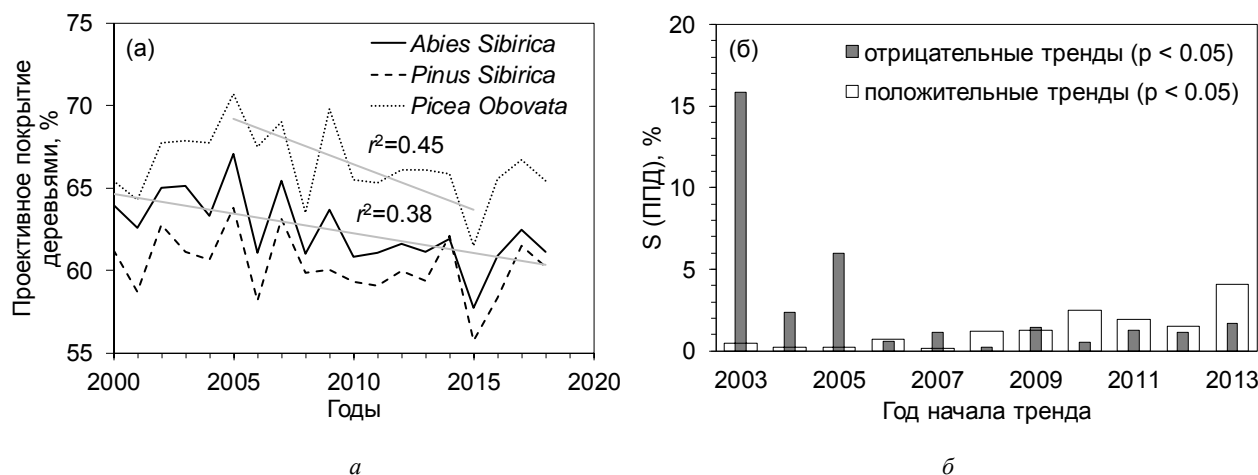
Введение. Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) позволяет исследовать состояние и динамику лесов на обширных территориях. Результаты анализа данных ДЗЗ показывают, с одной стороны, рост сомкнутости деревьев в экотоне лесотундры и продвижение деревьев на север, и по градиенту высоты [1]. Однако, с другой стороны – темнохвойные леса исчезают из-за возросшей активности насекомых вредителей и негативного воздействия климата [2]. Цель данной работы – анализ динамики проективного покрытия деревьев в темнохвойных лесах Кузнецкого Алатау по данным съемки MODIS.

Объект исследования. Анализировались темнохвойные леса Кузнецкого Алатау. Площадь ~140 тыс. км², на которых ~25 тыс. км² – темнохвойные леса: пихта

(*Abies sibirica*; ~90 %), сибирский кедр (*Pinus sibirica*; ~10 %) и ель (*Picea obovata*; <0,1 %).

Материалы и методы. Пространственно-временные изменения в темнохвойных лесах оценивались по данным MODIS – продукт MOD44B [3]. Данные получены с геопортала EarthData (URL: <https://search.earthdata.nasa.gov>). Из данных MOD44B извлекались ежегодные слои проективного покрытия деревьями (ППД) в процентах за 2000–2018 гг. с пространственным разрешением 231 м. Выделение территорий сомкнутых темнохвойных древостоев (ТХД) по преобладающей породе (>60 %) производилось на основе карты лесов 2006 г., полученной с геопортала ВЕГА-ПИРО (URL: <http://pro-vega.ru/maps>; пространственное разрешение 230 м) [4].

*Работа поддержана грантами РФФИ 18-45-240003 и 18-05-00432.



Динамика (а) средней величины проективного покрытия по данным MODIS и (б) годовые доли площади (S) темнохвойных древостоев с отрицательными и положительными трендами проективного покрытия деревьями. Тренды значимы при $\alpha < 0,05$

Из анализируемой территории устранялись гари на основе продукта MODIS MCD64A1 (URL: <http://modis-fire.umd.edu>) [5].

Анализ связей динамики ТХ с топографией местности производился с использованием цифровой модели рельефа GMTED 2010 (пространственное разрешение 250 м; URL: <https://www.usgs.gov/land-resources/eros/coastal-changes-and-impacts/gmted2010>).

Анализ динамики темнохвойных древостоев производился на основе карт линейных трендов ППД. Уравнения трендов рассчитывались попиксельно с изменяемым начальным годом (2000–2014 гг.) и фиксированным конечным годом (2018 г.). Анализируются только пиксели со статистически значимыми трендами ($\alpha < 0,05$). Коэффициенты наклона трендов позволили выделить зоны значимых изменений ППД, избегая резких перепадов, связанных с перманентной гибелью древостоев (пожар, рубка, ветровал).

Из анализа устранялись территории гарей. Год начала отрицательного тренда принимался за год начала усыхания древостоев. Для ГИС-анализа связи значимых изменений ППД с рельефом местности производилось нормирование данных по методике, представленной в [2].

Результаты. На анализируемой территории ~90 % темнохвойных лесов с ППД равным 50–70 %, ППД менее 50 % соответствует 6 % ТХД, ППД более 70 % – 5 % ТХД (см. рисунок, а). В целом, за 2000–2018 гг. наблюдается достоверный тренд падения среднего значения ППД ($r^2 = 0,38$; $\alpha < 0,01$) в пихтовых древостоях, и в 2005–2015 гг. – в еловых древостоях ($r^2 = 0,45$; $\alpha < 0,03$) (см. рисунок, а).

За период наблюдения значимые отрицательные тренды ППД наблюдались на 32 % площади ТХД, а положительные тренды – на 14 % (для пихтовых древостоев – 34 % и 14 %; для кедровых – 17 % и 17 %; для еловых – 29 % и 10 %). Наибольшее количество достоверных отрицательных трендов ППД начинаются с 2003 и 2005 гг. (см. рисунок, б).

Распределение отрицательных трендов по элементам рельефа неоднородное. Усыхание преимущественно наблюдается на невысоко расположенных склонах южной и юго-восточной экспозиций с уклонами менее 8°.

Заключение. Таким образом, анализ показал преобладание отрицательных трендов ППД в темнохвойных лесах Кузнецкого Алатау. Значительные площади усыхания темнохвойных древостоев отмечаются с началом в 2003 и 2005 гг. Распределение площадей усыхания неоднородно относительно рельефа. Максимум усыхания наблюдается на склонах южной и юго-восточной экспозиций на высотах до 300 м с уклонами менее 8°.

Библиографические ссылки

1. Им С. Т., Харук В. И., Ли В. Г. Миграция северной границы вечнозелёных хвойных древостоев в Сибири в XXI столетии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 1. С. 176–187.
2. Fir Decline and Mortality in the Southern Siberian Mountains / V. Kharuk, S. Im, I. Petrov and et al. // Regional Environmental Change. 2017. Vol. 17, iss. 3. P. 803–812.
3. Towards an operational MODIS continuous field of percent tree cover algorithm: Examples using AVHRR and MODIS data / M. C. Hansen, R. Sohlberg, C. Dimiceli and et al. // Remote Sensing of Environment. 2002. Т. 83(1-2). С. 303–319.
4. Возможности использования спутникового сервиса ВЕГА для решения различных задач мониторинга наземных экосистем / С. А. Барталев, Д. В. Ершов, Е. А. Луян и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 1. С. 49–56.
5. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product / L. Giglio, L. Boschetti, D. P. Roy and et al. // Remote Sensing of Environment. 2018. Vol. 217. P. 72–85.

References

1. Im S. T., Kharuk V. I., Lee V. G. Migration of the northern evergreen needleleaf timberline in Siberia in the 21st century // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2020. Vol. 17, № 1. P. 176–187 (In Russ.).
2. Fir Decline and Mortality in the Southern Siberian Mountains / V. Kharuk, S. Im, I. Petrov and et al. // *Regional Environmental Change*. 2017. Vol. 17, iss. 3. P. 803–812.
3. Towards an operational MODIS continuous field of percent tree cover algorithm: Examples using AVHRR and MODIS data / M. C. Hansen, R. Sohlberg, C. Dimiceli and et al. // *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 83(1-2). P. 303–319.
4. Bartalev S. A., Ershov D. V., Loupian E. A., Tolpin V. A. Possibilities of Satellite Service VEGA Using for Different Tasks of Land Ecosystems Monitoring. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2012. Vol. 9, № 1. P. 49–56 (In Russ.).
5. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product / L. Giglio, L. Boschetti, D. P. Roy and et al. // *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 217. P. 72–85.

© Им С. Т., Ли В. Г., 2020

МЕТОДИКА ПРОВЕРКИ ГИПОТЕЗЫ О ТОЖДЕСТВЕННОСТИ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН В УСЛОВИЯХ БОЛЬШИХ ОБЪЕМОВ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

А. В. Лапко^{1,2*}, В. А. Лапко^{1,2}

¹Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44

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

*E-mail: lapko@icm.krasn.ru

Предлагается методика проверки гипотезы о распределениях случайных величин большого объема. Основу методики составляет анализ ошибок непараметрических алгоритмов распознавания образов.

Ключевые слова: проверка гипотез, выборки большого объема, ядерные оценки плотности вероятности, непараметрические алгоритмы распознавания образов, дискретизация области значений случайных величин.

METHODOLOGY OF HYPOTHESIS TESTING ABOUT THE IDENTITY OF THE LAWS OF DISTRIBUTION OF RANDOM VALUES IN CONDITIONS OF LARGE VOLUMES OF STATISTICAL DATA

A. V. Lapko^{1,2*}, V. A. Lapko^{1,2}

¹Institute of Computational Modeling SB RAS

50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

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

*E-mail: lapko@icm.krasn.ru

A method for hypothesis testing of distributions of large-volume random variables is proposed. The basis for the methodology is the analysis of errors of nonparametric pattern recognition algorithms.

Keywords: hypothesis testing, large-volume samples, kernel probability density estimates, nonparametric pattern recognition algorithms, discretization of the range of values of random variables.

В статьях [1–3] обосновывается возможность использования непараметрических алгоритмов распознавания образов в задачах проверки статистических гипотез о распределениях случайных величин. Если при решении двухальтернативной задачи распознавания образов в соответствии с критерием максимального правдоподобия вероятность ошибки классификации равна значению 0,5, то законы распределения случайных величин в области определения классов очевидно совпадают. Поэтому появляется возможность перехода от задачи сравнения законов распределения многомерных случайных величин к проверке гипотезы о равенстве вероятности ошибки распознавания образов значению 0,5.

В данной работе предложенная методика развивается на решение задачи проверки гипотез о распределении многомерных случайных величин в условиях больших объемов статистических данных, которые характерны при анализе, например, данных дистанционного зондирования.

Пусть X_1 и X_2 – две генеральные совокупности с произвольными законами распределения. Необходи-

мо по независимым выборкам $V_1 = (x^i, i = \overline{1, n_1})$ и $V_2 = (x^i, i = \overline{1, n_2})$ наблюдений многомерных случайных величин $x = (x_v, v = \overline{1, k})$ проверить гипотезу $H_0: F_1(x) \equiv F_2(x)$ о тождественности их функций распределения $F_1(x), F_2(x)$ в условиях больших объемов n_1, n_2 статистических данных.

Сформируем на основании V_1 и V_2 обучающую выборку $V = (x^i, \sigma(i), i = \overline{1, n})$, где $n = n_1 + n_2$; $\sigma(i)$ – указания о принадлежности ситуации x^i к V_1 либо V_2 . В этом случае элементы массивов данных V_1, V_2 образуют обучающую выборку для решения задачи распознавания образов.

По обучающей выборке V осуществим синтез непараметрического алгоритма распознавания образов, соответствующего критерию максимального правдоподобия

$$\bar{m}(x): \begin{cases} x \in \Omega_1, & \text{если } \bar{f}_{12}(x) \leq 0 \\ x \in \Omega_2, & \text{если } \bar{f}_{12}(x) > 0, \end{cases} \quad (1)$$

где оценка уравнения разделяющей поверхности между классами определяется выражением

$$\bar{f}_{12}(x) = \bar{p}_2(x) - \bar{p}_1(x).$$

Для условия большого объёма обучающей выборки в качестве $\bar{p}_1(x)$, $\bar{p}_2(x)$ будем использовать регрессионную оценку плотности вероятности распределения случайных величин x в классах Ω_1 , Ω_2 [4]. Их синтез основан на «сжатии» исходной информации V_1 , V_2 в массивы данных \bar{V}_1 , \bar{V}_2 путём декомпозиции области значений случайных величин на многомерные интервалы. Элементами массивов \bar{V}_1 , \bar{V}_2 являются координаты центров интервалов дискретизации и соответствующие им частоты принадлежности случайных величин из V_1 , V_2 этим интервалам. Методика оптимальной дискретизации области значений случайных величин представлена в работах [5–9].

При оптимальных параметрах непараметрического алгоритма (1) определить оценку вероятности ошибки распознавания образов $\bar{\rho}$. Выбор оптимальных параметров можно осуществлять в режиме «скользящего экзамена», либо использовать «быстрые» процедуры оптимизации [10–12].

Проверить гипотезу $\bar{H}_0: \bar{\rho} = 0,5$, используя методику доверительного оценивания вероятности ошибки распознавания образов ρ либо критерий Колмогорова [9].

Предложенная методика была использована при анализе данных дистанционного зондирования лесных массивов. Проверялась гипотеза о тождественности законов распределения спектральных данных, соответствующих типам лесных массивов в пространстве 6 признаков. Применение предлагаемой методики позволяет сократить объём анализируемых данных на порядок.

Библиографические ссылки

1. Лапко А. В., Лапко В. А. Сравнение эмпирической и теоретической функций распределения случайной величины на основе непараметрического классификатора // *Автометрия*. 2012. Т. 48, № 1. С. 45–49.
2. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрические алгоритмы распознавания образов в задаче проверки статистической гипотезы о тождественности двух законов распределения случайных величин // *Автометрия*. 2010. Т. 46, № 6. С. 47–53.
3. Лапко А. В., Лапко В. А. Методика проверки гипотез о распределениях многомерных спектральных данных с использованием непараметрического алгоритма распознавания образов // *Компьютерная оптика*. 2019. Т. 43, № 2. С. 238–244.
4. Лапко А. В., Лапко В. А. Регрессионная оценка многомерной плотности вероятности и её свойства // *Автометрия*. 2014. Т. 50, № 2. С. 50–56.
5. Лапко А. В., Лапко В. А. Оптимальный выбор количества интервалов дискретизации области изменения одномерной случайной величины при оценива-

нии плотности вероятности // *Измерительная техника*. 2013. № 7. С. 24–27.

6. Лапко А. В., Лапко В. А. Выбор оптимального количества интервалов дискретизации области значений двухмерной случайной величины // *Измерительная техника*. 2016. № 2. С. 14–17.

7. Лапко А. В., Лапко В. А. Сравнение эффективности методов дискретизации области значений зависимых случайных величин при синтезе непараметрической оценки двумерной плотности вероятности // *Измерительная техника*. 2017. № 4. С. 15–18.

8. Лапко А. В., Лапко В. А. Метод дискретизации области значений многомерной случайной величины // *Измерительная техника*. 2019. № 1. С. 16–20.

9. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрический алгоритм распознавания образов в задаче проверки гипотезы о тождественности законов распределения многомерных случайных величин в условиях статистических данных большого объёма // *Информатика и системы управления*. 2020. № 2 (64). С. 103–112.

10. Лапко А. В., Лапко В. А. Методика быстрого выбора коэффициентов размытости ядерных функций в непараметрическом алгоритме распознавания образов // *Измерительная техника*. 2019. № 4. С. 4–8.

11. Лапко А. В., Лапко В. А. Выбор коэффициента размытости ядерных оценок плотности вероятности в условиях больших выборок // *Измерительная техника*. 2019. № 5. С. 3–6.

12. Лапко А. В., Лапко В. А. Быстрый выбор коэффициентов размытости в многомерном непараметрическом алгоритме распознавания образов // *Измерительная техника*. 2019. № 8. С. 8–13.

References

1. Lapko A. V., Lapko V. A. Comparison of empirical and theoretical distribution functions of a random variable on the basis of a nonparametric classifier // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2012. Vol. 48, № 1. P. 37–41.
2. 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, № 6. P. 545–550.
3. Lapko A. V., Lapko V. A. A technique for testing hypotheses for distributions of multidimensional spectral data using a nonparametric pattern recognition algorithm // *Computer Optics*. 2019. Vol. 43, № 2. P. 238–244.
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, № 2. P. 148–153.
5. Lapko A. V., Lapko V. A. Optimal selection of the number of sampling intervals in domain of variation of a one-dimensional random variable in estimation of the probability density // *Measurement Techniques*. 2013. Vol. 56, № 7. P. 763–767.
6. Lapko A. V., Lapko V. A. Selection of the optimal number of intervals sampling the region of values of a two-dimensional random variable // *Measurement Techniques*. 2016. Vol. 59, № 2. P. 122–126.

7. Lapko A. V., Lapko V. A. Comparison of the efficiency of methods of digitizing the range of values of dependent random variables during synthesis of a nonparametric assessment of two-dimensional probability density // *Measurement Techniques*. 2017. Vol. 60, № 4. P. 325–330.

8. Lapko A. V., Lapko V. A. Discretization method for the range of values of a multi-dimensional random variable // *Measurement Techniques*. 2019. Vol. 62, № 1. P. 16–22.

9. Lapko A. V., Lapko V. A. Nonparametric pattern recognition algorithm in testing hypotheses about the identity of the laws of multidimensional random variables distribution under large volume of statistical data // *Informatika i sistemy upravleniya*. 2020. Vol. 64, № 2. P. 103–112.

10. Lapko A. V., Lapko V. A. Methods for rapid selection of kernel function blur coefficients in a nonparametric pattern recognition algorithm // *Measurement Techniques*. 2019. Vol. 62, № 4. P. 300–306.

11. Lapko A. V., Lapko V. A. Selection of the blur coefficient for probability density kernel estimates under conditions of large samples // *Measurement Techniques*. 2019. Vol. 62, № 5. P. 383–389.

12. Lapko A. V., Lapko V. A. Fast selection of blur coefficients in a multidimensional nonparametric pattern recognition algorithm // *Measurement Techniques*. 2019. Vol. 62, № 8. P. 665–672.

© Лапко А. В., Лапко В. А, 2020

**МОДИФИКАЦИЯ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ
КЛАССИФИКАЦИИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ БОЛЬШОГО ОБЪЁМА***

А. В. Лапко^{1,2*}, В. А. Лапко^{1,2}

¹Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок 50, стр. 44

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

*E-mail: lapko@icm.krasn.ru

Предлагается непараметрический алгоритм автоматической классификации статистических данных большого объёма. Синтез алгоритма основан на процедуре оптимальной дискретизации области значений случайных величин.

Ключевые слова: алгоритм автоматической классификации, многомерная гистограмма, выбор количества интервалов, дискретизация пространства признаков, данные дистанционного зондирования.

**MODIFICATION OF A NONPARAMETRIC ALGORITHM FOR AUTOMATIC CLASSIFICATION
OF LARGE VOLUME STATISTICAL DATA**

A. V. Lapko^{1,2*}, V. A. Lapko^{1,2}

¹Institute of Computational Modeling SB RAS

50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

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

*E-mail: lapko@icm.krasn.ru

A nonparametric algorithm for automatic classification of large volume statistical data is proposed. The synthesis of algorithm is based on the procedure of optimal discretization of the range of values of random variables.

Keywords: automatic classification algorithm, multidimensional histogram, selection of the number of intervals, discretization of the feature space, remote sensing data.

Обнаружение компактных групп наблюдений в статистических данных является первоначальной задачей исследования закономерностей свойственных объектам различной природы, которая решается алгоритмами автоматической классификации. В работах [1] обоснована возможность решения задачи автоматической классификации в условиях больших объёмов статистических данных. Его идея состоит в «сжатии» исходной информации на основе декомпозиции пространства признаков.

В данной работе предлагается модификация непараметрического алгоритма обнаружения классов, соответствующих одномерным фрагментам плотности вероятности. Её синтез основан на использовании новой методики декомпозиции области значений многомерной случайной величины.

Имеются статистические данные $V = (x^i, i = \overline{1, n})$ наблюдений случайных величин $x = (x_v, v = \overline{1, k})$, которые необходимо разделить на множества $V_j = (x^i, i \in I_j), j = \overline{1, M}$, соответствующих одно-

мерным фрагментам плотности вероятности $p(x)$. Количество M компактных групп наблюдений неизвестно.

Для «обхода» проблемы больших выборок преобразуем исходную информацию V в массив данных $\bar{V} = (z_v^i, \dots, z_k^i, \bar{P}^i, i = \overline{1, N})$, составленный из значений центров $z_v^i, v = \overline{1, k}$ интервалов (элементов) дискретизации S^i пространства признаков x анализируемых объектов и частот \bar{P}^i принадлежности наблюдений выборки V элементам $S^i, i = \overline{1, N}$.

Полученные данные \bar{V} позволяют осуществить синтез регрессионной оценки $\bar{p}(x)$ плотности вероятности $p(x)$ многомерной случайной величины [2]. В результате анализа асимптотических свойств $\bar{p}(x)$ в работах [3–6] рассмотрена процедура оптимальной дискретизации области значений случайной величины. На этой основе разработан непараметрический алгоритм автоматической классификации больших выборок значений многомерной случайной величины.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ № 18-01-00251.

Для простоты изложения рассмотрим процедуру классификации для одномерного случая при $k = 1$, результаты дискретизации для которого представлены на рисунке.

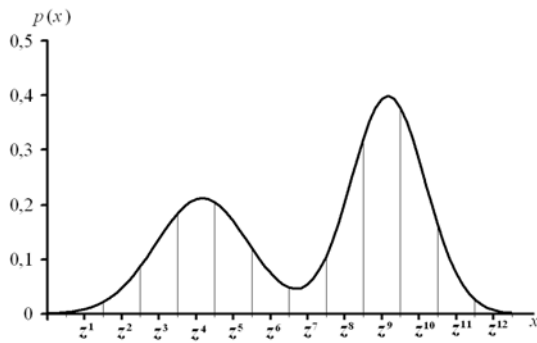


Рис. 1. Графическая иллюстрация результатов дискретизации \bar{V} области значений случайной величины x (z^j , $j = \overline{1, 12}$ – центры интервалов дискретизации)

На первом этапе классификации к классу Ω_1 будет отнесён интервал дискретизации S^9 с параметрами (z^9, \bar{P}^9) , который соответствует моде $\bar{p}_1(x)$. Тогда на втором этапе классификации к первому классу Ω_1 однозначно будут отнесены интервалы дискретизации S^8 и S^{10} с параметрами (z^8, \bar{P}^8) , (z^{10}, \bar{P}^{10}) соответственно. Данное утверждение основывается на справедливости неравенств $\bar{P}^9 > \bar{P}^8$ и $\bar{P}^9 > \bar{P}^{10}$. Эти интервалы S^8 и S^{10} образуют множество $S(9)$. Далее для анализа выбирается, например, интервал $S^8 \in S(9)$. В соответствии с решением этого этапа алгоритма классификации интервал S^7 будет отнесён к классу Ω_1 , так как справедливо соотношение $\bar{P}^8 > \bar{P}^7$. По аналогии относительно $S^{10} \in S(9)$ интервал S^{11} будет отнесён также к классу Ω_1 , так как $\bar{P}^{10} > \bar{P}^{11}$. На следующем этапе проводится анализ интервалов $S(7)$ и $S(11)$, которые содержат только по одному интервалу S^6 и S^{12} соответственно. Нетрудно заметить, что интервал S^6 не будет отнесён к первому классу Ω_1 , так как выполняется неравенство $\bar{P}^6 > \bar{P}^7$. Интервал S^{12} будет отнесён к первому классу, потому что справедливо соотношение $\bar{P}^{11} > \bar{P}^{12}$. В данном примере к первому классу будут отнесены интервалы S^j , $j = \overline{7, 12}$.

Для обнаружения класса Ω_2 необходимо из оставшегося массива данных \bar{V} выбрать интервал S^4 с максимальной частотой встречаемости \bar{P}^4 случайной величины из исходной выборки и описанный выше процесс классификации повторяется. В результате обнаруживаются интервалы дискретизации S^j , $j = \overline{1, 6}$, принадлежащих классу Ω_2 .

Предложенный алгоритм позволяет повысить вычислительную эффективность обработки данных дистанционного зондирования.

Библиографические ссылки

1. Непараметрический алгоритм выделения классов, соответствующих одномерным фрагментам плотности вероятности многомерных случайных величин / А. В. Лапко, В. А. Лапко, С. Т. Им и др. // *Автометрия*. 2019. Т. 55, № 3. С. 22–30.
2. Лапко А. В., Лапко В. А. Регрессионная оценка многомерной плотности вероятности и её свойства // *Автометрия*. 2014. Т. 50, № 2. С. 50–56.
3. Лапко А. В., Лапко В. А. Оптимальный выбор количества интервалов дискретизации области изменения одномерной случайной величины при оценивании плотности вероятности // *Измерительная техника*. 2013. № 7. С. 24–27.
4. Лапко А. В., Лапко В. А. Выбор оптимального количества интервалов дискретизации области значений двухмерной случайной величины // *Измерительная техника*. 2016. № 2. С. 14–17.
5. Лапко А. В., Лапко В. А. Сравнение эффективности методов дискретизации области значений зависимых случайных величин при синтезе непараметрической оценки двумерной плотности вероятности // *Измерительная техника*. 2017. № 4. С. 15–18.
6. Лапко А. В., Лапко В. А. Метод дискретизации области значений многомерной случайной величины // *Измерительная техника*. 2019. № 1. С. 16–20.

References

1. Nonparametric algorithm of identification of classes corresponding to single-mode fragments of the probability density of multidimensional random variables / A. V. Lapko, V. A. Lapko, S. T. Im et al. // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2019. Vol. 55, № 3. P. 230–236.
2. Lapko A. V., Lapko V. A. Regression estimate of the multidimensional probability density and its properties // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2014. Vol. 50, № 2. P. 148–153.
3. Lapko A. V., Lapko V. A. Optimal selection of the number of sampling intervals in domain of variation of a one-dimensional random variable in estimation of the probability density // *Measurement Techniques*. 2013. Vol. 56, № 7. P. 763–767.
4. Lapko A. V., Lapko V. A. Selection of the optimal number of intervals sampling the region of values of a two-dimensional random variable // *Measurement Techniques*. 2016. Vol. 59, № 2. P. 122–126.
5. Lapko A. V., Lapko V. A. Comparison of the efficiency of methods of digitizing the range of values of dependent random variables during synthesis of a nonparametric assessment of two-dimensional probability density // *Measurement Techniques*. 2017. Vol. 60, № 4. P. 325–330.
6. Lapko A. V., Lapko V. A. Discretization method for the range of values of a multi-dimensional random variable // *Measurement Techniques*. 2019. Vol. 62, № 1. P. 16–22.

© Лапко А. В., Лапко В. А., 2020

УДК 621.396.33:528.8, 528.8(15)

РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СТУДЕНЧЕСКОГО ЦЕНТРА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТАМИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЗЕМЛИ

Е. Г. Лапухин*, В. В. Золотарев, Р. В. Лапко, С. В. Денисов, Н. И. Аристов

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

*E-mail: lapukhineg@sibsau.ru

Расширение функциональных возможностей оборудования студенческого центра управления полетами позволяет получать дополнительный материал для исследовательской, образовательной и просветительской деятельности.

Ключевые слова: студенческий центр управления полетами, дистанционное зондирование Земли.

EXPANDING THE FUNCTIONALITY OF THE STUDENT MISSION CONTROL CENTER FOR EARTH MONITORING

E. G. Lapukhineg*, V. V. Zolotarev, R. V. Lapko, S. V. Denisov, N. I. Aristov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: lapukhineg@sibsau.ru

Expanding the functionality of the equipment of the student mission control center allows you to receive additional material for research, educational and educational activities.

Keywords: student mission control center, Earth remote sensing.

Студенческий центр управления полётами (СЦУП) как структурное подразделение СибГУ им М. Ф. Решетнева создан с целью расширения научно-образовательной деятельности университета в области информационно-телекоммуникационных технологий, подготовки высококвалифицированных инженерных кадров для космической отрасли, а также для освоения навыков практической работы студентов в области управления малыми космическими аппаратами (МКА).

Оборудование СЦУП рассчитано на осуществление приема и передачи командно-программной информации на бортовую аппаратуру малых космических аппаратов: Юбилейный-1, Михаил Решетнев (Юбилейный-2), Чибис, Аист и др. Для приема-передачи используются скрещенные многодиректорные антенны Яги-Уда с круговой поляризацией, расположенные на опорно-поворотных устройствах с возможностью сопровождения космического аппарата во время прохода. Частоты приема и передачи 435 и 145 МГц соответственно.

В настоящее время в связи с большим количеством промышленных помех на частоте приема 435 МГц (до 15 дБ) прием информации с малых космических аппаратов затруднителен. В связи с этим без ущерба для целевого назначения оборудования СЦУП искались пути дополнительного применения имеющейся аппаратуры.

В связи с тем, что некоторые спутники дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) передают инфор-

мацию на частотах 137 и 1700 МГц (АРТ – automatic picture transmission, LRPT – low-rate picture transmission, HRPT – high-resolution picture transmission) было принято решение адаптировать аппаратуру СЦУП на прием информации со спутников ДЗЗ [1; 2; 3].

Небольшое различие расчетной частоты антенны (145 МГц) и частоты принимаемого сигнала (~137 МГц) не сказывается на качестве принимаемого сигнала. Прием сигнала осуществляется по схеме: антенна-фидер-приемник-ЭВМ. Для минимизации затрат и упрощения обработки сигнала используется программно-определяемый-приемник (SDR). На выходе SDR-приемника сигнал для последующего декодирования и обработки поступает в ЭВМ по USB-порту.

Прием на 137 МГц осуществляется со спутников NOAA-15, -18, -19 (АРТ, пространственное разрешение – 4 км/пиксель) [4; 5; 6] и с космического аппарата Метеор-М2 (LRPT, 1км/пиксель) [7]. Для анализа и прогноза состояния акватории морей и океанов, включая контроль ледовой обстановки, контроля чрезвычайных ситуаций, экологического мониторинга окружающей среды создается библиотека принимаемых изображений.

В ближайшее время планируется адаптировать оборудование для приема информации с КА ДЗЗ на частотах 1700 МГц (HRPT-сигнал, 1 км/пиксель) и для приема радиоизлучения линий нейтрального водорода (21 см). Для этого планируется задейство-

вать рефлекторную антенну (параболическое зеркало) с соответствующими облучателями.

Таким образом, расширение функционала оборудования СЦУП позволяет:

- получать материалы для проведения исследовательских работ в отраслях наук о Земле,
- расширить возможности образовательного процесса,
- расширить спектр лабораторных работ по соответствующим дисциплинам (ДЗЗ, обработка сигналов, прием и передача информации, астрономия и др.).
- увеличить количество PR-моментов при проведении просветительской и экскурсионной деятельности СЦУП.

Библиографические ссылки

1. NOAA KLM User's Guide. Satellite and data description of NOAA's Polar-orbiting satellites from NOAA-15 and later. Section 4.2: APT System [Электронный ресурс]. URL: <https://web.archive.org/web/20130624033436/http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm/html/c4/sec4-2.htm> (дата обращения: 09.09.2020).
2. Structure of "Meteor-M" № 2 satellite data transmitted through VHF-band in direct broadcast mode [Электронный ресурс]. URL: https://planet.iitp.ru/english/spacecraft/meteor_m_n2_structure_2_eng.htm (дата обращения: 09.09.2020).
3. NOAA KLM User's Guide. Satellite and data description of NOAA's Polar-orbiting satellites from NOAA-15 and later. Section 4.1: HRPT System [Электронный ресурс]. URL: <https://web.archive.org/web/20130211013357/http://www.ncdc.noaa.gov/oa/pod-guide/ncdc/docs/klm/html/c4/sec4-1.htm> (дата обращения: 09.09.2020).
4. NOAA 15 [Электронный ресурс]. URL: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1998-030A> (дата обращения: 09.09.2020).
5. NOAA 18 [Электронный ресурс]. URL: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=2005-018A> (дата обращения: 09.09.2020).
6. NOAA 19 [Электронный ресурс]. URL: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=2009-005A> (дата обращения: 09.09.2020).
7. "Meteor-M" № 1 satellite [Электронный ресурс]. URL: http://planet.rssi.ru/english/index_eng.htm (дата обращения: 09.09.2020).

References

1. NOAA KLM User's Guide. Satellite and data description of NOAA's Polar-orbiting satellites from NOAA-15 and later. Section 4.2: APT System [Electronic resource]. URL: <https://web.archive.org/web/20130624033436/http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm/html/c4/sec4-2.htm> (access: 09.09.2020).
2. Structure of "Meteor-M" № 2 satellite data transmitted through VHF-band in direct broadcast mode [Electronic resource]. URL: https://planet.iitp.ru/english/spacecraft/meteor_m_n2_structure_2_eng.htm (access: 09.09.2020).
3. NOAA KLM User's Guide. Satellite and data description of NOAA's Polar-orbiting satellites from NOAA-15 and later. Section 4.1: HRPT System [Electronic resource]. URL: <https://web.archive.org/web/20130211013357/http://www.ncdc.noaa.gov/oa/pod-guide/ncdc/docs/klm/html/c4/sec4-1.htm> (access: 09.09.2020).
4. NOAA 15 [Electronic resource]. URL: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1998-030A> (access: 09.09.2020).
5. NOAA 18 [Electronic resource]. URL: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=2005-018A> (access: 09.09.2020).
6. NOAA 19 [Electronic resource]. URL: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=2009-005A> (access: 09.09.2020).
7. "Meteor-M" № 1 satellite [Electronic resource]. URL: http://planet.rssi.ru/english/index_eng.htm (access: 09.09.2020).

© Лапухин Е. Г., Золотарев В. В., Лапко Р. В., Денисов С. В., Аристов Н. И., 2020

МОНИТОРИНГ СНЕЖНОГО ПОКРОВА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Ю. В. Платонова¹, О. Ю. Комиссарова²

¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: platonovay@mail.ru

²АО «Ростехинвентаризация-Федеральное БТИ»
Российская Федерация, 660135, г. Красноярск, ул. Взлетная, 59

Проблема загрязнения окружающей среды является одной из глобальных проблем на планете Земля. Антропогенная нагрузка приводит к обострению экологической обстановки. Особая роль принадлежит городам. Для территории города Красноярска интерес вызывает изучение поведения и распространения загрязнений во всех средах, но из-за большой продолжительности зимнего периода, особенно актуален мониторинг снежного покрова.

Ключевые слова: картографические методы, дистанционное зондирование, Красноярск, снежный покров, токсичность, урбанизованная территория.

MONITORING OF SNOW COVER OF URBANIZED AREAS

J. V. Platonova¹, O. Y. Komissariva²

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: platonovay@mail.ru

²Rostexinventarizasiya-Federal
59, Take-off Str., Krasnoyarsk, 660135, Russian Federation

Pollution was one of the global problems on Earth's planet. Anthropogenic load leads to an aggravation of the environmental situation. Cities have a special role. For the territory of the city of Krasnoyarsk, the study of the behavior and spread of pollution in all environments is of interest, but due to the large pro-duration of the winter period, monitoring of snow cover is especially relevant.

Keywords: mapping methods, remote sensing, Krasnoyarsk, snow cover, toxicity, urbanized territory.

Снежный покров накапливает в своем составе практически все вещества, поступающие в атмосферу. В связи с этим, он обладает рядом свойств, делающих его удобным индикатором загрязнения природной среды [1–5]. Интегральная проба снега отбиралась на территории ряда рекреационных зон г. Красноярска в феврале 2019 г.

Пробы снежного покрова анализировались по реакции выживаемости и смертности инфузории *Paramecium caudatum* (рис. 1).

Для извлечения спектральных характеристик в точках отбора проб снежного покрова использовался программный пакет ArcGis. С помощью инструмента «Извлечь мультязначения в точки (Spatial Analyst)» были извлечены значения яркости ячеек в местоположениях, указанных в классе точечных объектов, из растров и записаны значения в таблицу атрибутов класса точечных объектов. В качестве входных данных указан растр территории исследования и точечный объект, характеризующий местоположение точек отбора проб снежного покрова.

В качестве входных данных указан растр территории исследования и точечный объект, характеризующий местоположение точек отбора проб снежного покрова. Значение ячейки извлечено для входного растра и добавлено в таблицу атрибутов к классу точечных объектов. Опция интерполяции определяет, как значения будут получены из растра. По умолчанию используется значение в центре выборки ячейки. Опция интерполяции будет использовать билинейную интерполяцию для интерполяции значения в центре ячейки.

Анализ полученных корреляционных матриц показал зависимость спектральных характеристик некоторых каналов и показателя токсичности снежного покрова с коэффициентами корреляции. Использование уравнения регрессии позволило получить значение токсичности снежного покрова для всей территории города Красноярска и его окрестностей (рис. 2).

Для проверки построенной картосхемы токсичности снежного покрова была проверена токсичность в точках отбора проб снежного покрова.

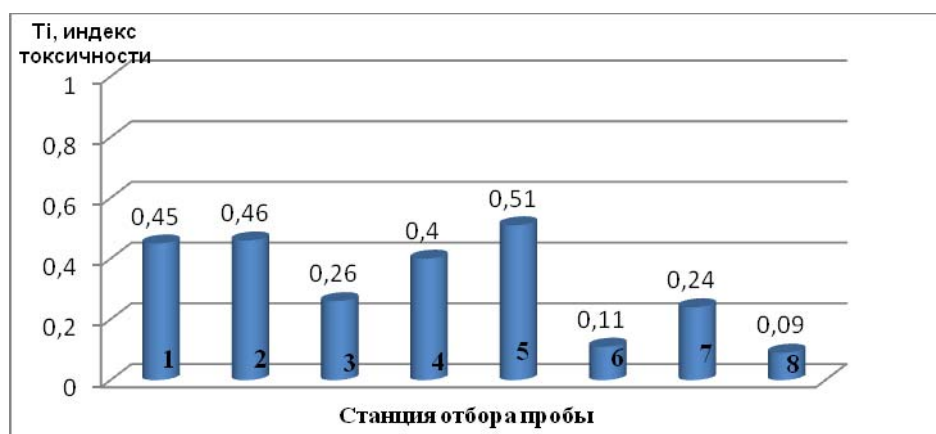


Рис. 1. Значение индекса токсичности снежного покрова в местах отбора проб (2019 г.): 1 – парк «Троя»; 2 – парк культуры и отдыха им. М. Горького; 3 – остров отдыха; 4 – парк им. Гагарина; 5 – сквер им. Чернышевского; 6 – остров Татышев; 7 – парк «Гвардейский»; 8 – зеленая зона микрорайона Ветлужанка

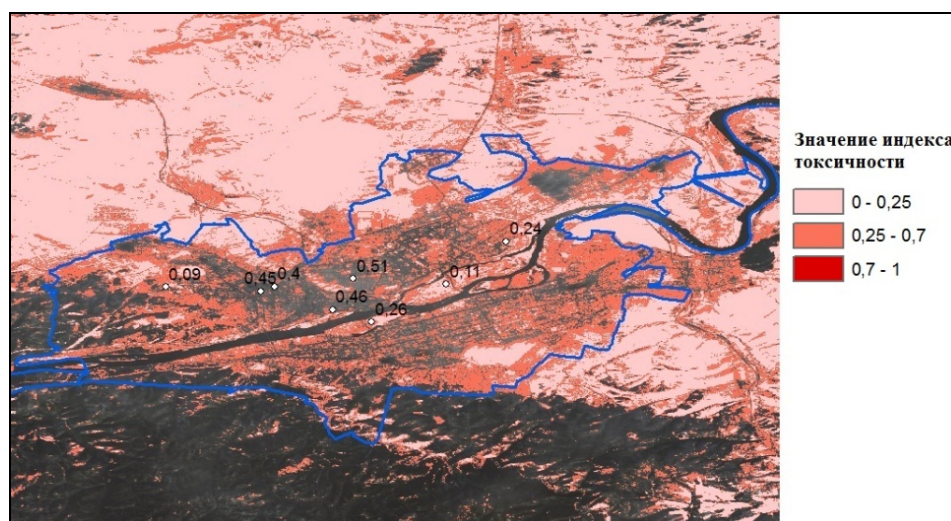


Рис. 2. Значение токсичности снежного покрова города Красноярска и его окрестностей за февраль 2019 г.

В точке отбора пробы снежного покрова о. Отдыха показатель токсичности на примере выживаемости инфузории *Paramecium caudatum* равен 0,26, а по построенной картосхеме равен 0,30. Этот показатель лежит в границах доверительного интервала, и, следовательно, данная оценка является правильной (достоверной). В точке отбора – сквер «Чернышевского» показатель токсичности равен 0,51, а по построенной картосхеме равен 0,44. Этот показатель лежит в границах доверительного интервала, и, следовательно, данная оценка является правильной (достоверной). В точке отбора пробы – парк им. Гагарина показатель токсичности равен 0,40, а по построенной картосхеме точка отбора проб не вошла в построенную картосхему токсичности. Это зависит от результата проведенной классификации космического снимка и точка отбора пробы снежного покрова определилась в другой класс, не характеризующий снежный покров. Ближайший показатель токсичности по построенной

картосхемы равен 0,41, расстояние до которого равно примерно 45 метров. В точке отбора снежного покрова парк «Троя» показатель токсичности равен 0,45, а по построенной картосхеме равен 0,50. Этот показатель лежит в границах доверительного интервала, и, следовательно, данная оценка является правильной (достоверной).

В результате выполненной работы был рассмотрен картографический метод экологического мониторинга загрязнения снежного покрова; лабораторные (камеральные) исследования образцов снега показали возможность изучения загрязненности урбанизированных территорий методами картографического мониторинга с использованием данных дистанционного зондирования; составленная картосхема токсичности снежного покрова, позволяет наглядно продемонстрировать и получить информацию о значениях уровня токсичности снежного покрова на всей территории города Красноярска и его окрестностей; полученная

картосхема позволяет определить участки на территории Красноярска и его окрестностей, где наблюдается допустимый, умеренный и высокий уровни токсичности снежного покрова.

Таким образом, по полученным результатам можно сказать, что оценки большинства точек отбора проб удовлетворяют полученным интервалам достоверности построенной модели токсичности снежного покрова.

Библиографические ссылки

1. Вольман В. В. Организация мониторинга территорий с различной антропогенной нагрузкой: курсовая работа. М. : Московский политехнич. ун-т. 2017. 17 с.
2. Николаева О. Н., Ромашова Л. А. Роль картографического метода исследования в экологическом мониторинге окружающей среды / СГГА. Новосибирск, 2009. С. 104–108.
3. Примаченко Е. И. Картографическое моделирование загрязнения снежного покрова на примере Мордовии : автореферат. М., 2003. 150 с.
4. Салищев К. А. Картоведение : учебник. 3-е изд. М. : Изд-во МГУ, 1990. 400 с.

5. Берлянт А. М. Картографический метод исследования : монография. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1978. 257 с.

References

1. Volman V. V. Organization of monitoring of territories with various anthropogenic on-load: coursework. M. : Moscow Polytechnic University, 2017. 17 p.
2. Nikolaev O. N., Romashova L. A. The role of the cartographic method of research in environmental monitoring of the environment / SGGA. Novosibirsk, 2009. P. 104–108.
3. Primachenko E. I. Cartographic modeling of snow cover pollution on the example of Mordovia : autoreferat. M., 2003. 150 p.
4. Salishchev K. A. Kartovedenie: textbook/K.A. Salishchev. 3rd ed. M. : Publishing House of Moscow State University, 1990. 400 p.
5. Berlant A. M. Cartographic method of research : monograph. M. : Publishing House of Mosk. un-ta, 1978. 257 p.

© Платонова Ю. В., Комиссарова О. Ю., 2020

УДК 528.8

БАТИМЕТРИЯ ОЗЕРА УКОК СРЕДСТВАМИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В. П. Тубольцев¹, В. Л. Авдеенок

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

¹E-mail: Vitalya.98@mail.ru

Рассматриваются результаты решения задачи батиметрии озера Укок с помощью данных дистанционного зондирования Земли. Построение батиметрической модели основано на спектральной зависимости глубины проникновения электромагнитного излучения в водной среде.

Ключевые слова: дистанционное зондирования Земли, батиметрия, мультиспектральные изображения.

BATHYMETRY OF LAKE UKOK BY MEANS OF EARTH REMOTE SENSING

V. P. Tuboltsev¹, V. L. Avdeenok

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

¹E-mail: Vitalya.98@mail.ru

The results of solving the problem of bathymetry of Lake Ukok using Earth remote sensing data are considered. The construction of the bathymetric model is based on the spectral dependence of the depth of penetration of electromagnetic radiation in the aquatic environment.

Keywords: remote sensing of the Earth, bathymetry, multispectral images.

Введение. Батиметрия – измерение глубины в океанах, реках или озерах. Точно так же, как топографические карты представляют трехмерные особенности (или рельеф) сухопутной местности, батиметрические карты иллюстрируют землю, находящуюся под водой. Изменения в рельефе морского дна могут быть изображены цветными и контурными линиями, названными контурами глубины или изобатами. Батиметрия является основой науки гидрографии, которая измеряет физические особенности водного объекта.

Характер распространения электромагнитного излучения зависит от свойств среды, через которое оно проходит. Различные части спектра по-разному взаимодействуют с веществом. В условия водной среды часть излучения отражается от поверхности, часть рассеивается растворенными веществами, а часть поглощается. При исследовании распространения видимой части спектра электромагнитного излучения в водной среде используют освещенность, которая зависит от толщины слоя воды, степени отражения поверхностью воды и степени рассеивания. Для прозрачных вод, когда практически отсутствуют взвеси и фитопланктон, красная область видимой части электромагнитного излучения проникает на глубину до 10 м, жёлтая – до 20 м, и только синяя область достигает глубины 40 м. Поэтому материалы космической съемки земной поверхности обеспечивают изучение рельефа дна лишь в зоне мелководного шельфа.

Основа метода решения задач батиметрии. Метод основан на спектральной зависимости глубины

проникновения электромагнитного излучения в водной среде. Поэтому набор изображений, полученных в разных спектральных диапазонах, обеспечивает разноглубинные срезы дна и водной толщи, что позволяет использовать результаты мультиспектральной съёмки для батиметрической обработки рек и водоемов.

С увеличением глубины коэффициент отражения различных каналов уменьшается, т.е. значение натурального логарифма коэффициента поглощения спектрального канала с более высоким поглощением уменьшается быстрее значения натурального логарифма коэффициента поглощения спектрального канала с более низким поглощением.

Результаты применения. Исследуемым водоемом является озеро Укок, расположенное в юго-западной части плоскогорья на территории Республики Алтай. Исходная информация была сформирована по спутниковой съемке Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 метров. Для расчета отношения натуральных логарифмов были использованы каналы 2 и 3, то есть синий и зеленый участки электромагнитного излучения. На рис. 1 результат обработки исходной информации получили растровое изображение пространственного отображения отношения коэффициентов поглощения спектральных каналов.

На рис. 2 батиметрическая карта, построенная по информации о промерах глубин, полученных на основе исследования В.В. Селегея и В.А. Загоруйко в 2005 году.

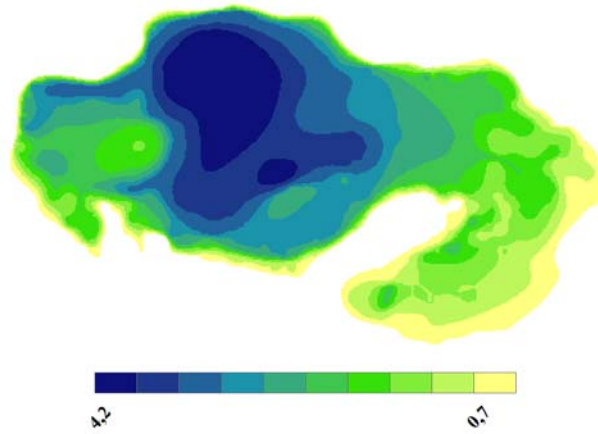


Рис. 1. Пространственное распределение отношения коэффициентов отражения 2 и 3 каналов

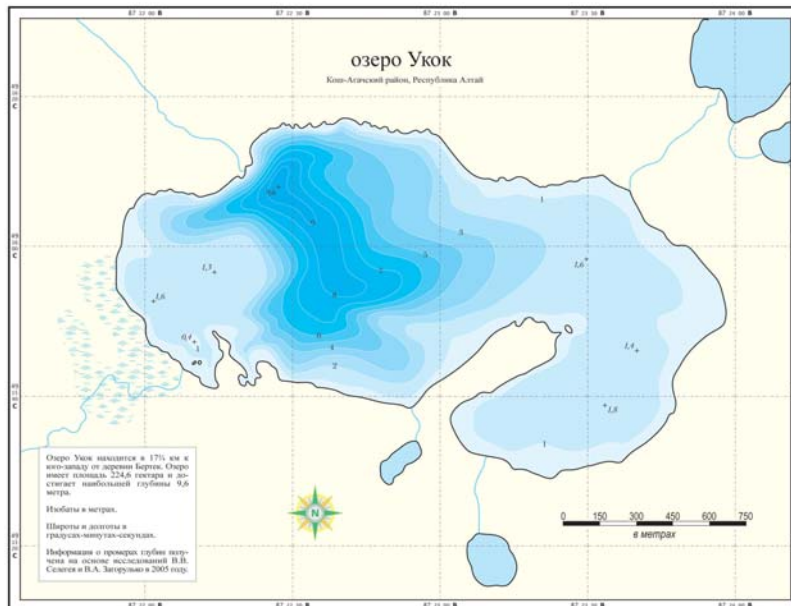


Рис. 2. Батиметрическая карта озера Укок

Пространственное распределение результатов работы и готовой батиметрической карты озера Укок визуально сопоставимы. Границы относительной глубины и изобат, изображенных на батиметрической карте, имеют схожий характер, а насыщение оттенка при приближении к центральной части водоема указывает на увеличение глубины. Использование метода для решения задач батиметрии, представленный в работе, увеличивает оперативность получения информации о характере рельефа водоема и снижает финансовые затраты за счет отказа от дорогостоящего исследования водоема специальными приборами, например, эхолотом.

Библиографические ссылки

1. Физика. Большой энциклопедический словарь / гл. ред. А. М. Прохоров. 4-е изд. М. : Большая Российская энциклопедия, 1999. С. 874–876.

2. Моделирование решения задач батиметрии водоёмов самарской области средствами дистанционного зондирования земли / Г. П. Аншаков, В. А. Малиновский, Е. А. Синельникова, В. К. Скимунт // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета 2013. № 4 (42). С. 49–57.

3. Stumpf R. P., Holderied K. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types // *Limnology and Oceanography*. 2003. Vol. 48(1). P. 547–556.

4. Lyzenga D. R. Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data // *International Journal of Remote Sensing*. 1981. Vol. 2(1). P. 71–82.

5. Lyzenga D. R. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features // *Applied Optics*. 1978. Vol. 17 (3). P. 379–383.

References

1. Physics. Large encyclopedic dictionary / Chief ed. A. M. Prokhorov. 4th ed. M. : Bolshaya Rossiyskaya enciklopediya, 1999. P. 874–876.
2. Modelling of solving problems of samara region 's water bodies bathymetry by means of earth remote sensing / G. P. Anshakov, V. A. Malinovskii, E. A. Sinelnikova, V. K. Skirmunt // Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. 2013. № 4 (42). P. 49–57.
3. Stumpf R. P., Holderied K. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types // Limnology and Oceanography. 2003. Vol. 48(1). P. 547–556.
4. Lyzenga D. R. Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data // International Journal of Remote Sensing. 1981. Vol. 2(1). P. 71–82.
5. Lyzenga D. R. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features // Applied Optics. 1978. Vol. 17 (3). P. 379–383.

© Тубольцев В. П., Авдеенок В. Л., 2020

АНАЛИЗ УСЫХАНИЯ ТЕМНОХВОЙНЫХ ДРЕВОСТОЕВ НА ТЕРРИТОРИИ КУЗНЕЦКОГО АЛАТАУ*

А. С. Шушпанов^{1,2*}, И. А. Петров¹, А. С. Голуков^{1,3}

¹Институт леса им В. Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 28

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

³Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

*E-mail: shas87@bk.ru

Целью работы проследить динамику усыхания темнохвойных древостоев на восточном макросклоне Кузнецкого Алатау под влиянием синергизма биотических и абиотических факторов.

Ключевые слова: нормализованный инфракрасный разностный индекс (NDII), цифровая модель рельефа, данные дистанционного зондирования.

ANALYSIS OF DARK CONIFEROUS STANDS MORTALITY ON THE TERRITORY OF KUZNETSKY ALATAU

A. S. Shushpanov^{1,2*}, I. A. Petrov¹, A. S. Golyukov^{1,3}

¹V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS
50/28, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

³Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

*E-mail: shas87@bk.ru

The purpose of this work was to analyze the dynamics of mortality of dark coniferous stands on the eastern macroslope of the Kuznetsk Alatau under influence synergism of biotic and abiotic factors.

Keywords: normalized difference infrared Index (NDII), digital elevation model, remote sensing data.

В последние десятилетия наблюдаются катастрофические усыхания древостоев в лесах бореальной зоны. Так в Прибайкалье, в горах Кузнецкого Алатау, Восточного и Западного Саяна ухудшается состояние кедровников и пихтарников [1; 2]. В США усыхают древостои, сформированные *Pinus ponderosa* Engel [3; 4].

Вероятной причиной усыхания хвойных бореальной зоны является синергизм неблагоприятных климатических факторов (преимущественно возрастание засушливости) и биотических воздействий (насекомые-вредители, грибные и бактериальные фитопатогены) [2–5].

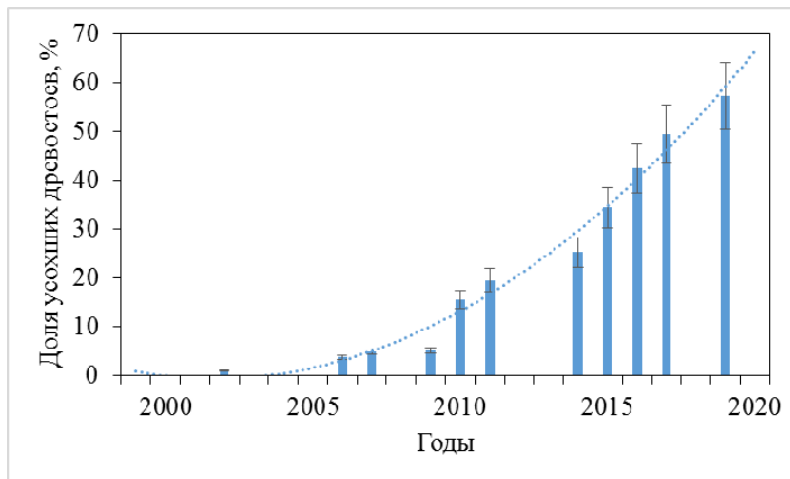
Объект исследования. Анализировались темнохвойные древостои, расположенные на восточном макросклоне Кузнецкого Алатау (54°29' с. ш., 88°49' в. д.). Преобладают темнохвойные леса, представленные пихтой (*Abies sibirica*) и кедром (*Pinus sibirica*), произрастающие на высотах 300–1700 м на у. м.

Материалы. Для анализируемого района исследования были подобраны снимки Landsat-5/7/8 за период с 1999 по 2019 гг. Всего 12 летних снимков с облачностью <10 %: 1999, 2002, 2006, 2007, 2009, 2010, 2011, 2014, 2015, 2016, 2017, 2019 гг. А также материалы полевых исследований 2013, 2019 гг. и съемке сверхвысокого разрешения (~0,5 м; Google Maps, Yandex Maps, ESRI ArcGIS World Imagery data).

Методика. Все снимки прошли предварительную обработку включающую в себя атмосферную коррекцию и топографическую нормализацию методом С-коррекции [6]. Для удаления облачности и теней от них использовались дополнительные информационные файлы о качестве съемки.

По снимку 1999 г., методом максимального правдоподобия с использованием пороговой функции, создана маска темнохвойных древостоев (точность маски темнохвойных древостоев – 94 %, κ-статистика – 0,88). Общая площадь темнохвойных древостоев составила 527 тыс. га (17 % сцены Landsat территории).

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 18-45-240003 и 18-05-00432.



Динамика площадей усыхающих темнохвойных древостоев по годам с накоплением

Выделение усыхающих древостоев производилось в пределах маски темнохвойных древостоев 1999 г., на основе снимков 2002–2019 гг. по инфракрасному индексу (NDII): $NDII = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$, где NIR – яркость в ближнем ИК диапазоне (851–879 нм), SWIR – яркость в среднем ИК (1566–1651 нм).

Точность классификаций оценивали методом кап-па (κ)-статистики (использовалось 300 тестовых точек, распределённых на анализируемой территории случайным образом).

Результаты. По временной серии снимков Landsat установлено, что за 1999–2019 гг. площадь усыхающих темнохвойных древостоев в Кузнецком Алатау составила ~290 тыс. га (~57 % темнохвойных древостоев) (см. рисунок). Первые признаки усыхания обнаружены на снимке 2002 г. (5,3 тыс. га). Доля усыхающих древостоев начиная с 2010 гг. превысила 10 % площади темнохвойных древостоев.

Ошибки пропуска и включения составили 23.81 и 20 % при $\kappa = 0,76$ для поврежденных темнохвойных древостоев, что соответствует хорошему уровню точности классификации.

Заключение. В целом, результаты анализа индекса NDII и экспертный анализ снимков указывают на ухудшение состояния темнохвойных древостоев в начале 21 века на территории Кузнецкого Алатау. Так по данным съемки Landsat за период с 1999 по 2019 гг., ~57 % темнохвойных древостоев отнесены к усыхающим древостоям.

Библиографические ссылки

1. Усыхание темнохвойных древостоев Прибайкалья / В. И. Харук, С. Т. Им, И. А. Петров и др. // Сибирский экологический журнал. 2016. № 5. С. 750–760.
2. Siberian Pine Decline and Mortality in Southern Siberian Mountains / V. I. Kharuk, S. T. Im, P. A. Oskorbin et. al. // Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 310. P. 312–320.
3. Logan J. A., Regniere J., Powell J. A. Assessing the impacts of global warming on forest pest dynamics //

Frontiers in Ecology and Environment. 2003 Vol. 1. P. 130–137.

4. Millar C. I., Stephenson N. L. Temperate forest health in an era of emerging megadisturbance // Science. 2015. Vol. 349, № 6250. P. 823–826.

5. Observed and anticipated impacts of drought on forests insects and diseases in the United States / T. E. Kolb, C. J. Fettig, M. P. Ayres et. al. // For. Ecol. Manage. 2016. Vol. 380. P. 321–324.

6. Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for mapping vegetation types / D. Riano, E. Chuvieco, J. Salas et. al. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2003. Vol. 41. P. 1056–1061.

References

1. Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A., Yagunov M. N. Decline of Dark Coniferous Stands in Baikal Region. Contemporary Problems of Ecology. 2016. Vol. 9, № 5. P. 617–625.
2. Siberian Pine Decline and Mortality in Southern Siberian Mountains / V. I. Kharuk, S. T. Im, P. A. Oskorbin et. al. // Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 310. P. 312–320.
3. Logan J. A., Regniere J., Powell J. A. Assessing the impacts of global warming on forest pest dynamics // Frontiers in Ecology and Environment. 2003 Vol. 1. P. 130–137.
4. Millar C. I., Stephenson N. L. Temperate forest health in an era of emerging megadisturbance // Science. 2015. Vol. 349, № 6250. P. 823–826.
5. Observed and anticipated impacts of drought on forests insects and diseases in the United States / T. E. Kolb, C. J. Fettig, M. P. Ayres et. al. // For. Ecol. Manage. 2016. Vol. 380. P. 321–324.
6. Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for mapping vegetation types / D. Riano, E. Chuvieco, J. Salas et. al. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2003. Vol. 41. P. 1056–1061.



Секция
**«ЭКСПЛУАТАЦИЯ И НАДЕЖНОСТЬ
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ»**

УДК 614.842.6

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОЙ ПОЖАРНО-СПАСАТЕЛЬНОЙ АВИАЦИИ ЗАПАДНОГО И РОССИЙСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Е. А. Ачкасова, К. Дутта

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

Приведен сравнительный анализ современных российских и зарубежных средств пожаротушения. Рассмотрим, насколько эффективен конкретный самолет или вертолет, какой способ тушения пожаров применим в различных условиях.

Ключевые слова: тушение пожаров, самолеты-амфибии, вододисперсионные системы.

ANALYSIS OF MODERN FIRE AND RESCUE AIRCRAFTS OF WESTERN AND RUSSIAN MANUFACTURERS

E. A. Achkasova, K. Dutta

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*Email: formula@mail.ru

The article provides a comparative analysis of modern Russian and foreign fire extinguishing means. Consider how effective is a particular aircraft or helicopter, what method of fire extinguishing is applicable in various conditions.

Keywords: fires extinguishing, amphibious aircraft, water dispersion systems.

The problem of fire safety has been actual and always at any times. The calamity turns out to take large scale character bringing great damage to people and property. Firefighters are engaged in extinguishing fires not only from the land, but also from air for empowering the delivery of extinguishing agents to the centre of ignition. The aviation industry of different countries created some great fleet of aircrafts for firefighters. The best design engineers developed a variety of innovative tools to facilitate the work of the fire aviation. But how effective is a particular aircraft or helicopter? What firefighting way is the most suitable for the aircraft? So we conducted the analysis of Russian and Western made firefighting planes considering the extinguishing agents and methods of using firefighting planes and helicopters.

Putting out forest fires is still a topical problem. Mountain and forest areas are impassable for the land transport and people, and thus it complicates firefighting actions. In order to increase the possibility, mobility and to ensure fire safety in natural sites, the amphibious aircrafts are used. They differ in classes and operating methods. We have analysed the Canadian bombardier CL-415 and Russian BE-200 (fig. 1).

Bombardier 415, the turboprop amphibious aircraft was constructed in 1991 by the Canadair Company [2]. CL-415 inherited a lasting glider of amphibian CL-215, which was designed in 1969, although the design of the aircraft was changed. It can be used to perform search and rescue operations, to deliver the rescue teams and special equipment in disaster prone areas. The CL-415 amphibian

is a standard version designed to extinguish fires [6]. The plane can take-off from both land and water surfaces. Bombardiers are successfully used in countries where the forests are located in the hills near the coast or large water bodies. The plane has four tanks with a total capacity of 6140 litres.

The plane can also be converted to a transport plane. The firefighting variant is capable to carry up to 8 passengers, but after conversion into a passenger model the capacity increases up to 30. Today this model is well exploited by the USA, Canada and several EU nations. The advantage of using this aircraft is low cost, and availability of consumables. Therefore a large number of bombardiers in the fleet provide the mobility in combat missions.

Multi-purpose amphibious aircraft BE-200 is designed by the design department of G. M. Berlieva [1]. The first flight of the prototype was in September 24, 1998. It is designed to perform various tasks, including parachuting, rescue, passenger and freight traffic, monitoring the environmental state, patrolling the marine economic zone, etc. This aircraft can even take off from snow covered areas after installation of ski-gear. The main applications are the protection of water surfaces, environmental missions, firefighting, transportation of passengers and cargo.

For number of characteristics, the plane has no analogues in the world. The power plant includes two turbojet engines. BE-200 is equipped with thermal images for a better visibility.



Fig. 1. Bombardier CL-415, Russian BE-200



Fig. 2. Eurocopter AS350 B2/B3, Kaman K-MAX

The mass of water discharging per one refuelling is 12 tones. The plane is available in different modifications depending on the tasks to be performed.

Speaking of these aircrafts and comparing them we can see that the effective firefighting is due to several factors: the area of protected areas, remoteness, availability of aircraft maintenance and qualified pilots. BE-200 as best in class seaplane is capable to perform a wide range of the tasks, for example the using of only one aircraft we can dramatically change the fire situation in the region[5]. But for small operations Russian aircraft loses its effectiveness because of the extra costs comparing with the bombardier. CL-415 is able to do the accurate strikes on the fire site and in large quantities it provides sufficient water over large areas [4].

Currently in many cities of the world there is an acute problem of high-rise buildings protection from fire. To solve this problem we can use a helicopter equipped with a firefighting system. The helicopter is capable quickly, bypassing the traffic jams to arrive at the scene of fire, and immediately start extinguishing. But taking actions in traditional way of throwing water on the roof of the building can cause greater damage than the fire itself. Therefore designers are trying to create different types of horizontal extinguishing systems for placing them on the helicopters. Realization of this idea gives an opportunity to let the water jet in a burning apartment window and economical consumption of extinguishing agents. In addition hovering near an open fire we can put it out with a mounted jet. We will review the operation of these systems on two helicopters: Eurocopter AS350 B2/B3 produced in France and Ka-32A1 produced in Russia (fig. 2).

Eurocopter AS350 B2/B3 is the result of the joint work of French and Dutch companies Aerospatiale and IFEX[3]. The helicopter is equipped with a water disperse fire suppression system IFEX 350 with installation of the external 300 litres water fuel tank and a double cannon 2 X 18 litres , and Kaman K-MAX with built in water tank up to 2000 litres and dual cannon 2 X25 litres. The manufacturer claims that 100 litres released their water cannon IFEX, by performance is equal to 1000 litres dropped from helicopter conventional manner. Effective “shooting” carried by pulses of spray at a distance of 10 to 100 m. The additives can be added to the water. The system can be filled in from the surrounding reservoirs in the hover.

The disadvantage of this helicopter is a small supply of water and the reloading of 2–3 seconds. As in the process of the liquidation of large-scale fires one –off massive discharge of extinguishing substances is important, its use is quite limited. The helicopter S-64F Heli tanker can also be mounted with the horizontal water-cannon, controlled in a vertical plane. Its use is limited by firing range, cost and bulkiness of the carrier.

KA-32 is the Russian helicopter manufactured by Kamov company. Structurally KA-32 is a civil modification of the ship’s antisubmarine helicopter KA-27. Firefighting variant KA-32 can be equipped with mechanism for firefighting of Russian or American manufacturer. The Russian fire helicopter is reworked for firefighting in “soyuz” plant (Moscow Region). The US helicopters are supplied with firefighting equipment by Simplex company. The Russian version of the fire helicopter (KA-32A1) is equipped with a tank of water equal to 2800 litres, whereas American – 2952 litres.

It is also possible to install water-dispersive system "Igla-V". Sprayed to the dispersed state the water is shot out under high pressure by short pulses. The volume of water in the tanks under the floor of the helicopter is equal to 740 litres. On the left side of fuselage battery of cans of compressed air is attached. Developers claim that the range of shot is about 50 m. The length of the jet allows the helicopter to keep a safe distance from the wall of the building, its high speed and as a consequence, the lack of a strong curvature of the trajectory of the jet facilities aiming and allows to direct the water deep into the burning room. In addition, the proposed system provides a much more efficient extinguishing than traditional fire-fighting equipment. The drop size in the jet is about 100 microns. When it is injected into the combustion zone there is an intense evaporation, thereby forming a steam which displaces the air, due to the high speed flameout occurs. The impact of three factors simultaneously allows to extinguish fires with much less amount of water than while using traditional ways. In this case, buildings don't get harm related to exposure the water to the lower floors. Moreover extinguishing system could be used against the burning of petroleum products. The helicopter, equipped with the system can also be used to extinguish fires in industrial plants, gas stations, forest fires and fires in inaccessible places (e. g. in the mountains). In addition, other rescue equipment can be mounted on the helicopter; it can be used as a means of salvation for various emergencies.

Currently, the system "Igla-V" is intended for the Ka-32A "Kamov" company, but can be

installed on any other helicopters. Accordingly, its carrying capacity will be determined by the duration of the installation. At the 49th World Exhibition "Brussels Eureka – 2000" "Igla-V" got a gold medal.

So we compared two helicopters carrying various extinguishing horizontal system, with the

common principle of work. It could be added that any of these systems can be installed on any helicopters with the necessary load capacity. In our opinion, both systems successfully cope with the firefighting, the difference is in the amount of water used by the system for 1 volley and the volume of water in the tanks.

Summing up it can be argued that the using the aircraft and various innovative solutions in the firefighting improves the quality of fire safety, where the decisive factor is the mobility, timeliness and accuracy.

Specialists of both domestic and foreign aviation industries greatly succeeded in the aircraft adaptation to the fire-fighting means constantly offering new ideas in this area [7]. The analysis contains not only informative value, but also conveys the experience of aircraft application and equipment to the firefighting. Fire Aviation of Russian production is calculated in units, as its basic principle of extinguishing is a great release of quenching substances for one flight, while foreign counterparts eliminate the fire using a large fleet. Certainly, we cannot talk about the technical advantages, because the methods of extinguishing depend on a number of factors, which firefighters in different countries face with.

References

1. Beriev Be-200 [Electronic resource]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Бе-200> (access: 16.04.2020).
2. Bombardier 415 [Electronic resource]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Bombardier_415 (access: 17.04.2020).
3. Aérospatiale AS.350 Écureuil [Electronic resource]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Aérospatiale_AS.350_Écureuil (access: 16.04.2020).
4. Stephen Bryen [Should California consider buying or leasing Russian firefighting aircraft?] [Electronic resource]. URL: <http://www.bryensblog.com/california-consider-buying-leasing-russian-firefighting-aircraft/> (access: 18.04.2020).
5. Russian firefighting plane could spark boom in local aviation industry [Electronic resource]. URL: https://lompocrecord.com/news/local/russian-firefighting-plane-could-spark-boom-in-local-aviation-industry/article_2c201a26-677b-52ae-8030-f417f30f6cf0.html (access: 01.05.2020).
6. The jaw dropping missions of fire-fighting pilots [Electronic resource]. URL: <http://www.bbc.com/future/story/20150821-the-jaw-dropping-missions-of-fire-fighting-pilots> (access: 19.04.2020).
7. Alexander S. Klimenko, Stanislav A. Sukhov, and Grigory Ya. Dricker. [Program to study model fires and fire extinguishing systems for aircraft and helicopters at the rd&pe zvezda full-scale test facilities] [Electronic resource]. URL: https://www.nist.gov/system/files/documents/el/fire_research/R0000300.pdf (access: 16.04.2020).

© Ачкасова Е. А., Дутта К., 2020

МЕТОД ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ РАСТРОВОЙ ОБРАБОТКОЙ ФОТОГРАФИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

В. Ф. Бадыгов, М. Г. Елизарьева, О. П. Батку, Г. Д. Коваленко

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

Приведен метод обнаружения лесных пожаров с помощью растровой обработки фотографий.

Ключевые слова: лесные пожары, растровая обработка, космическая съемка.

METHOD FOR VISUALIZATION OF FOREST FIRES BY RASTER PROCESSING OF PHOTOS OBTAINED USING SATELLITE IMAGERY

V. F. Badigov, M. G. Elizarieva, O. P. Batku, G. D. Kovalenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
Email: badygovvf@gmail.com

The article provides a method for detecting forest fires using raster processing of photographs.

Keywords: Forest fires, raster processing, satellite imagery.

В предыдущей публикации был рассмотрен вопрос применения БПЛА для обнаружения лесных пожаров с последующей растровой обработкой на примере программы HESPERUS.

Полученный нами результат позволил определить очаги пожаров на задымленной территории, где явных источников пожара не видно [1].

В данной работе рассмотрен вопрос обнаружения лесных пожаров с последующей растровой обработкой снимков полученных с помощью космической съемки.

Использование космических данных для мониторинга пожарной обстановки по сравнению с авиаметодами позволяет быстро и экономически более эффективно получать объективную и независимую информацию для оперативного принятия решений по борьбе со стихией [5].

В наших ранних работах [2] полученные результаты визуализации различных энергетических источников, начиная от света лампы до атомного взрыва. Было установлено, что растровая обработка позволяет обнаруживать энергетические аномалии независимо от расстояния и состояния окружающей среды. Это дает возможность применить программу растровой обработки для получения информации об источнике пожара.

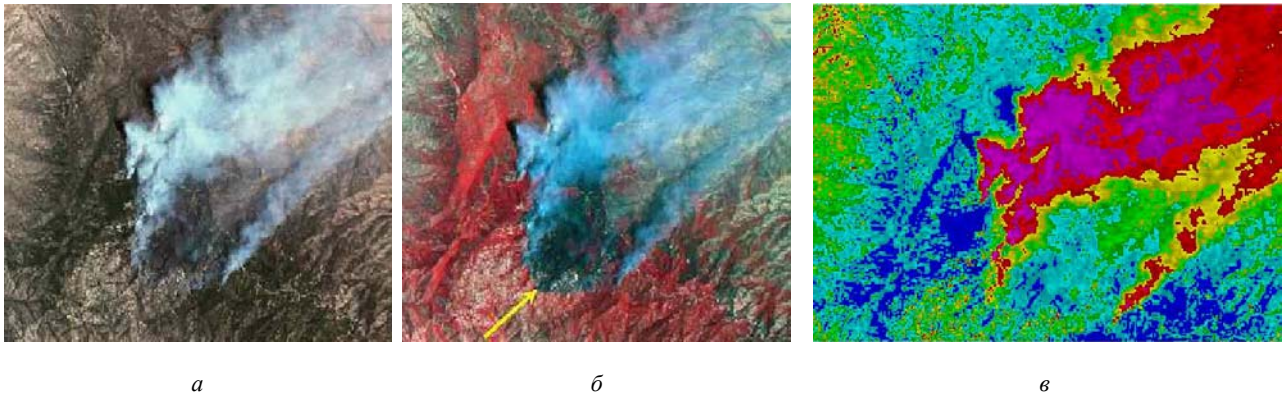
В данной работе предлагается использование метода определения очагов пожара невидимых в из-за задымленности с использованием ПО для растровой обработки снимков очагов возгорания на примере программы «Hesperus [xx]» [3]. Программа отслеживает градиентность в аппроксимации кривой Гаусса (гистограммы). Следовательно, использование программы HESPERUS приемлемо для выявления градиентной картины в изучаемом объекте.

Последовательность использования программы HESPERUS необходимо взять изображение в расширении bmp. Затем активировать файл HESPERUS и на иконке AMLab HESPERUS через кнопку импорт – экспорт вызвать соответствующий файл. После появления иконки «Импорт – экспорт» найти значок «открытие папок» и через него вызвать иконку «Открыть», где вызывается главное меню. Выбрав искомый файл, нажатием левой кнопки мыши перетаскиваем его в иконку «Импорт – экспорт», нажимаем кнопку выполнить, появляется иконка «Импорт BMP». Нажатием кнопки «Выполнить» запускаем обработку файла. Появляется информация о времени выполнения. Когда появится заполнение 100 % нажимается кнопка «просмотр» и появляется окна B, G, R – голубой, зеленый, красный фильтры. С помощью меню «Изображение» вызываем иконку «палитра» и выбираем нужный набор цветовых сочетаний.

В качестве примера рассмотрим следующие фотографии.

На рисунке представлены фотографии, взятые из интернета [4], одной и той же местности сделанные: а) видовой рисунок, б) в инфокрасном излучении, в) с применением программы HESPERUS.

Учитывая особенности применяемых методов, следует отметить, что растровой обработкой выделяется градиентная картина дисперсии излучаемого потока от его источника через пелену дыма. В данном случае использован красный фильтр (R), поэтому на фокальной плоскости видеокамеры зафиксирована красная часть спектра, что соответствует огненному участку снятой поверхности. Видно, что в эпицентре пожара на тепловизорном плане снятой картины, происходит динамичный процесс турбулизации горячей среды.



Изображения одной и той же местности, (а) видовой рисунок (б) в инфокрасном излучении (в) с применением программы HESPERUS

Из приведенного сопоставления можно охарактеризовать растровый метод, как один из способов градиентной оценки горящих площадей при визуализации задымленных участков. Сравнивая снимок рисунка, а и б можно сделать вывод, что инфокрасный метод отображает границу по облаку задымления. А методом растровой обработки рисунок, в проявляется излучением тонкого приземного слоя, где задымления еще не проявляется.

Таким образом, обработка снимков с использованием программы HESPERUS позволят быстро обработать снимки, полученные из космоса и получить очаги и границы пожаров.

Библиографические ссылки

1. Бадьгов В. Ф., Елизарьева М. Г., Коваленко Г. Д. Метод визуализации лесных пожаров растровой обработки фотографии полученных с помощью БПЛА // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2020.
2. Коваленко Г. Д. Лучевая трансляция сигналов в космосе // Наука и современность : сб. материалов XIX Междунар. конф. / под. общ. ред. С. С. Чернова. Ч. 1. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2012. С. 12–17.
3. Виноградов М. Современные средства визуализации и обработки двумерных научных данных [Электронный ресурс]. URL: www.amlab.ru/paper_max.shtml (дата обращения: 10.06.2020).
4. Обнаружение пожаров, аварий на железнодорожных трассах и других объектах [Электронный ресурс]. URL: https://present5.com/presentation/61571206_437848589/image-12.jpg (дата обращения: 12.06.2020).

5. Обнаружение пожаров по тепловым снимкам [Электронный ресурс]. URL: http://www.geogr.msu.ru/cafedra/karta/materials/heat_img/files/2/pozhary.htm (дата обращения: 12.06.2020).

References

1. Badygov V. F., Elizar'eva M. G., Kovalenko G. D. Metod vizualizacii lesnyh pozharov rastrovoy obrabotki fotografii poluchennyh s pomoshch'yu BPLA // Aktual'nye problemy aviacii i kosmonavтики : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. ; Reshetnev University. Krasnoyarsk, 2020.
2. Kovalenko G. D. Luchevaya translyaciya signalov v kosmose // Nauka i sovremennost' : sb. materialov XIX Mezhdunar. konf. / pod. obshchej redakciej S. S. Chernova. Part 1. Novosibirsk : izd-vo NGTU, 2012. P. 12–17.
3. Vinogradov M. Sovremennye sredstva vizualizacii i obrabotki dvumernyh nauchnyh dannyh [Electronic resource]. URL: www.amlab.ru/paper_max.shtml (access: 10.06.2020).
4. Obnaruzhenie pozharov, avarij na zheleznodorozhnyh trassah i drugih ob"ektah [Electronic resource]. URL: https://present5.com/presentation/61571206_437848589/image-12.jpg (access: 12.06.2020).
5. Obnaruzhenie pozharov po teplovyim snimkam [Electronic resource]. URL: http://www.geogr.msu.ru/cafedra/karta/materials/heat_img/files/2/pozhary.htm (access: 12.06.2020).

© Бадьгов В. Ф., Елизарьева М. Г.,
Батку О. П., Коваленко Г. Д., 2020

УДК 629.7.017.1

**АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
В АВИАЦИОННО ТЕХНИЧЕСКОМ ЦЕНТРЕ «КРАСЭЙР» В ПЕРИОД ЗАВЕРШЕНИЯ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ АВИАКОМПАНИИ**

О. Г. Бойко*, Е. А. Ачкасова, С. С. Тришин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: bouko1962@yandex.ru

Рассмотрены статистические данные по процессу технической эксплуатации отечественных воздушных судов авиакомпании «КрасЭйр», с целью оценки эффективности деятельности авиационно технического центра. Выполнена оценка параметров процесса с использованием аппарата теории Марковских процессов.

Ключевые слова: процесс технической эксплуатации, авиакомпания, вероятность состояния процесса, система массового обслуживания.

**ANALYSIS OF INDICATORS OF THE MAINTENANCE PROCESS IN THE AVIATION TECHNICAL
CENTER “KRASAIR” DURING THE PERIOD OF THE AIRLINE OPERATIONS**

O. G. Bouko*, E. A. Achkasova, S. S. Trishin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: bouko1962@yandex.ru

The paper considers statistical data on the process of technical operation of KrasAir Airlines domestic aircraft, in order to assess the effectiveness of the aviation technical center. The process parameters are estimated using the apparatus of the Markov theory processes.

Keywords: technical operation process, airline, process state probability, queuing system.

Авиакомпания «КрасЭйр» созданная в 1991 г, вошла в четверку лидеров российского рынка авиаперевозок. «КрасЭйр» – бывший член BSP ряда стран Европы и Азии, бывший член MITA и IATA Clearing House. На международных и внутренних линиях доля «КрасЭйр» составляла 6,2 % от объемов отрасли. География полетов авиакомпании «КрасЭйр» насчитывала 55 городов и 990 авиасвязей между этими городами. Авиационный парк компании составлял 33 воздушных лайнера, в том числе флагманы отечественного авиапрома – три новых самолета Ту-204 и два Ил-96-300. В составе авиакомпании действовал авиационно технический центр (АТЦ), оборудованный по последнему слову техники, выполнявший обслуживание отечественной и зарубежной техники.

И не смотря на активную деятельность на внутреннем рынке авиаперевозок, в конце 2008 года авиакомпания приостановила полёты, а в 2009 была официально признана банкротом. Причины этого до сих пор обсуждаются, и нет однозначного мнения кроме как последствий нечестных действий конкурентов.

Целью работы является исследование процесса технического обслуживания (ТО) отечественных воздушных судов по данным авиационно-технического центра «КрасЭйр», расформированного в 2008 году, и анализ возможных путей его сохранения как самостоятельного провайдера в интересах Края.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи: выполнен анализ эффективности процесса технической эксплуатации (ТЭ) ТО в АТЦ «КрасЭйр» на примере используемых самолётов ИЛ-86 и ТУ-154М [1; 2].

Оценка эффективности процесса ТЭ в работе выполнялась по алгоритму Марковских процессов по статистическим данным на 2008 г [2–5]]. Для этого, составлены графы состояний и переходов для различных периодов 2008 г., на момент уже имеющихся внешних проблем в авиакомпании. Далее определялись интенсивности переходов между состояниями, составлены дифференциальные уравнения Колмогорова и найдены значения конечных вероятностей процесса технической эксплуатации приведенные в табл. 1.

Полученные результаты показывают, что в рассматриваемый период ситуация в авиакомпании резко ухудшалась. На это указывают цифры снижения вероятности нахождения в состоянии эксплуатации. Вероятность простоя исправного ВС, не совершавшего полёта в течение суток для ИЛ-86 увеличилась до 0,5329 и для ТУ-154М увеличилась до 0,3518. На этот момент в авиакомпании возникли такие проблемы как финансовые долги топливо-заправочным компаниям, отделение аэропорта из структуры авиакомпании, значительные задержки рейсов, большое количество жалоб от пассажиров.

Таблица 1

**Конечные вероятности состояний процесса технической эксплуатации
для воздушных судов Ил-86 и Ту-154 по данным авиакомпании КрасЭйр**

№	Состояния процесса технической эксплуатации на II–III кв. 2008 г	Вероятности состояний для Ил-86	Вероятности состояний для Ту 154
1	К – Исправное ВС, совершившее в течении данных суток полет	0,0009	0,0009
2	М – Исправное ВС не совершившее полет в течении данных суток по метео причинам	0,0003	0,0003
3	А – Исправное ВС не совершившее полета в течении данных суток (резерв)	0,5329	0,3518
4	Е – Исправное ВС, находящееся во время рейса в базовом аэропорту на рулежной дорожке, буксировке, заруливании на стоянку или со стоянки, вождении вылета	0,1811	0,4211
5	ТО – ВС находившееся на техническом обслуживании	0,1202	0,2166
6	Р – ВС находившееся в ремонте на ремонтном предприятии	0,0224	0,0036
7	ОР – ВС ожидавшее ремонта	0,0643	0,0038
8	Д,Дв,З – ВС простаивавшее в АТБ из-за доработок, отсутствия запчастей и двигателей	0,0841	0,0019

Таблица 2

Параметры АТЦ как СМО

№ п/п	Характеристики АТЦ как СМО	Показатели СМО (M/M/4/0).
1	Вероятность простоя (СМО свободна) – P0	P0 = 0,3326
2	Вероятность отказа в обслуживании ВС – Ротк	Ротк = 0,0011
3	Относительная пропускная способность АТЦ– q	q = 0,97
4	Абсолютная пропускная способность АТЦ – А	А = 0,97
5	Среднее время ожидания в системе – tож	tож = 0
6	Общее время пребывания в системе – tсис, ч	tсис = 70

В результате 31 октября 2008 года авиакомпанией был выполнен последний рейс.

Однако, особый интерес представляет анализ деятельности АТЦ как отдельного предприятия, и перспективы его дальнейшего сохранения как самостоятельной организации.

Для анализа показателей эффективности процесса функционирования АТЦ использован алгоритм систем массового обслуживания (СМО). Процесс классифицирован как Марковский входящий поток (M), Марковское время обслуживания (M), многоканальная система (n = 4) с отсутствием очереди (m = 0). Отсутствие очереди обеспечивалось планово диспетчерской службой авиакомпании «КрасЭйр», обеспечивающей порядок выхода воздушных судов на ТО. Расчеты параметров системы ТО приведены в таблице

Вероятность простоя системы на период II-III кварталы 2008 г была уже высока в связи с тем, что авиакомпания уже испытывала проблемы, самолеты не летали и ресурс не расходовался. Однако остальные показатели находились на высоком уровне. Вероятность отказа заявке в обслуживании почти равна 0, относительная пропускная способность и абсолютная пропускная способность равны и близки к единице, среднее число заявок равно общему числу заявок, что доказывает, что ТО на воздушных судах выполнялось в установленные сроки без задержек.

Далее выполнялся анализ состояния дел в АТЦ. Была найдена архивная информация [4; 5], подтверждающая что:

1. Авиакомпанией «КрасЭйр» в АТЦ в Красноярске выполнялись различные формы ТО как на отечественных, так и на зарубежных воздушных судах, только на тяжёлые формы ВС отправлялись в Венгрию.

2. АТЦ был сертифицирован как по отечественному сертификату ТО ФАП 285, так и по бермудским сертификатам FAR 145 и PART 145. В АТЦ, что позволяло осуществлять основную деятельность в дальнейшем, и могло быть использовано в интересах Края.

3. В составе АТЦ был высококвалифицированный, специально обученный и сертифицированный персонал.

4. Имелись ангары для проведения различных форм ТО для широкой линейки самолетов.

5. Имелись специализированные цеха и отделы, диагностические и метрологическая лаборатории, фильтрмойка. А также имелось высококачественное шиномонтажное оборудование, вспомогательное слесарное оборудование и др.

Выполненные расчёты оценки качества функционирования АТЦ показала, что за те же кварталы 2008 года не смотря на политические, имущественные и внешние колебания вокруг структуры и руководства авиакомпании, техническое обслуживание продолжало эффективно и качественно выполнять свою работу,

что доказывает возможности существования АТЦ после банкротства авиакомпании "КрасЭйр" как самостоятельного провайдера. Однако, после банкротства АК АТЦ прекратил своё существование, а оборудование было распродано для погашения долгов.

Далее, в работе выполнена оценка возможных, но нереализовавшихся путей сохранения АТЦ в интересах Красноярского края. Авиационно технический центр мог быть сохранен при соответствующем финансировании со стороны Краевого бюджета. При этом, АТЦ мог функционировать и окупить вложенные деньги за период 3–5 лет.

Библиографические ссылки

1. Ицкович А. А., Чинючин Ю. М., Смирнов Н. Н. Управление качеством процессов технической эксплуатации авиационной техники : учеб. пособие. М. : МГТУ ГА, 2011. 90 с.
2. Техническая эксплуатация летательных аппаратов : учебник / Н. Н. Смирнов, Н. И. Владимиров и др. М. : Транспорт, 1990. 423 с.
3. Бойко О. Г. Управление системами и процессами технической эксплуатации летательных аппаратов : практикум / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017. 29 с.
4. Глазунов М. Без крыльев: эпитафия «КрасЭйр» [Электронный ресурс] // Dela.ru : сайт. 2006. Обновля-

ется в течение суток. URL: <https://dela.ru/articles/18419/> (дата обращения: 09.11.2019).

5. Нормативно-техническая документация авиакомпании «КрасЭйр» (РОНО, РТЭ, карты-наряды и т. д.).

References

1. Ickovich A. A., Chinyuchin Yu. M., Smirnov N. N. Upravlenie kachestvom processov tekhnicheskoy ekspluatacii aviacionnoj tekhniki : uchebnoe posobie. M. : MGTU GA, 2011. P. 90.
2. Tekhnicheskaya ekspluataciya letatel'nyh apparatov : ucheb. / N. N. Smirnov, N. I. Vladimirov et al. M. : Transport, 1990. P. 423.
3. Vojko O. G. Upravlenie sistemami i processami tekhnicheskoy ekspluatacii letatel'nyh apparatov: praktikum / Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2017. P. 29.
4. Glazunov M. Bez kryl'ev: epitafiya «KrasEjr» [Electronic resource] // Dela.ru : sajt. 2006. Obnovlyayetsya v techenie sutok. URL: <https://dela.ru/articles/18419/> (access: 07.05.2020).
5. Normativno-tekhnicheskaya dokumentaciya aviakompanii "KrasEjr" (RONO, RTE, karty-naryady i t.d.)

© Бойко О. Г., Ачкасова Е. А.,
Тришин С. С., 2020

УДК 544.14

**АТТЕСТАЦИИ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ЛАБОРАТОРИИ
АВИАЦИОННОЙ МЕТРОЛОГИИ ООО «АЭРОПОРТ ЕМЕЛЬЯНОВО»**

Е. К. Васильева*, Е. А. Жирнова

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

*E-mail: ekaterinavasileva1998@mail.ru

Анализируются особенности метрологического обеспечения на воздушном транспорте, требования к технической компетентности на примере аттестации испытательного оборудования в лаборатории авиационной метрологии ООО «Аэропорт Емельяново».

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, техническая компетентность, аттестация, испытательное оборудование.

**CERTIFICATION OF TEST EQUIPMENT IN THE LABORATORY
OF AIRPORT METROLOGY LLC "AIRPORT EMELYANOVO"**

E. K. Vasileva*, E. A. Zhirnova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: ekaterinavasileva1998@mail.ru

The features of metrological support in air transport, requirements for technical competence are analyzed on the example of certification of test equipment in the laboratory of aviation metrology of LLC "Airport Emelyanovo".

Keywords: metrological support, technical competence, certification, testing equipment.

Метрологическое обеспечение на воздушном транспорте должно осуществляться в целях обеспечения единства и требуемой точности измерений при производстве авиационной деятельности, поддержании летной годности воздушных судов и обеспечении приемлемого уровня безопасности полетов.

Метрологическое обеспечение на воздушном транспорте предусмотрено на этапах: разработки, изготовления, испытаний и эксплуатации авиационной техники и средств обеспечения деятельности авиационной инфраструктуры. Под авиационной техникой понимаются летательные аппараты, их бортовое оборудование и агрегаты, двигатели, авиационное вооружение, авиационные средства спасания, тренажеры, наземные средства управления воздушным движением, навигации, посадки и связи, а также средства наземного обслуживания летательных аппаратов [1].

Объектами метрологического обеспечения являются: технологические процессы, применяемые при производстве авиационной деятельности, техническое обслуживание и ремонта авиационной техники, и для обеспечения деятельности авиационной инфраструктуры; информационно-измерительные системы, средства измерений, стандартные образцы, испытательное оборудование, а также программное обеспечение средств измерений и информационно-измерительных систем [2]. Средство измерений, контроля и диагностирования, разработанное для конкретного изделия авиационной техники и применяемое при его испытаниях, техническом обслуживании

и (или) ремонте, а также для обеспечения авиационной деятельности, но не подлежащее применению в сфере распространения государственного регулирования обеспечения единства измерений называется специальное средство измерений.

Аккредитация лаборатории авиационной метрологии ООО «Аэропорт Емельяново» осуществляется в национальной системе аккредитации «Росаккредитация», что дает возможность признания результатов измерений на территории России и стран Таможенного союза

При аккредитации лабораторий используются специально разработанные критерии и процедуры для определения технической компетентности. Проводится всесторонняя экспертная оценка всех факторов, влияющих на выработку калибровочных или испытательных данных, на основе межгосударственного стандарта ГОСТ ISO/IEC 17025–2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий», используемого для оценки лабораторий во всём мире. Этот стандарт используется для оценки факторов: человеческий фактор; помещения и условия окружающей среды; методики испытаний и калибровки и оценка пригодности методик; оборудование; прослеживаемость измерений; отбор образцов; обращение с объектами испытаний и калибровки [3].

Лаборатория должна разработать и поддерживать процедуры управления всеми документами, являющимися частью системы менеджмента (разработан-

ными лабораторией или поступившими извне), такими как регламенты, стандарты, другие нормативные документы, методики испытаний и калибровки, а также чертежи, программное обеспечение, технические условия, инструкции и руководства.

Техническая компетентность испытательной лаборатории определяется наличием в ней квалифицированного персонала, необходимых средств измерений, испытаний и контроля; помещений с соответствующими условиями окружающей среды; документированных рабочих процессов; нормативно-методических документов испытаний и др.

Особое внимание уделяется вопросам обеспечения качества испытательного оборудования. С целью определения и подтверждения нормированных метрологических характеристик оборудования, их соответствия требованиям нормативно-технической документации и установления пригодности оборудования к эксплуатации проводится аттестация испытательного оборудования. В лаборатории авиационной метрологии аттестация испытательное оборудование подлежит в трех случаях: если импортное испытательное оборудование; если применяется в условиях, отличных от нормированных в эксплуатационной документации; если метрологические характеристики измерительных каналов определяются несколькими составляющими; а также, когда при определении метрологических характеристик которого применяются косвенные методы измерений.

К нормированным метрологическим характеристикам относятся технические характеристики, определяющие возможности испытательного оборудования воспроизводить и поддерживать условия испытаний в заданных диапазонах, с требуемой точностью и стабильностью, в течение установленного срока. Основные положения по аттестации испытательного оборудования регламентируются ГОСТ Р 8.568–2017 «ГСИ. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения» [4].

Если испытательное оборудование, оснащено бортовыми средствами контроля параметров, проходящими техническое обслуживание согласно регламенту технического обслуживания, укомплектовано только средствами измерений утвержденного типа или специальными средствами измерений, допущенными к применению на воздушном транспорте, то аттестация не проводится.

Предусмотрена первичная аттестация испытательного оборудования (при вводе в эксплуатацию), периодическая (в процессе эксплуатации через установленные в эксплуатационной документации интервалы времени). В случае ремонта или модернизации должна быть проведена повторная аттестация. Аттестация испытательного оборудования включает разработку методики и программы аттестации, позволяющей достоверно оценить пригодность оборудования.

Основным требованием при разработке методики и программы аттестации испытательного оборудования является определение требований к метрологическим характеристикам измеряемых параметров [5].

Аттестацию осуществляет метрологическая служба авиационной организации при наличии технической компетентности и участия специалистов подразделений, эксплуатирующих испытательное оборудование.

Обеспечение единства и требуемой точности измерений при производстве авиационной деятельности, техническом обслуживании и ремонте авиационной техники является сложной комплексной задачей, для решения которой необходимо поддерживать техническую компетентность лаборатории авиационной метрологии.

Библиографические ссылки

1. О государственном регулировании развития авиации (с изменениями на 3 августа 2018 года) : федер. закон от 8.01.1998 № 10. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
2. ГОСТ Р 55867–2013. Воздушный транспорт. Метрологическое обеспечение на воздушном транспорте. Основные положения М. : Стандартиформ, 2019. 15 с.
3. ГОСТ ISO/IEC 17025–2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. М. : Стандартиформ, 2020. 32 с
4. ГОСТ Р ИСО 9001–2015. Национальный стандарт Российской Федерации. Системы менеджмента качества. Требования (утв. Приказом Росстандарта от 28.09.2015 № 1391-ст). М. : Стандартиформ, 2020. 32 с.
5. Шабалина Д. А., Жирнова Е. А. Контроль метрологических характеристик при аттестации пробойной установки / Решетневские чтения [Электронный ресурс] : материалы XXIII науч.-практич. конф. ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2019. Ч. 2. С. 400–401.

References

1. Federal Law of January 8, 1998 No. 10 "On State Regulation of Aviation Development (as amended on August 3, 2018)". Dostup iz sprav.-pravovoy sistemy «Konsul'tantPlyus».
2. GOST R 55867–2013. Air transport. Metrological support in air transport. Basic provisions. M. : Standartinform, 2019. 15 p.
3. GOST ISO / IEC 17025–2019. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. M. : Standartinform, 2020. 32 p.
4. GOST R ISO 9001–2015. National standard of the Russian Federation. Quality management systems. Requirements (approved by the Order of Rosstandart dated 28.09.2015 № 1391-st). M. : Standartinform, 2020. 32 p.
5. Shabalina D. A., Zhirnova E. A. Control of metrological characteristics during certification of a breakdown installation // Reshetnevskiy chteniya [Electronic resource] : materials of XXIII Mezhdunar. nauch.-prakt. conf. ; Reshetnev University. Krasnoyarsk, 2019. N. 2. P. 400–401.

© Васильева Е. К., Жирнова Е. А., 2020

УДК 53.089.6

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОВЕРКИ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

А. В. Дракова, Ю. Г. Малахова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: blondme2017@gmail.com

При проведении работ по поверке автоматизация является важнейшим ресурсом для повышения качества обслуживания и производительности. Рассмотрим возможные уровни внедрения автоматизации на рабочем месте поверителей.

Ключевые слова: автоматизация процесса поверки, повышение производительности труда, повышение эффективности труда, увеличение достоверности данных об измерениях, автоматизация деятельности работников метрологических служб

AUTOMATION OF VERIFICATION OF ELECTRICAL MEASURING DEVICES

A. V. Dracova, Yu. G. Malakhova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: blondme2017@gmail.com

When performing verification work, automation is an essential resource for improving service quality and productivity. Let's consider possible levels of automation implementation in the workplace of verifiers.

Keywords: automation of the verification process, increase in labor productivity, increase in labor efficiency, increase in the reliability of measurement data, automation of the activities of employees of metrological services

Бортовая система электроснабжения летательных аппаратов представляет собой систему электроснабжения, предназначенную для обеспечения бортового электрооборудования летательного аппарата электроэнергией требуемого качества. В нее входит совокупность устройств и приборов для производства и распределения электроэнергии. Важную роль в этой системе занимают электроизмерительные приборы, которые должны соответствовать заданной точности и обеспечивать единство измерений [1].

В процессе эксплуатации электроизмерительные приборы подвергаются периодической поверке, которая проводится в измерительных лабораториях для удостоверения соответствия прибора точностным характеристикам. Поверка осуществляется обычно путем сличения показаний поверяемого прибора с показаниями образцового средства измерения. Как показывает практика, расчетная часть занимает, как правило, 60 % времени, затраченного на всю поверку, так как связана с малопродуктивной работой по непосредственным расчетам допустимых пределов и проверок полученных результатов для исключения возможных ошибок [2].

При проведении работ по поверке в авиационной отрасли решающим ресурсом усовершенствования качества сервиса и производительности становится автоматизация. В силу того, что основной деятельностью метрологического отдела являются процессы испытаний, поверки и калибровки, задача автоматизации этих процессов должна стоять на первом плане.

В области автоматизации поверочных работ существуют три основных направления:

- разработка и внедрение специализированных поверочных установок, ориентированных на маленький ассортимент средств измерений;
- создание специализированных комплексных (приборно-модульных) систем, которые направлены на автоматизированную поверку средств измерений более или менее широкого ассортимента, т. е. создание автоматизированных рабочих мест поверителей;
- создание универсальных измерительно-поверочных комплексов, которые ориентированы на автоматизированную поверку средств измерений широкого ассортимента [3].

Приоритетным направлением автоматизации поверочных работ будет являться разработка универсальных измерительно-поверочных комплексов, которые будут ориентированы на автоматизированную поверку средств измерений широкой номенклатуры. Эти измерительно-поверочные комплексы способны повысить производительность и эффективность труда, увеличить достоверность данных об измерениях, оптимизировать деятельность метрологических служб в сфере измерений.

Автоматизация поверочных комплексов различается по трем уровням. Эти различия зависят от поверяемых средств измерений, от схемно-конструктивных возможностей рабочих эталонов, средств вычислительной техники и вспомогательных устройств, и, конечно же, экономической целесообразности [2].

На первом уровне организуется база данных нормативно-технической документации по проверке средств измерений с помощью персонального компьютера (рис. 1). Здесь осуществляется обработка результатов измерений и оформление результатов проверки. Это дает возможность автоматизировать некоторые рутинные, «механические» операции деятельности поверителя при проверке средств измерений, не оснащенных приборными интерфейсами, снизить утомляемость поверителя и уменьшить вероятность субъективных ошибок.



Рис. 1. Структура АРМ поверителя первого уровня

На втором уровне автоматизации требуется наличие в средствах измерения метрологического комплекса приборных интерфейсов и управляемого коммутатора (рис. 2). Это дополнительно позволяет автоматизировать операции коммутации средств измерений и управления режимами работы средств измерений в процессе проверки. Степень автоматизации повышается. Снижается утомляемость поверителя. Уменьшается вероятность субъективных ошибок, но проверяются только средства измерений, имеющие приборный интерфейс.

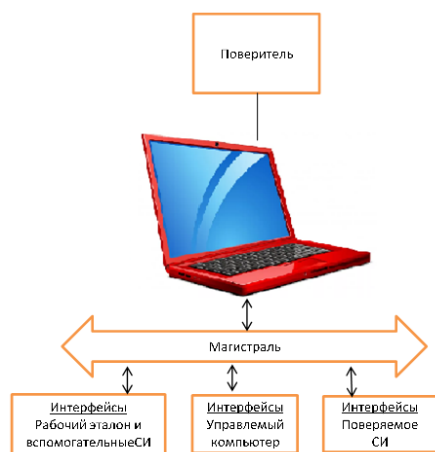


Рис. 2. Структура АРМ поверителя второго уровня

На третьем уровне автоматизация поверочных работ направлена на перспективный парк компьютерных средств измерений: интеллектуальных, виртуальных средств измерений (рис. 3). При этом операции проверки осуществляются не с сигналами, а с кодами сигналов.



Рис. 3. Структура АРМ поверителя третьего уровня

Внедрение автоматизированных поверочных комплексов положительным образом повлияет на повышение производительности и эффективности труда поверителей, позволит повысить достоверность данных об измерениях и провести оптимизацию деятельности метрологических служб, а также оптимизировать область планирования измерений.

Библиографические ссылки

1. Бортовая система электроснабжения летательных аппаратов [Электронный ресурс]. URL: <https://kartaslov.ru/карта-знаний/> (дата обращения: 30.05.2020).
2. Колосова О. С. Автоматизация производства. М. : Юрайт, 2018. 291 с.
3. Об обеспечении единства измерений : федер. закон от 26.06.2008 г. № 102 – 102 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online/> (дата обращения: 30.05.2020).

References

1. Bortovaya sistema elektrosnabzheniya letatel'nykh apparatov [Elektronnyy resurs]. URL: <https://kartaslov.ru/karta-znaniy/> (access: 30.05.2020).
2. Kolosova O. S. Avtomatizatsiya proizvodstva. M. : Yurayt, 2018. 291 p.
3. Ob obespechenii edinstva izmereniy : feder. zakon ot 26.06.2008 g. № 102 – 102 [Elektronnyy re-surs]. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online/> (access: 30.05.2020).

© Дракова А. В., Малахова Ю. Г., 2020

УДК 656.7.025

АВИАПЕРЕЛЕТЫ ПОСЛЕ COVID-19 НА ДОЛГИЕ ГОДЫ ВПЕРЕД

К. Дутта, О. Г. Бойко

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

Из-за пандемии COVID-19 было отменено большое количество рейсов. Жизненно важное значение имеет то, что означает быть хорошо подготовленным к профилактике инфекции и борьбе с ней. Это исследование предложило ряд контрмер против пандемии COVID-19 в авиации.

Ключевые слова: авиация, Covid-19, авианперевозки, путешествия, карантин.

POST COVID-19 AIR TRAVEL FOR YEARS TO COME

K. Dutta, O. G. Bouko

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

Due to COVID-19 pandemic, a large number of flights were cancelled. Thus, how to be well prepared for the infection prevention and control is of vital importance. This study proposed a series of countermeasures to the COVID-19 pandemic in aviation.

Keywords: aviation, Covid-19, air transportation, travel, quarantine.

Введение. В связи с распространением COVID-19 по всему миру, большинство стран приняли беспрецедентные меры для профилактики и борьбы с ним [1]. Несмотря на то, что многие рейсы были отменены, некоторые маршруты сохранялись для переброски медицинского персонала и необходимых поставок в ответ на пандемию.

Учитывая, что те, кто прибывает из сильно пострадавших районов, могут быть пациентами COVID-19 или бессимптомными носителями коронавируса, то перелет имеет некоторые риски. Поэтому меры по профилактике инфекций и борьбе с ними в авиации особенно важны. В настоящее время существует мало литературы по профилактике инфекции и борьбе с COVID-19 в авиации. В этом исследовании предлагаются меры профилактики и борьбы с COVID-19 в авиации

Эпидемиологическая характеристика. COVID-19 может передаваться от людей с симптомами к другим людям, которые находятся в тесном контакте через дыхательные капли, при непосредственном контакте с инфицированными людьми или при контакте с загрязненными предметами и поверхностями. Согласно протоколу диагностики и лечения новой коронавирусной пневмонии, опубликованному Национальной комиссией здравоохранения и Государственным управлением традиционной китайской медицины 3 марта 2020 года [2], существует возможность передачи аэрозоля в относительно закрытой среде при длительном воздействии высоких концентраций аэрозоля [3].

Меры по профилактике инфекции COVID-19 и борьбе с ним.

1. Экологический контроль

1.1. Территориальное деление. Чтобы избежать перекрестного заражения, зона салона может быть разделена на чистую зону, буферную зону, зону отдыха пассажиров и карантинную зону. Рекомендуется, чтобы капитанская каюта была обозначена как чистая зона, а задняя половина кают первого и бизнес-класса, как буферная зона, доступная для использования членами экипажа для ношения и снятия защитной одежды. Пассажирская зона отдыха предназначена для здоровых пассажиров, где пассажиры должны сидеть, по крайней мере, через одно пустое место. Последние три ряда сидений должны быть отведены в качестве аварийной карантинной зоны для тех, кто болен или находится под подозрением [4; 5].

1.2. Управление воздушным движением в кабине воздушного судна. Во время полета вентиляция должна работать на полную мощность. Во время наземного обслуживания для вентиляции следует использовать вспомогательную силовую установку самолета. После прибытия двери кабины и грузового отсека должны быть открыты для вентиляции перед проведением ремонтных работ, а время естественной вентиляции должно быть увеличено [4; 5].

2. Раннее выявление инфицированных лиц

2.1. Скрининг температуры тела. Перед посадкой на борт, пассажиры должны обследоваться бесконтактным инфракрасным термометром для измерения температуры тела. Пассажиры с показателем температуры $\geq 37,3$ °C должны быть дополнительно проверены ртутным термометром. В случае подтверждения, посадка на борт должна быть запрещена. Измерение

температуры тела, так же следует производить через 2 часа после взлета и за 2 часа до посадки. Пассажиры с аномальной температурой тела во время путешествия должны быть изолированы в карантинной зоне.

2.2. Скрининг симптомов. Для самооценки клинических проявлений COVID-19, необходимо установка приложения, которое отображает возможные проявления инфекции, включая лихорадку, боль в околоносовых пазухах, кашель, потерю запаха и вкуса, мокроту, заложенность носа, озноб, усталость, боль в горле, головную боль, одышку, боль в суставах или мышцах, диарею, рвоту. Пассажиры сканируют QR-код, чтобы заполнить форму самооценки, и приложение идентифицирует пациентов с подозрением на COVID-19, оценивая их симптомы. Это будет способствовать раннему выявлению, своевременному сообщению и реагированию. Если во время поездки были обнаружены какие-либо из вышеперечисленных аномальных симптомов, аэропорт назначения должен быть своевременно уведомлен об этом, чтобы подготовиться к передаче подозрительных случаев.

3. Стандартные меры предосторожности и дополнительные меры инфекционного контроля

3.1. Гигиена рук. На борту судна следует иметь достаточное количество дезинфицирующего средства для рук, бумажных полотенец, дезинфицирующих салфеток для протирания рук на спиртовой основе, содержащего не менее 70 % спирта. При заметном загрязнении руки следует очищать дезинфицирующим средством под проточной водой с последующей дезинфекцией. Следует избегать прикосновений к носу, рту и глазам, если вы не уверены, чисты ли руки или нет. Бортпроводники должны выполнять гигиену рук до и после контакта со всеми или после прикосновения к загрязненным веществам.

3.2. Использование средств индивидуальной защиты. На борту судна должно быть подготовлено достаточное защитное снаряжение. Весь персонал на борту должен правильно носить маски. Рекомендуется носить хирургическую маску или маску для лица с лучшим фильтрующим эффектом. Каждого пассажира следует снабдить двумя масками № 95. Разрешается снимать маску только во время еды или питья. Гигиену рук следует проводить до надевания маски и после снятия маски. Члены экипажа и медицинский персонал могут носить медицинские одноразовые колпачки, перчатки, защитные очки, защитный костюм или халат в зависимости от риска воздействия.

3.3. Гигиена органов дыхания. При кашле или чихании в локоть, рот следует прикрывать салфеткой. Салфетку или загрязненную маску следует поместить в герметичный специальный полиэтиленовый пакет, а затем немедленно провести гигиену рук. Нет необходимости заменять маску каждый раз, когда при кашле или чихании. Маску следует заменить на новую, по истечении 2 ч, или если она загрязнена.

3.4. дезинфекция окружающей среды. Окружающая среда должна содержаться в чистоте и порядке. Поверхности, с которыми можно часто контактировать (например, дверная ручка туалета, защелка, смесители, сиденья унитаза, планшет и т. д.) следует дезинфицировать дезинфицирующими салфетками.

В случае обнаружения подозрительных перевозчиков следует провести послеполетную дезинфекцию салона и терминала вылета.[2]

3.5. Вывоз отходов и мусора. Утилизацию отходов следует выполнять своевременно. Снятое защитное снаряжение должно быть помещено в желтые мешки для медицинских отходов и централизованно утилизировано как медицинские отходы.

4. Управление сном

Следует как можно больше отдыхать и высыпаться.

5. Управление эмоциями

Во время долгого путешествия, может успокоить и снять стресс умиротворяющая и расслабляющая музыка. При необходимости следует предоставить психологическую консультацию.

6. Обучение персонала

Пропаганда знаний по охране здоровья должна осуществляться в виде видео или трансляции на терминале электронного экрана или жидкокристаллического экрана в салоне самолета и за сиденьями для повышения осведомленности о самозащите от COVID-19. Кроме того, члены экипажа должны быть заблаговременно проинформированы о профилактике инфекционных заболеваний и борьбе с ними, а также усилена предполетная подготовка по надеванию и снятию средств индивидуальной защиты.

Таким образом, предложенные меры, основывающиеся на этиологии, эпидемиологии и клинических характеристиках COVID-19, вряд ли могут дать 100 % гарантию защиты от угрозы, но смогут значительно повысить эффективность защиты в авиатранспортных перевозках во время пандемии.

References

1. World Health Organization. (2020). Infection prevention and control during health care when COVID-19 is suspected: interim guidance, 19 March 2020. World Health Organization [Electronic resource]. URL: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/331495> (access: 15.05.2020).
2. China Center for Disease Control and Prevention. Public Guidelines for novel coronavirus infection: a temporary guide to dietary nutrition (EB / OL) [Electronic resource]. URL: https://www.cdc.gov/niosh/emres/2019_ncov_default.html (access: 15.05.2020).
3. Diagnosis and Treatment Protocol for Novel Coronavirus Pneumonia [Electronic resource]. URL: <http://www.chinadaily.com.cn/pdf/2020/1.Clinical.Protocols.for.the.Diagnosis.and.Treatment.of.COVID-19.V7.pdf> (access: 20.05.2020).
4. Key considerations for repatriation and quarantine of travellers in relation to the outbreak of novel coronavirus 2019-nCoV [Electronic resource]. URL: <https://www.who.int/news-room/articles-detail/key-considerations-for-repatriation-and-quarantine-of-travellers-in-relation-to-the-outbreak-of-novel-coronavirus-2019-ncov> (access: 21.05.2020).
5. Immunization, Vaccines and Biologicals [Electronic resource]. URL: <https://www.who.int/immunization/diseases/measles/en/> (access: 22.05.2020)

© Дутта К., Бойко О. Г., 2020

УДК 629.7.036

ПРИЗНАКИ ДВИЖИТЕЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ, ОТОБРАЖЕННЫХ В АРТЕФАКТАХ СИБИРИ

Д. А. Елизарьев, Д. В. Борковец, М. Г. Елизарьева, Г. Д. Коваленко

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

Рассматривается гипотеза существования в древности движительных устройств для перемещения авиационных транспортных средств на основании обнаруженных следов.

Ключевые слова: движитель, каверны.

SIGNS OF AIRCRAFT ENGINES, DISPLAYED IN THE ARTIFACTS OF SIBERIA

D. A. Elizariev, D. V. Borkovec, M. G. Elizareva, G. D. Kovalenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

The article considers the hypothesis of the existence in ancient times of propulsion devices for moving aircraft vehicles based on the traces found.

Keywords: engine, caverns.

Предлагаемое сообщение посвящено изучению следов палеокосмической трассы, проходящей через территорию Сибири. Указанные следы отождествляются техногенными признаками, в которых проявлены схемы авиационных транспортных средств, а также устройств для их перемещения, иначе движителей

К настоящему времени описание упомянутых следов дано в ряде публикаций, где идентифицированы изображения в петроглифах [1], навигационные системы привода с земной орбиты [2] и мегалитические сооружения на площадках приземления и стоянок космических кораблей [3].

В связи с этим, целью статьи явилось сведение разрозненных по эпохам и территориям артефактов в концепцию существования в древности движительных устройств для перемещения авиационных транспортных средств.

В течение многих лет нами проводились фото и видеосъемки аномальных объектов в околосреднем пространстве. Один из эпизодов подобных наблюдений можно видеть на рис. 1, где объект выполняет колокол. Силовой ореол вокруг объекта меняет свою конфигурацию в соответствии со сменой направления движения, что указывает на присутствие на нем движительного устройства.

Возможный вариант движителя следует из схемы на рис. 2, изображенный на Шалаболинской писанице [1]. Предполагается, что силовой агрегат выполнялся на основе ядерного реактора, возбуждающего поток нейтронов, направленного на управляющую решетку.

В этом случае сформированный поток создает необходимый импульс для движения.

Управление реактором осуществлялось регулированием топливных элементов и замедляющих стерж-

ней. Возможно, что это был корабль – бомба, выводимый на заданную высоту.

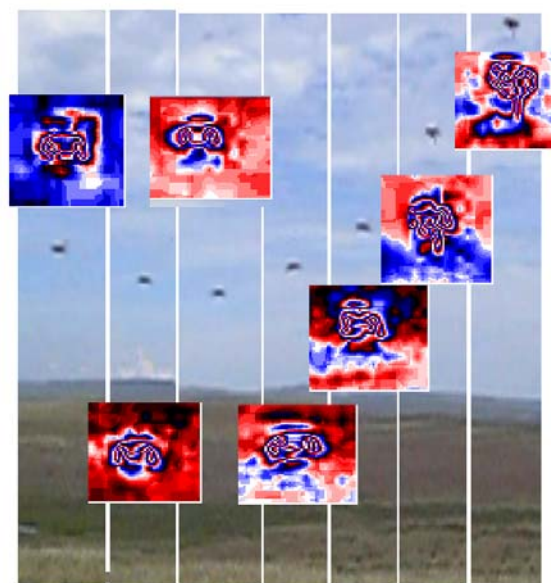


Рис. 1. Эволюция «колокол», выполненная аномальным объектом в растровой обработке силового ореола

Другой вариант движителя представлен на стеле Сырского чаатаса (республика Хакасия, Аскизский район) (рис. 3).

Здесь предполагается применение терморактивной жидкости, сохраняемой в термостатированном баке 1. Из него через горловину с радиатором 2 жидкость попадает в камеру с турбиной 3, а далее в сопло, которое создает реактивный импульс.

В данном случае отображен взрыв, отчего пострадал человек, голова которого отлетела от туловища. По всей видимости, жидкость съедобная, что привлекло животных. Предполагается, что это схема древнего ЖРД.

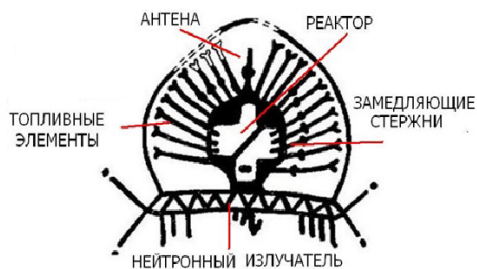


Рис. 2. Корабль – бомба

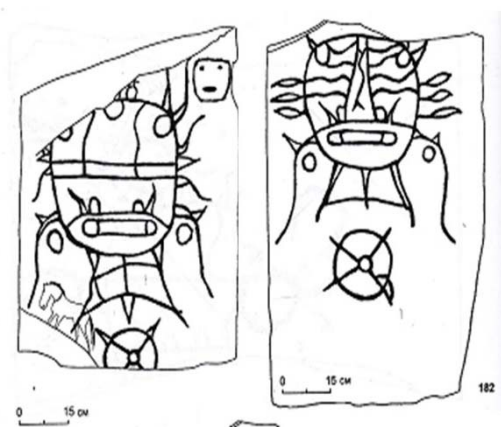


Рис. 3. Петроглифы на стеле Сырского чаатаса

Авиационные транспортные устройства с ЖРД отображены на рис. 4 [4]. В традиционном Окуневском стиле (в форме личины), изображены содрогающиеся и рычащие чудовища.

Однако треногая опора, колесо (турбина), огненная пелена, изрыгающая шары (по-видимому,

также огненные) свидетельствуют о техногенном устройстве.

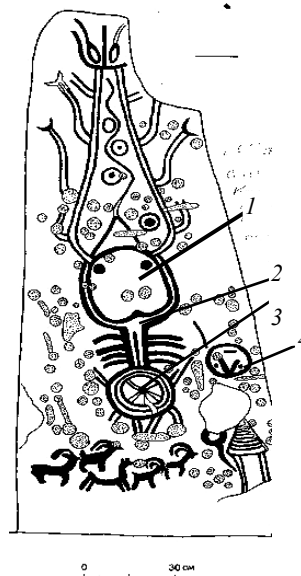


Рис. 4. Петроглифы со стел Лебяжье 1. (Красноярский кр. Краснотуранский р-н.)

Предположительно, что упомянутые устройства оставляли следы на последующие тысячелетия. На рис. 5 показаны каверны на камнях, зафиксированные нами на древней вулканической лаве Когуневского поля (республика Хакасия, Джиримский р-н). Обнаруженные образования, предположительно, возникли в результате расплескивания агрессивной жидкости, вызывающей экзотермическое взаимодействие с материалом вулканических бомб. Но это предположение необходимо проверять в дальнейших исследованиях. Тем не менее, техногенная причина их образования очевидна. Возникали эти процессы в различные времена, возможно, в течение сотен тысяч лет, что стало известно по расположению навигационных ориентиров [2].



Рис. 5. Каверны на Когуневском поле (РХ Джиримский р-н 2020)

Таким образом, по древним следам создается техногенная картина, в которой проявлены признаки движителей.

Библиографические ссылки

1. Коваленко Г. Д. История космической техники // Вопросы образования и науки : по материалам Международ. заочной науч.-практич. конф. / под общ. ред. С. С. Чернова. 2012. С. 84–92.
2. Коваленко Г. Д. Гипотеза о навигационной системе палеокосмической трассы по артефактам Хакасии / Новый взгляд : Междунар. науч. вестник / под общей ред. С. С. Чернова. 2017. С. 6–16.
3. Коваленко Г. Д., Елизарьева М. Г., Емельянов В. А. Функциональные признаки древнего космодрома на территории Хакасии // Инновационные научные исследования. МИНС «Наука и просвещение». Пенза, 2019. С. 177–188.
4. Леонтьев Н. В., Капелько В. Ф., Ксин Ю. Н. Изваяния и стелы Окуневской культуры. Абакан, 2006. С. 182.

References

1. Kovalenko G. D. Istoriya kosmicheskoj tekhniki // Voprosy obrazovaniya i nauki : po materialam Mezhdunar. zaочноj nauch.-praktich. konf. / pod obshchej red. S. S. Chernova. 2012. P. 84–92.
2. Kovalenko G. D. Gipoteza o navigacionnoj sisteme paleokosmicheskoj trassy po artefaktam Hakasii // Novyj vzglyad : Mezhdunar. nauch. vestnik / pod obshchej red. S. S. Chernova. 2017. P. 6–16.
3. Kovalenko G. D., Elizara'eva M. G., Emel'yanov V. A. Funkcional'nye priznaki drevnego kosmodroma na territorii Hakasii // Innovacionnye nauchnye issledovaniya. MINS «Nauka i prosveshchenie». Penza, 2019. P. 177–188.
4. Leont'ev N. V., Kapel'ko V. F., Ksin Yu. N. Izvayaniya i stely Okunevskoj kul'tury. Abakan, 2006. P. 182.

© Елизарьев Д. А., Борковец Д. В.,
Елизарьева М. Г., Коваленко Г. Д., 2020

МОДЕРНИЗАЦИЯ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

А. Н. Емельянов*, О. П. Батку

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

*E-mail: shuma1977@mail.ru

Увеличение ресурса топливной системы путем замены коллекторных электродвигателей на бесколлекторные, приведет к сокращению регламентных работ по обслуживанию воздушных судов, повышению безопасности полетов, эффективности эксплуатации авиационной техники

Ключевые слова: авиация, топливный насос, электродвигатель, ресурс, вентильный двигатель.

MODERNIZATION OF THE AIRCRAFT FUEL SYSTEM

A. N. Emelyanov*, O. P. Batku

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
 31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: shuma1977@mail.ru

Increasing the resource of the fuel system by replacing collector electric motors with brushless ones will lead to a reduction in routine maintenance of aircraft, increase flight safety, and increase the efficiency of aviation equipment operation.

Keywords: aviation, fuel pump, electric motor, resource, valve engine.

В настоящее время на всех этапах проектирования и производства топливных насосов воздушных судов (ВС), до сих пор применяются электродвигатели, имеющие коллекторно-щеточный узел (КЩУ). Узел предназначен для питания обмотки ротора электрическим током через электропроводные щеточные контакты и коллекторные пластины (рис. 1, а).

В двигателе этой конструкции, из-за наличия угловой ширины щеток и углового зазора между пла-

стинами коллектора, имеются части обмоток якоря, которые динамически постоянно короткозамкнуты щетками. В связи с данной особенностью конструкции коллекторного двигателя потребляемая мощность значительно увеличивается с увеличением напряжения питания и увеличением механической радиальной нагрузки на вал двигателя. На ряду с этим увеличивается износ коллекторных пластин и токопроводящих щеток.

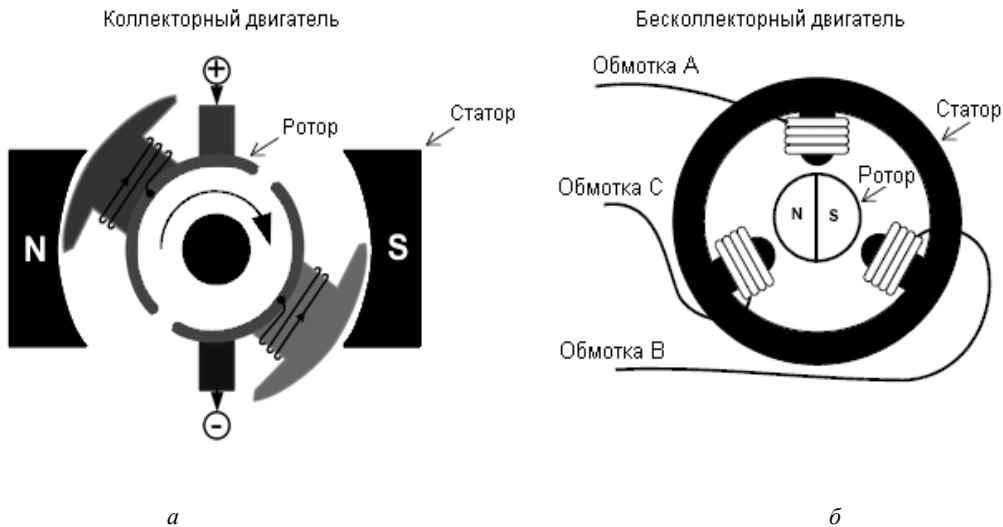


Рис. 1. Виды подач напряжения на обмотки двигателей:
 а – коллекторный двигатель; б – бесколлекторный двигатель

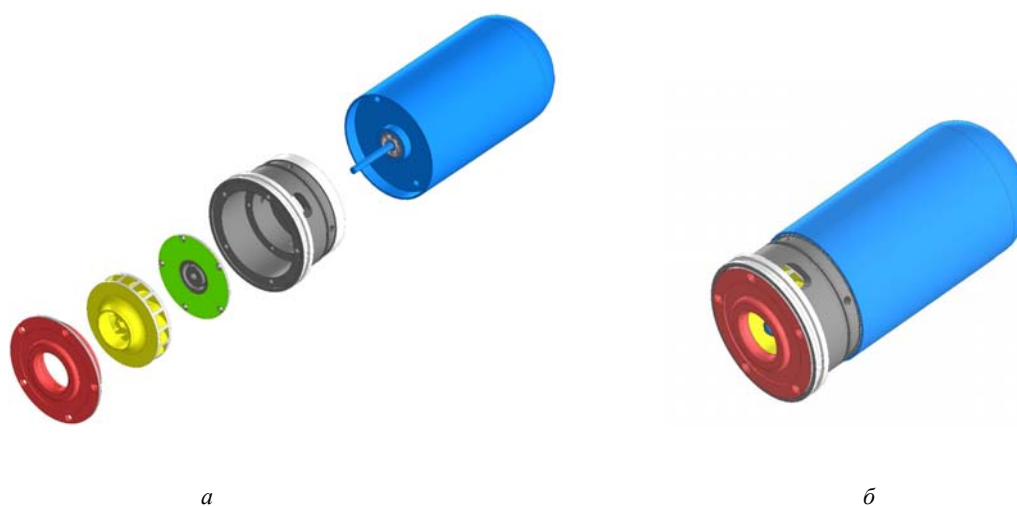


Рис. 2. Конструкция топливного насоса с коллекторным двигателем:
а – основные конструктивные части насоса; *б* – насос в сборе

В Российской Федерации и странах СНГ производство коллекторных двигателей, даже по устаревшим технологиям, для авиационной индустрии обусловлено финансово-экономической заинтересованностью промышленных предприятий в получении постоянной и гарантированной прибыли. Несмотря на то, что с течением времени конструкции авиационных агрегатов, блоков, узлов и механизмов совершенствуются в сторону применения более рациональных технологий, композитных материалов и электроники, комплектация данного оборудования происходит по-прежнему с применением коллекторных двигателей рис. 2.

На протяжении долгого времени в процессе эксплуатации ВС выявлены не только конструктивные недостатки топливных насосов с коллекторными двигателями, но и недостатки, выявленные в процессе эксплуатации и обслуживания ВС, влияющие на безопасность полетов.

В конце XIX века в различных бытовых и промышленных устройствах начали применяться электродвигатели, не имеющие коллекторно-щеточного узла – бесколлекторные электродвигатели (БД). В отличие от щёточного электродвигателя постоянного тока, коммутация в БД осуществляется и контролируется с помощью электронной схемы – контроллера.

Принцип работы БД основан на том, что контроллер БД коммутирует обмотки статора переменным импульсным напряжением так, чтобы вектор магнитного поля статора всегда был под углом 120 градусов к вектору магнитного поля ротора рис. 1, б). Механическая и регулировочная характеристики БД линейны и в значительном диапазоне регулирования не зависят от уровня напряжения электропитания. У БД практически отсутствуют пиковые пусковые токовые нагрузки за счет того, что встроенный регулятор обеспечивает достаточно плавное нарастание амплитуды переменного тока от нуля до номинального значения.

Высокая степень энергосбережения насосов при использовании БД достигается за счет регулирования числа оборотов. Известны следующие соотношения между числом оборотов (n_1 , n_2), расходом жидкости (L_1 , L_2), потерей напора (Δp_1 , Δp_2) и потребляемой мощностью (N_1 , N_2):

$$L_1/L_2 = n_1/n_2;$$

$$\Delta p_1/\Delta p_2 = (L_1/L_2)^2 = (n_1/n_2)^2;$$

$$N_1/N_2 = (\Delta p_1 L_1)/(\Delta p_2 L_2) = (n_1/n_2)^3$$

В силу кубической зависимости потребляемой мощности от числа оборотов, их плавное и глубокое регулирование, обеспечиваемое БД без преобразования частоты питающего напряжения, дает соответствующий значительный эффект в части снижения суммарных значений потребляемой мощности, путем сравнения БД с другими двигателями.

С эксплуатационной точки зрения преимущества БД обусловлены тем, что вращающиеся части исполнены как один динамически и статически сбалансированный компонент, общий вес которого равномерно распределен на оба опорных подшипника, что значительно влияет на срок службы изделия. Сопутствующим этому обстоятельством является также минимальная вибрация и шум при работе БД.

В настоящее время при росте развития технологий изготовления электрических агрегатов появились модификации БД с широким спектром их применения, и с различными конструктивными и электрическими характеристиками.

Так как при изготовлении электрических топливных насосов для авиационной промышленности с применением БД используются детали отечественных насосов, следовательно затраты для производства современных насосов увеличатся не значительно. Рентабельность при эксплуатации насосов с БД значительно возрастет в виду увеличения срока службы и назначенного ресурса рис. 3.

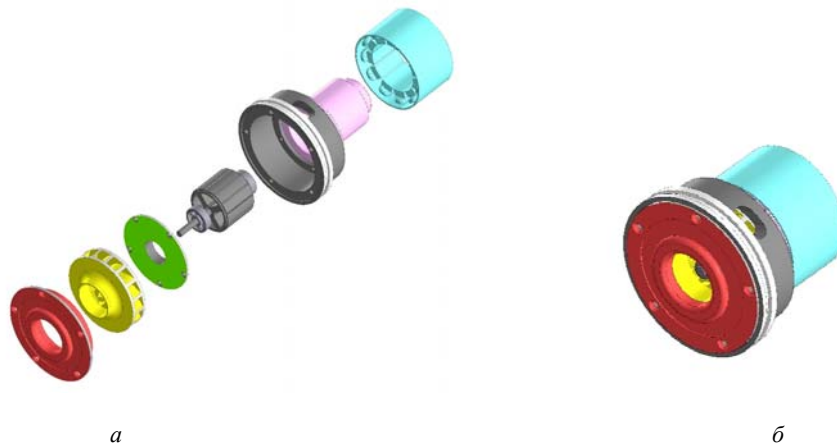


Рис. 3 Конструкция топливного насоса с бесколлекторным двигателем:
а – основные конструктивные части насоса; б – насос в сборе

Сравнительный анализ топливных насосов с коллекторным электродвигателем и БД

Технические характеристики	Коллекторный двигатель	Бесколлекторный двигатель
Масса и объем	Большую часть массы и объема в конструкции насоса занимает электродвигатель	Масса и объем снижены более чем на 40 %
Дренажная полость	Дренажная полость в корпусе насоса увеличивает общий объем конструкции	Дренажная полость отсутствует
Дренажная система	Дренажные трубопроводы топливных насосов в фюзеляже усложняет общую конструкцию ВС Не эффективные методы диагностики исправности дренажной системы	Дренажная система отсутствует
Электропитание	Падение напряжения электрического питания постоянным током снижает производительность насоса	Падение напряжения менее чем на 60 % не влияет на производительность насоса
Коллекторно-щеточный узел	Возникновение пожара из-за попадания топлива в КЩУ	КЩУ отсутствует
	Отказ насоса по причине выгорания и износа КЩУ	
	Возможность возникновения радиопомех, из-за возникновения искрения в КЩУ	
Ресурс	Ограничен межремонтный и назначенный ресурс топливного насоса	Ресурс ограничен условно
Эксплуатация и ремонт	Топливный насос располагается на ВС в труднодоступных местах с учетом геометрических размеров, конструкции и дефицитом наличия мест установки	Насос располагается его в местах удобных для обслуживания
	Для выявления причины отказа насоса требуется демонтаж насоса с сопутствующими операциями по опорожнению топливного бака, или трубопровода	Насос устанавливается последовательно трубопроводу с перекрывающими кранами
	Для ремонта и замены комплектующих частей насоса требуется его полная разборка	Ремонт и замена электрической части насоса без демонтажа корпуса насоса

Сравнительный анализ показывает, что внедрение БД в агрегаты топливной системы ВС взамен коллекторных электродвигателей позволит значительно повысить безопасность полетов, уменьшить трудовые затраты на обслуживание ВС и повысить эффективность работы топливной системы и ВС в целом (см. таблицу).

Итак, сведем воедино основные аргументы в пользу БД:

- большая габаритная мощность (отношение мощности, развиваемой двигателем, к занимаемому им объему);
- сравнительно малый вес;
- высокий КПД;

- высокая точность регулирования в соответствии с имеющимися условиями;
- адаптивность в соответствии с изменением внутренних климатических параметров;
- малые пусковые токи;
- режим работы с низким уровнем шума и минимальной вибрацией,
- длительный срок службы, не нуждается в обслуживании.

Библиографические ссылки

1. Далин В. Н., Михеев С. В. Конструкция вертолетов : учебник. М. : Изд-во МАИ, 2001. 352 с.

2. Панасюк Г. И., Попов И. А., Привалов Г. В. *Авиационные электрические машины*. М. : ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1985.

3. *Руководство по технической эксплуатации 2437 РЭ Вертолета МИ-8МТ*, 1982.

4. Данилов В. А., Занько В. М., Калинин Н. П., Кривко А. И. *Вертолет Ми-8МТВ*. М. : Транспорт, 1995. 295 с. (Производственное издание).

5. Овчинников И. Е. *Вентильные электрические двигатели и привод на их основе*. СПб. : Изд-во Корона-Век, 2016. 336 с.

References

1. Dalin V. N., Miheev C. V. *Konstrukcia vertoletov: Uchebnik* [Helicopter design] М. : MAI Publ., 2001. 352 p.

2. Panasyuk G. I., Popov C. V., Privalov G. V. *Aviatsionnye ehlektricheskie mashiny* [Aviation electric machines]. М. : Red Banner Academy N. E. Zhukovsky, 1985.

3. *Rukovodstvo po tekhnicheskoy ehkspluatatsii 2437 REH Vertoleta MI-8MT* [Technical operation manual 2437 RE Kerosene heater 2437, Helicopter Mi-8MT]. 1982.

4. Danilov V. A., Zanko V. M., Kalinin N. P., Krivko A. I. *Vertolet Mi-8MTV* [Helicopter Mi-8MTV]. М. : Transport Publ., 1995. 295 p. (Production edition).

5. Ovchinnikov I. E. *Ventil'nye ehlektricheskie dvigateli i privod na ikh osnove* [Valve electric motors and drive based on them]. SPb. : Korona-Vek Publ., 2016. 336 p.

© Емельянов А. Н., Батку О. П., 2020

УДК 620.1

ИСПЫТАНИЯ ФОТОПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЕРМЕТИЧНОГО СОЕДИНЕНИЯ

З. А. Кузнецова, А. П. Ладыгин, М. И. Синиченко, А. Д. Кузнецов, И. А. Клешина

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

Описаны испытания, проводимые с уплотнительными прокладками, выполненными из фторопласта-4 для обеспечения герметичного соединения элементов системы терморегулирования космического аппарата, находящегося под действием внутреннего давления. Приведены результаты испытаний.

Ключевые слова: фторопласт-4, герметичность, система терморегулирования.

PHOTOPOLYMER MATERIAL TESTING TO PROVIDE THE HIGH TIGHTNESS

Z. A. Kuznetsova, A. P. Ladygin, M. I. Sinichenko, A. D. Kuznetsov, I. A. Kleshina

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

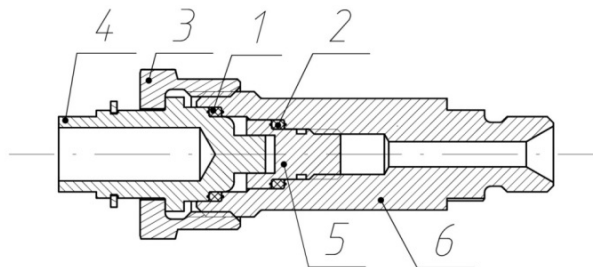
The paper describes the tests carried out with teflon gaskets to ensure a high tightness of spacecraft thermal control system elements connection under pressure. The test results are presented.

Keywords: teflon, tightness, thermal control system.

Фторопласт-4 широко используется при испытаниях космической техники, для изготовления оснастки, уплотнительных элементов, заглушек, защитных колпачков. Поскольку фторопласт-4 обладает стойкостью к химическим воздействиям, он широко применяется в качестве уплотнительного материала при испытаниях трубопроводов систем терморегулирования (СТР), теплоноситель которых – химически агрессивные среды [1–2]. Ставилась задача о подборе момента затяжки для двух прокладок, выполненных из фторопласта-4 для обеспечения герметичности переходника, изображенного на рис. 1, используемого при заправке трубопроводов СТР во время испытаний. Соединение находится под воздействием внутреннего давления 4,8 МПа, требуемая герметичность $2,74 \cdot 10^{-5}$ Вт. В качестве теплоносителя используется ЛЗТК-2.

В табл. 1 приведены размеры уплотнительных прокладок [3], а также моменты затяжки, используемые вначале испытаний [4]. Необходимость экспериментального определения момента затяжки фторопласта-4 обусловлена его ползучестью, при нахождении под нагрузкой [5]. Исходя из этого, герметичность соединений, находящихся под давлением и работающих в условиях различных температур (от минус 35 °С до плюс 85 °С) находится под сомнением. Для экспериментального определения моментов затяжек двух уплотнительных прокладок были проведены испытания, приведенные в табл. 2 для трех образцов (см.

рисунок) с начальными моментами, приведенными в табл. 1.



Штуцерное соединение, используемое при отработке узлов СТР:

- 1 – фторопластовая прокладка размер 12×15;
- 2 – фторопластовая прокладка размер 8×11;
- 3 – гайка накидная; 4 – наконечник внутренний; 6 – переходник СТР

В процессе испытаний, менялись моменты затяжки, исходя из результатов проверки на герметичность.

В табл. 3 приведены результаты испытаний и моменты затяжки для фторопластовых прокладок, обеспечивающих герметичность $2,74 \cdot 10^{-5}$ Вт при внутреннем давлении 4,8 МПа и перепаде температур от плюс 85 °С и минус 35 °С.

Таблица 1

Начальные моменты затяжки

Размер прокладки	Номинальный, Н·м	Минимальный, Н·м	Максимальный, Н·м
12×15	15	8	23
8×11	6	3	9

Таблица 2

Экспериментальное определение моментов затяжек

№п/п	Наименование испытания	Требование
1	Прочность	Давление 7,2 МПа, время выдержки 5 мин
2	Герметичность	Гелием при давлении 4,8 МПа негерметичность не более $2,74 \cdot 10^{-5}$ Вт
3	Выдержка	12 часов при давлении 4,8 МПа
4	Герметичность	См. п. 2
5	Термоциклирование	4 часа при температуре плюс 85°С и минус 35°С, давление во внутренней полости 4,8 МПа
6	Прочность	См. п. 1
7	Герметичность	См. п. 2
8	Выдержка	См. п. 3
9	Герметичность	См. п. 2
10	Термоциклирование	См. п. 5
11	50 циклов установки/извлечения прокладок	С экспериментальным моментом затяжки
12	Герметичность	См. п. 2
13	Выдержка	См. п. 3
14	Герметичность	См. п. 2
15	50 циклов установки/извлечения прокладок	См. п. 11
16	Герметичность	См. п. 2
17	Выдержка	См. п. 3
18	Герметичность	См. п. 2
19	100 циклов установки/извлечения прокладок	См. п. 11
20	Герметичность	См. п. 2
21	Выдержка	См. п. 3
22	Прочность	См. п. 1
23	Герметичность	См. п. 2
24	Термоциклирование	п. 5
25	Вибрационные нагрузки	Синусоидальная и случайная вибрация
26	Герметичность	См. п. 2

Таблица 3

Фактические моменты затяжки

Размер прокладки	Экспериментальный момент затяжки, Н·м	Номинальный по ГОСТ 19749–84
12×15	20	15
8×11	12	6

Очевидно, что первоначальные моменты затяжки в 1,5–2 раза меньше экспериментальных, что подтверждает сложность работы с фторопластом-4 для обеспечения герметичности соединений под действием нагрузки. Стоит отметить, что приведенный объем испытаний необходим в полном объеме, поскольку прокладки теряли герметичность после совокупности проводимых проверок. Выбранные моменты затяжки

успешно используются при работе заправочного вентилля СТР с использованием аммиака в качестве рабочей жидкости.

Библиографические ссылки

1. Опыт применения фотополимерных материалов в авиационной технике / Э. Я. Бейдер, А. А. Донской, Г. Ф. Железина и др. // Рос. хим. ж. 2008. Т. LII, № 3.

2. Михайлин Ю. А. Термоустойчивые полимерные материалы. СПб. : Профессия, 2006. 624 с.

3. ОСТ В6-05-5033-74. Заготовки из фторопласта-

4. Типы и основные размеры. М. : Изд-во стандартов, 1976. 22 с.

4. ГОСТ 19749-84. Соединения неподвижные разъемные пневмогидросистем. М. : Изд-во стандартов, 1986. 21 с.

5. Свойства и применение радиационно-модифицированного фторопласта Ф-4РМ / Ю. В. Сытый, Л. В. Чурсов, С. А. Хатипов и др. // Авиационные материалы и технологии. 2012.

References

1. Beyder E. Ya., Donskoy A. A., Zhelezina G. F. [Experience in using photopolymer materials in aviation technology]. *Opyt primeneniya fotopolimesnykh materialov v aviatsionnoy tekhnike. Ros.khim.zh.*, 2008. Т. LII, № 3 (In Russ.).

2. Mikhaylin Yu. A. *Termoustoychivye polimernye materialy* [Heat-resistant polymer materials]. SPb. : Professiya Publ., 2006. 624 p.

3. OST V6-05-5033-74. *Zagotovki iz ftoroplasta-4. Tipy i osnovnye razmery*. [Teflon blanks. Types and basic sizes]. M. : Standartinform Publ., 1976. 22 p.

4. GOST19749-84. *Soedineniya nepodvizhnye raz'emnye pnevmogidrosistem* [Connections fixed, removable pneumatic hydraulic systems]. M. : Standartinform Publ., 1986. 21 p.

5. Yu. V., Chursov L.V., Khatipov S.A. [Properties and application of radiation-modified fluoroplastic F-4RM] // *Svoystva i primeneniye radiatsionno-modifitsirovannogo ftoroplasta F-4RM*. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii Publ.*, 2012.

© Кузнецова З. А., Ладыгин А. П.,
Синиченко М. И., Кузнецов А. Д.,
Клешнина И. А., 2020

ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВЫХ СДВИГОВ В АВИАЦИОННЫХ РАДИОСИСТЕМАХ

В. М. Мусонов, В. Ф. Бадыгов, О. П. Батку*

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

*E-mail: oksana_batku@mail.ru

Перспективное направление повышения эффективности эксплуатации авиационной техники путем использования цифровых методов измерения фазовых сдвигов в авиационных радиосистемах, позволяющих сократить массу и энергопотребление бортовой и наземной аппаратуры.

Ключевые слова: радиосистема, фазометр, авиационная радионавигация, погрешности измерений.

MEASUREMENT OF PHASE SHIFTS IN AVIATION RADIO SYSTEMS

V. M. Musonov, V. F. Badygov, O. P. Batku*

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: oksana_batku@mail.ru

A promising direction for improving the efficiency of aviation equipment operation by using digital methods for measuring phase shifts in aviation radio systems, which reduce the weight and energy consumption of onboard and ground equipment.

Keywords: radio system, phase meter, aviation radio navigation, measurement errors.

Фазоизмерительный принцип находит применение в радиосистеме ближней навигации VOR стандарта ИКАО, в которой азимут принимаемого радиомаяка определяется путем измерения разности фаз между опорным и азимутальным сигналами [1]. Измеритель выполнен на основе компенсационного метода. В азимутальном измерителе сигнал опорной фазы, не зависящий от местоположения объекта, и азимутальный сигнал формируются на выходах приемного устройства. Фаза азимутального сигнала относительно опорного определяет ориентацию объекта по отношению к радиомаяку. Этот сигнал фильтруется приемным устройством и поступает на верхний вход измерителя.

В фазовращателе ФВ (рис. 1) фаза сигнала, поступающего на $Vx1$, сдвигается с помощью электродвигателя ЭД, после чего дополнительно сдвигается на угол $\pi/2$ и подается на фазовый детектор ФД.

Выходное напряжение ФД при некотором упрощении можно представить в виде

$$U_{\text{вых}} = \left[K_d U_{m1} U_{m2} / (U_{m1}^2 + U_{m2}^2)^{1/2} \right] \cos(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (1)$$

поэтому нулевому напряжению на выходе ФД соответствует разность фаз входных сигналов, равная $\pi/2$.

На второй вход ФД подается азимутальный сигнал с входа 2 измерителя. Выходное напряжение ФД преобразуется в пропорциональное ему переменное напряжение частотой 400 Гц, фаза которого зависит от знака напряжения на выходе ФД. В зависимости от фазы питающего напряжения ЭД вращает ось фазовращателя по часовой или против часовой стрелки,

пока напряжение на выходе ФД не станет равным нулю. После завершения работы электродвигателя значение угла поворота ФВ, численно равное азимуту точки приема, передается на индикатор азимута и в систему автоматического управления (САУ). Инерционность электромеханической системы управления фазовращателем обеспечивает высокую помехоустойчивость данной компенсационной системы измерения фазового сдвига.

Основная погрешность компенсационных измерителей фазы связана с отклонением фазочастотной характеристики фазовращателя от линейной зависимости и смещением нуля фазового детектора. Уменьшение этой погрешности достигается использованием цифровых методов их построения.

Цифровые методы измерения разности фаз известны достаточно давно [2], однако, прежде, сравнительно высокая стоимость этих приборов затрудняла их широкое использование. Нами предлагается сравнительно простой и не дорогой вариант измерителя разности фаз, который может найти применение при изучении авиационной радиоэлектронной аппаратуры и электрооборудования воздушных судов.

В цифровых фазометрах обеспечивается более высокая точность измерений, так как в них отсутствует промежуточное преобразование фазового сдвига в постоянное напряжение, а временной интервал непосредственно преобразуется в цифровой код [3]. Упрощение аппаратуры достигается применением микросхем и микропроцессоров. В частотном диапазоне от долей герц до десятков килогерц измерение может выполняться за один период путем преобразования

временных интервалов $T, \Delta t_1$ и Δt_2 в цифровой код с последующим вычислением фазового сдвига с помощью встроенного микропроцессора. В более высокочастотном диапазоне возрастает погрешность дискретного преобразования временных интервалов в цифровой код.

Для уменьшения этой погрешности используют усреднение результата измерений за несколько периодов.

Структурная схема фазометра с усреднением приведена на рис. 2, а временные диаграммы его работы – на рис. 3.

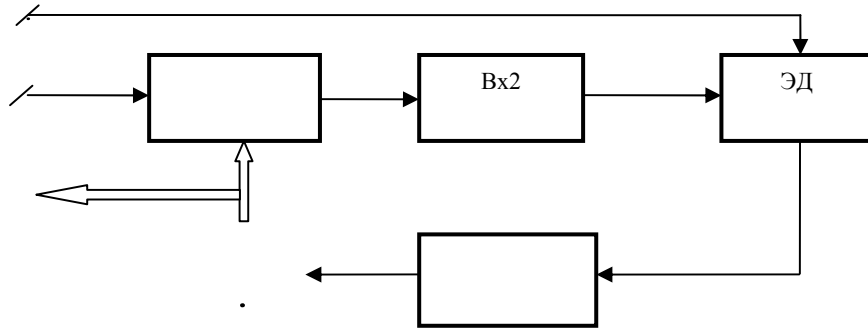


Рис. 1. Измеритель фазы азимутальной системы VOR

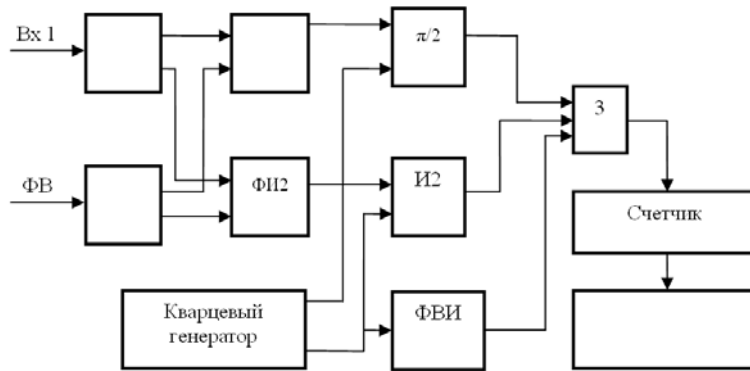


Рис. 2. Структурная схема фазометра с времяимпульсным преобразованием

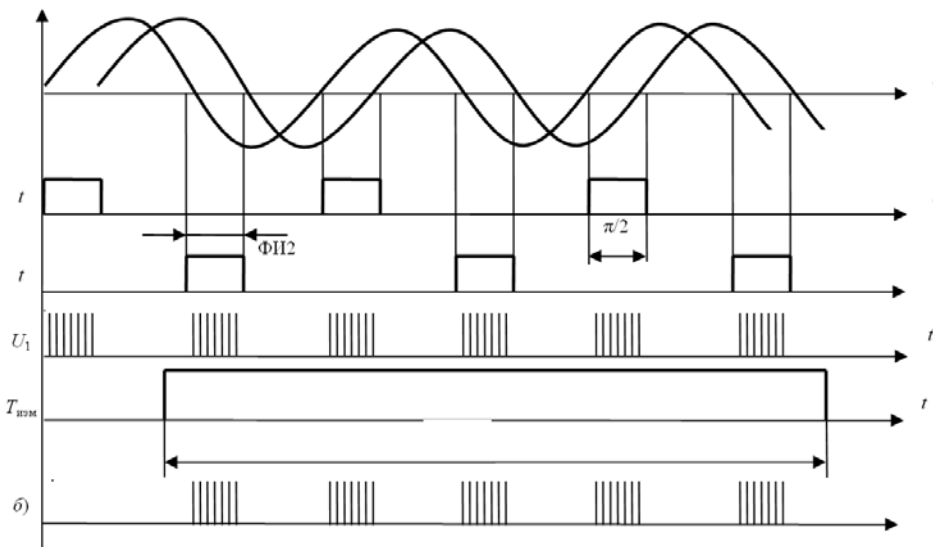


Рис. 3. Временные диаграммы работы фазометра

Формирователи ФИ1 и ФИ2 преобразуют входные гармонические сигналы в последовательности коротких импульсов, соответствующие по времени переходам через нуль входных сигналов в положительном и отрицательном направлениях. Импульсы, соответствующие по времени переходам через нуль в положительном направлении, поступают на запуск и сброс ФИ1, формируя интервал Δt_1 а импульсы, соответствующие по времени отрицательным переходам через нуль, поступают на запуск и сброс ФИ2, формирующего интервал Δt_2 .

С выходов ФИ1,2 импульсы длительностью Δt_1 и Δt_2 открывают логические элементы И1, И2 (1, \wedge 2), на вторые входы которых поступают последовательности счетных импульсов генератора, деленных на два по частоте и сдвинутых по фазе на 180 градусов. «Пачки» счетных импульсов длительностью Δt_1 и Δt_2 с выходов 1, \wedge 2 подаются на суммирующий элемент «И» 3, на второй вход которого поступает стробирующий импульс, формируемый делителем частоты, коэффициент деления которого выбран равным $18 \cdot 10^n$. Количество импульсов, поступивших на счетчик, будет определяться по формуле

$$N = 18 \cdot 10^n (\Delta t_1 + \Delta t_2) / T, \quad (2)$$

где T – период входных сигналов.

Результат измерения с разрядов счетчика выдается на индикаторное устройство, показания которого соответствуют измеряемой разности фаз в градусах и долях градусов фазы.

Время измерения разности фаз $T_{\text{изм}}$ постоянно и определяется периодом следования импульсов генератора и коэффициентом деления делителя, которые не зависят от частоты входных сигналов [4; 5].

Погрешности измерения включают отмеченные ранее погрешности преобразования фазовых сдвигов во временной интервал и погрешность преобразования полученных интервалов в цифровой код (погрешность дискретности).

$$\begin{aligned} \sigma_1^\circ &= 360 \sqrt{p(1-p)} \sqrt{F / f_{\text{кв}}} / \sqrt{N_0}; \\ \sigma_2^\circ &= 360 \sqrt{F / f_{\text{кв}}} / \sqrt{6N_0}, \end{aligned} \quad (3)$$

где F – частота измеряемого сигнала; $p = \{t_\phi / t_0\}$ – среднестатистическое отношение фазового интервала и периода сигнала; $f_{\text{кв}}$ – частота квантовых импульсов, $N_0 = f_{\text{кв}} / T_{\text{изм}}$.

Библиографические ссылки

1. Авиационная радионавигация : справочник / А. А. Сосновский, И. А. Хаймович, Э. А. Лутин и др. ; под ред. А. А. Сосновского. М. : Транспорт, 1990. 264 с.
2. Вишенчук И. М., Котюк А. Ф., Мизюк Л. Я. Электромеханические и электронные фазометры. М.-Л. : Госэнергоиздат, 1962. 207 с.
3. Чмых М. К. Цифровая фазометрия. М. : Радио и связь, 1993. 184 с.
4. Галахова О. П., Колтик Е. Д., Кравченко С. А. Основы фазометрии. Л. : Энергия, 1976. 256 с.
5. Электрические измерения/ В. Н. Малиновский, Р. М. Демидова-Панферова, Ю. Н. Евланов и др. ; под ред. В. Н. Малиновского. М. : Энергоатомиздат, 1985. 416 с.

References

1. Aviation industry radio navigation: Reference Book. A. A. Sosnovsky, I. A. Khaimovich, E. A. Lutin et al. ; under the ed. of A.A. Sosnovsky. M. : Transport, 1990. 264 p. (in Russ.).
2. Vishenchuk I. M., Kotyuk A. F., Mizyuk L. Ya. Elektromekhanikal devices and elektronik devaces phase meters. M.-L. : Gosenergoizdat, 1962. 207 p. (in Russ.).
3. Chmykh M. K. Digital fotometria. M. : Radiol Svyaz, 1993. 184 p.
4. Galachova O. P., Koltik E. D., Kravchenko S. A. Fundamentals of fotometrii. M. : Energiya Publ., 1976. 256 p.
5. Electric measurements / V. N. Maliniwsky, R. M. Demidova-Panferova, Yu. N. Evlanovand et al. ; under the ed. of V. N. Malinowsky's house. M. : Energoatomizdat, 1985. 416 p. (in Russ.).

© Мусонов В. М., Бадыгов В. Ф.,
Батку О. П., 2020

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕРЕГУЛЯРНОЙ МАТРИЦЫ
РАЗНОРОДНЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ДАТЧИКОВ
В ЗАДАЧАХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

С. С. Никитин, О. В. Скулябина

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова
Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-Красноармейская, 1/21

Рассматриваемый в статье способ построения матрицы вихретоковых датчиков позволяет организовать комплексную систему неразрушающего контроля защитных покрытий, коррозионных поражений, усталостных изменений конструкций, поверхностных дефектов, внутренних неоднородностей объекта, контроля толщины и может быть использован при изготовлении и обслуживании конструкций летательных аппаратов.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, вихретоковые преобразователи.

**THE USAGE OF IRREGULAR MATRIX OF DISSIMILAR EDDY-CURRENT SENSORS
IN PROBLEMS OF NON-DESTRUCTIVE CONTROL OF FLAT SURFACES**

S. S. Nikitin, O. V. Skulyabina

D. F. Ustinov Baltic state technical University VOENMEH
1/21, 1-Krasnoarmeyskaya Str., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation

In this article we will discuss the method of constructing matrix of eddy-current sensors; How does it allow us to organize a comprehensive system of non-destructive testing of protective coatings, corrosive lesions, fatigue changes in structures, surface defects, internal heterogeneity of an object, thickness control. How can it be used in manufacture and maintenance of aircraft structures.

Keywords: non-destructive control, eddy-current converters.

Вихретоковые преобразователи нашли широкое применения в задачах неразрушающего контроля для измерений толщин непроводящих и проводящих покрытий, поиска дефектов неоднородности материалов, измерения толщин объектов.

В авиастроении вихретоковый метод контроля используется в процессе производства, для контроля заготовок и оценки качества готовых изделий, и на стадии активной эксплуатации для подтверждения эксплуатационных характеристик отдельных узлов и изделий [1].

Для решения этих задач используются различные по конструкции датчики, с разными принципами работы. В задачах дефектоскопии плоских поверхностей можно разделить задачи поиска трещин, внутренних неоднородностей материалов, контроль толщины объекта и оценка его старения. Для каждой задачи используются датчики, соответствующие определенным требованиям, накладывающим физические ограничения на их конструктивное исполнение. Так для локализации поверхностных повреждений поверхностей датчик должен иметь минимальные геометрические размеры, чтобы обеспечить высокое разрешение при сканировании, а при контроле внутренней структуры материала, его толщины, усталостных изменений, датчик должен иметь значительные геометрические размеры, чтобы обеспечить проникновение наведенных вихревых токов на значительную глубину исследуемого материала [2]. Для повышения инфор-

мативности сканирующей системы датчиков предлагается совместить в одной конструкции вихретоковые датчики разных размеров для получения более комплексной информации об объекте контроля.

Матрицы вихретоковых датчиков используются для увеличения площади контроля объекта и состоят из однородных обмоток. Это позволяет использовать систему датчиков для поиска дефектов одного типа [3]. При этом уменьшение геометрических размеров обмоток датчиков позволяет увеличить точность локализации поверхностных дефектов, а увеличение диаметров обмоток позволяет делать выводы о внутренней структуре исследуемого объекта. Предлагается совместить оба метода одним из двух способов: использованием плоских обмоток на гибком основании, что позволяет разместить в близко расположенных слоях обмотки разных геометрических размеров, или использование катушек разных размеров с применением сердечников, расположенных таким образом, чтобы обеспечить максимально плотное покрытие площади исследуемого объекта при сканировании.

Информация, полученная при помощи такой системы может быть интерпретирована следующим образом: датчики малых размеров позволяют локализовать поверхностные дефекты, датчики больших размеров позволяют делать выводы о их глубине, наличии внутренних дефектов материала, давать оценку усталостных характеристик объекта [4].

С помощью комбинированной системы датчиков можно объединить различные способы вихретокового контроля, уменьшить время, требующееся на комплексную диагностику крыльев, фюзеляжей, колесных дисков, компонентов двигателей, роторов, крепежных отверстий и других элементов авиационной техники [5]. Система датчиков позволяет выявлять трещины, межкристаллическую коррозию, неметаллические включения, контролировать состояние покрытий и в некоторых случаях толщину объекта исследования [6].

Библиографические ссылки

1. Учанин В. Н., Дереча В. Я. Вихретоковый метод выявления поверхностных дефектов узлов авиационной техники в условиях эксплуатации // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2006. № 4. С. 20–28.
2. Электромагнитные и магнитные методы контроля толщины покрытий и стенок изделий / В. А. Сясько, А. И. Потапов и др. М. : Изд. дом СПЕКТР, 2014. 480 с.
3. Вихретоковый контроль с применением вт-матриц / М. Н. Давыдов, науч. рук., профессор. Ю.С. Ткаченко ; Воронежский государственный технический университет. Воронеж, 2017.
4. Разработка адаптивных вихретоковых средств дефектometрии / А. Г. Ефимов. М. : ЗАО «НИИИИ МНПО «Спектр», 2009.
5. Киселев Д. Ю., Макаровский И. М. Неразрушающие методы контроля технического состояния воздушных судов. Самара : Изд-во Самарского ун-та, 2017.

6. Кацура А. В., Лавренов В. А., Рябинин А. А. Применение методов неразрушающего контроля для выявления коррозионных поражений элементов конструкции летательных аппаратов // Вестник СибГАУ. 2011.

References

1. Uchanin V. N., Derecha V. YA. Vikhretokovyy metod vyyavleniya poverkhnostnykh defektov uzlov aviatsion-noy tekhniki v usloviyakh ekspluatatsii // Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol'. 2006. № 4. P. 20–28.
2. Elektromagnitnyye i magnitnyye metody kontrolya tolshchiny pokrytiy i stенок izdeliy / V. A. Syas'ko, A. I. Potapov et al. M. : Izd. dom SPEKTR, 2014. 480 p.
3. Vikhretokovyy kontrol' s primeneniym vt-matrits / M. N. Davydov, nauch. ruk., professor. Yu. S. Tkachenko ; Voronezhskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet. Voronezh, 2017.
4. Razrabotka adaptivnykh vikhretokovykh sredstv defektometrii / A. G. Efimov. M. : ЗАО «НИИИИ МНПО «Спектр», 2009.
5. Kiselev D. Yu., Makarovskiy I. M. Nerazrushayushchiye metody kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya vozdushnykh sudov. Samara : Izd-vo Samarskogo un-ta, 2017.
6. Katsura A. V., Lavrenov V. A., Ryabinin A. A. Primeneniye metodov nerazrushayushchego kontrolya dlya vyyavleniya korozionnykh porazheniy elementov konstruksii letatel'nykh apparatov // Vestnik SibGAU. 2011.

© Никитин С. С., Скулябина О. В., 2020

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВЕРТОЛЕТОВ

Ю. В. Огородникова, В. В. Лукасов

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

Рассмотрен принцип системы диагностирования технического состояния вертолетов.

Ключевые слова: надежность, техническое состояние, система диагностирования, вертолет.

ANALYSIS OF THE DIAGNOSTIC SYSTEM THE TECHNICAL CONDITION OF THE HELICOPTERS

Y. V. Ogorodnikova, V. V. Lukasov

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

The article describes the principle of the system for diagnosing the technical condition of helicopters.

Keywords: reliability, technical condition, diagnostic system, helicopter.

Одним из главных направлений обеспечения эффективного функционирования объектов в области гражданской/военной авиации является постоянный мониторинг состояния технических систем. Дело не только в предотвращение техногенных катастроф, которые сопровождаются травмами и гибелью людей, и которые приносят колоссальные экологические и экономические ущербы. Системы мониторинга вносят огромный вклад в обеспечении надежности работы техники и являются одним из ключевых элементов ее эксплуатации.

Традиционный и наиболее распространенный подход к определению технического состояния состоит в том, что выбирается некоторая совокупность параметров, проводятся измерения, результаты которых сравниваются с заданными границами области работоспособности. При выполнении условий принадлежности каждого из параметров в заданной для него области принимается решение о работоспособности объекта. Если хотя бы для одного из параметров это условие не соблюдается, объект признается неработоспособным [1].

Бортовая система диагностирования вертолетов разрабатывалась изначально для обеспечения безопасности полетов над морем. Для примера, по английским законам летать над морем без системы диагностирования запрещено с 1995 года. В России проблемы с бортовым диагностированием была решена в 2004 году на вертолетах Ми-8МТВ, которые обслуживали платформы на Сахалине.

Бортовые системы объективного контроля (бортовые СОК) – это технические средства, которые предназначены для регистрации и сохранения полетной информации, характеризующей условия полета, действия экипажа и функционирование бортового оборудования.

Бортовые СОК используют для анализа причин и предупреждения лётных происшествий; технической диагностики бортового оборудования и прогнозирования его технического состояния; оценки действий летного состава при выполнении полетного задания. На рисунке приведены виды СОК.

Бортовая система диагностирования вертолетов работает следующим образом.

Система собирает информацию о вибрациях агрегатов вертолёта, сопровождающих их работу и возникающих во время полета. После данная информация считывается на твердотельный накопитель и переносится в наземный комплекс. На рабочем наземном компьютере высвечивается интерфейс, представляющий собой схему вертолета с транспарантами в тех местах, где установлены датчики [2].

Каждый транспарант имеет цветовой идентификатор – желтый, красный или зеленый. Цвет показывает, превышают ли показания параметров вибрации каждого из валов разветвленной трансмиссии привода винтов, главного редуктора, двигателей, коробки приводов агрегатов, наблюдается ли дисбаланс винтов.

Если система находится в дисбалансе, то идентификатор будет гореть красным, если показания параметра отклонились на допустимую величину – желтым, и если показания системы находятся в нормальном диапазоне значений – зеленым. Помимо этого, программа в процессе расшифровки строит тренд, т. е. график изменения измерений от полета к полету для каждого параметра. Если тренд получается неоднозначным, т. е. резко проваливается или наоборот – скачет вверх, то можно сделать вывод, что параметры еще находятся в пределах нормы, но по каким-то техническим причинам происходят изменения.



Разновидности бортовых СОК

Бортовая система диагностирования связана со всеми системами вертолета, включая «черный ящик».

Бортовая система диагностирования отслеживает вибрации каждого вала кинематической схемы вертолета, а это в свою очередь позволяет контролировать техническое состояние агрегатов и предотвращать их последующий отказ в полете [3].

Поэтому сбор и анализ собранной в полете информации о показаниях параметров так важен – с их помощью можно предсказать состояние технической системы и предотвратить отказ агрегатов и систем, как в полете, так и в штатном режиме при техническом обслуживании и ремонте на земле.

Библиографические ссылки

1. Авиационное и радиоэлектронное оборудование самолёта Ан-24. М. : Транспорт, 1975.
2. Справочник инженера по авиационному и радиоэлектронному оборудованию самолётов и верто-

лётот / под ред. В. Г. Александрова. М. : Транспорт, 1978.

3. ОСТ 1 00774–98. Система сбора и обработки полётной информации самолётов (вертолётот). Общие технические требования. М. : НИИСУ, 1998. 21 с.

References

1. Aviatsonnoye i radioelektronnoye oborudovaniye samolëta An-24. M. : Transport, 1975.
2. Spravochnik inzhenera po aviatsonnomu i radioelektronnomu oborudovaniyu samolëtov i vertolëtov / pod red. V. G. Aleksandrova. M. : Transport, 1978.
3. OST 1 00774–98. Sistema sbora i obrabotki polëtnoy informatsii samolëtov (vertolëtov). Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya. M. : NIISU, 1998. 21 p.

© Огородникова Ю. В., Лукасов В. В., 2020

ПЕРСПЕКТИВА ПРИМЕНЕНИЯ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В АВИАЦИОННЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ

Н. С. Писарев, Р. О. Арефьев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: nike0996@mail.ru

В настоящий момент происходит расцвет такой области информационных технологий, как машинное обучение. Эту технологию активно внедряют во многие сферы деятельности человека и машинное обучение показывает очень хорошие результаты. В данной работе рассматривается перспектива применения машинного обучения в авиационных радиоэлектронных системах, что позволит уменьшить негативные факторы, отрицательно сказывающиеся на безопасности полета.

Ключевые слова: радиоэлектронные системы, радиосвязь, человеческий фактор, машинное обучение.

PROSPECTS FOR APPLICATION OF MACHINE LEARNING IN AVIATION RADIO ELECTRONIC SYSTEMS

N. S. Pisarev, R. O. Arefev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: nike0996@mail.ru

At the moment, there is a heyday of such an area of information technology as machine learning. This technology is being actively implemented in many areas of human activity and machine learning shows very good results. This paper discusses the prospect of using machine learning in aviation electronic systems, which will reduce the negative factors that negatively affect flight safety.

Keywords: radio electronic systems, radio communication, human factor, machine learning.

Машинное обучение является ветвью искусственного интеллекта. Более детальнее – это методика анализа данных, которые позволяют машине/ роботу/ аналитической системе самостоятельно обучаться посредством решения массива сходных задач, то есть технология машинного обучения – это поиск закономерностей в массиве представленной информации и выбор наилучшего решения без участия человека [1].

Сегодня уже существует множество методов и алгоритмов, которые прекрасно справляются с обработкой звуковой информации. Одним из самых инновационных является метод Deep Network Priors для шумоподавления. Он объединяет обработку как во временной, так и в частотно-временной области [2–3].

Методы шумоподавления отличаются способом, которым в начале оценивается маска. Каждый метод основан на различном наборе основных предположений о свойствах сигнала, шума, или того и другого. Например, некоторые алгоритмы предполагают, что мощность шума в спектре изменяется медленнее, чем в чистом сигнале и, следовательно, для оценки статистики шума выполняется усреднение мощности сигнала по нескольким временным точкам.

В методе Deep Network Priors исследуется применение глубоких сетевых априоров для задачи unsupervised шумоподавления в аудио. Эти априоры основаны на предположении, что чистый сигнал во

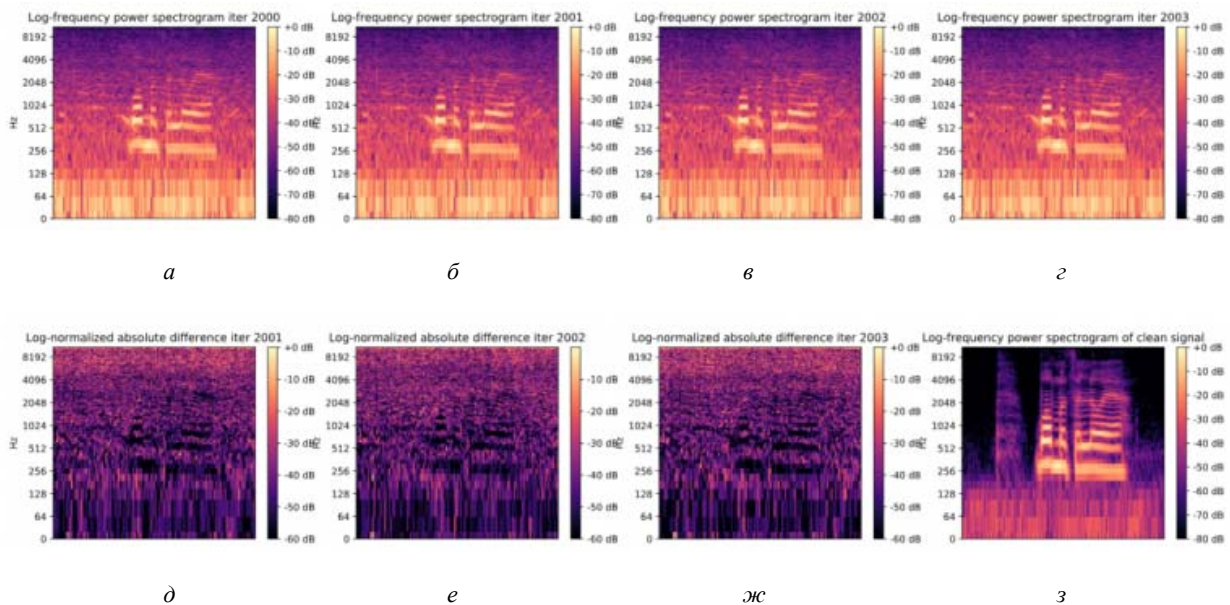
временной области хорошо улавливается глубокой сверточной нейронной сетью [4].

Таким образом, метод обучает сеть, чтобы соответствовать входному сигналу, и улавливает ту часть сигнала, которая имеет наибольшее количество неопределенности, т. е. которая была смоделирована наиболее плохо. Затем строится маска этой части, и к ней применяется один из классических методов улучшения речи.

Принцип работы. Сеть использует CNN-архитектуру WaveUnet, которая состоит из кодера и декодера с residual-соединениями между парами слоев.

Создается случайный входной сигнал z того же размера, что и шумовой сигнал $y = x + n$ (предполагается модель аддитивного шума, а чистый сигнал x и шум n неизвестны). Затем обучается сеть, минимизируя функцию.

Полученную на выходе модель машинного обучения можно применять в различных отраслях, например, в авиационной. При совершении полета пилоты переговариваются с диспетчерами, используя радиосвязь. Во время переговоров на радиосигнал могут накладываться различные шумы, что может отрицательно сказаться на восприятии пилотом звуковой информации [5].



Графики поэтапного обучения

Интегрировав модель машинного обучения в конструкцию приборов радиоэлектронных систем, можно добиться более лучшей фильтрации звукового сигнала от различных шумов.

В дальнейшем отфильтрованный звуковой сигнал можно распознавать другим алгоритмом машинного обучения и выдавать звуковую информацию экипажу в стандартизированном виде. Это повысит воспринимаемость информации, поскольку сводятся на нет негативные факторы, присущие человеку, такие как акцент, звонкость голоса, скорость речи, тембр и т. д.

Библиографические ссылки

1. Никольский Б. А. Бортовые радиоэлектронные системы. М.: 2013. 220 с.
2. Зырянов Ю. Т., Белоусов О. А., Федюнин П. А. Основы радиотехнических систем. М., 2011.
3. Бердышев В. П. Радиолокационные системы. М., 2012.
4. Многодисциплинарная оптимизация, анализ данных и автоматизация инженерных расчетов с помощью программного комплекса pSeven / Е. Бурнаев, Ф. Губарев, С. Морозов, А. Прохоров, Д. Хоминич // CAD/CAM/CAE Observer #4 (88). 2014.

5. Тархов Д. А. Нейронные сети. Модели и алгоритмы // Научная серия «Нейрокомпьютеры и их применение» / ред. А. И. Галушкин. Кн. 18. М.: Радиотехника, 2005.

References

1. Nikol'skii B. A. Bortovye radioelektronnye sistemy. M., 2013. 220 p.
2. Zyryanov Yu. T., Belousov O. A., Fedyunin P. A. Osnovy radiotekhnicheskikh sistem. M., 2011.
3. Berdyshev V. P. Radiolokatsionnye sistemy. M., 2012 g.
4. Mnogodistsiplinarnaya optimizatsiya, analiz dannykh i avtomatizatsiya inzhenernykh raschetov s pomoshch'yu programmnoy kompleksa pSeven / E. Burnaev, F. Gubarev, S. Morozov, A. Prokhorov, D. Khominich // CAD/CAM/CAE Observer #4 (88), 2014.
5. Tarkhov D. A. Neironnye seti. Modeli i algoritmy // Nauchnaya seriya "Neirokomp'yutery i ikh primeneniye" / red. A. I. Galushkin. Kn. 18. M.: Radiotekhnika, 2005.

© Писарев Н. С., Арефьев Р. О., 2020

УДК 338.001.36

ПИЛОТАЖНО-НАВИГАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКОЙ ЭКИПАЖА

А. С. Тимохович, И. С. Кунин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: Kunin300802@gmail.com

Рассматривается необходимость дальнейшей разработки ПНК, входящих в состав интегрированных комплексов бортового оборудования и обеспечивающих решение на борту пилотажно-навигационных и инженерно-штурманских задач, гарантирующих надёжность и безопасность выполнение полётного задания.

Ключевые слова: бортовое радиоэлектронное оборудование, бортовая система ситуационной осведомленности, информационно-управляющее поле, пилотажно-навигационный комплекс, интеллектуальная поддержка экипажа ЛА.

FLIGHT AND NAVIGATION SYSTEM WITH INTELLIGENT CREW SUPPORT

A. S. Timokhovich, I. S. Kunin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: Kunin300802@gmail.com

This article discusses the need for further development of NCS that are part of integrated avionics systems and provide solutions on Board flight navigation and engineering navigation tasks that guarantee the reliability and safety of the flight task.

Keywords: on-Board radio-electronic equipment, on-Board situational awareness system, information and control field, flight and navigation system, intelligent support for the AIRCRAFT crew.

Развитие современных летательных аппаратов (ЛА) тесно связано с разработкой пилотажно-навигационных комплексов (ПНК), входящих в состав интегрированных комплексов бортового оборудования и обеспечивающих решение на борту пилотажно-навигационных и инженерно-штурманских задач. Пилотажно-навигационные комплексы реализуют функции информационного обмена между системами, входящими в состав ПНК, и функции информационно-управляющего поля кабины летательного аппарата – интерфейса между ПНК и экипажем.

Важнейшей характеристикой качества решения пилотажно-навигационных задач является надёжность и безопасность, гарантирующие выполнение полётного задания, возврат на аэродром и посадку.

Большинство существующих ПНК информирует экипаж о достижении предельных режимов полёта, об отказах навигационного оборудования и общем состоянии ПНК, даёт рекомендации по выбору оптимального режима полета, ограничивают управляющие воздействия, поступающие от экипажа, не давая пилотажно-навигационным параметрам выйти за допустимые эксплуатационные пределы. Однако, при определённых сочетаниях внешних факторов и отказов навигационного оборудования, возникающих в поле-

те, экипаж может допустить критические ошибки в управлении летательным аппаратом. Для исключения таких ситуаций необходимо внедрение в ПНК интеллектуальной составляющей, которая бы аккумулировала в себе опыт поведения реальных экспертов в области навигации и пилотирования ЛА в особых ситуациях. В настоящий момент времени ведутся работы по методикам получения экспертных знаний в этих областях.

Современный ПНК оснащённый бортовыми экспертными системами, способен повысить ситуационную осведомлённость экипажа ЛА и обеспечить его интеллектуальную поддержку в особых ситуациях и помогает снизить вероятность критических ошибок экипажа в управлении летательным аппаратом.

Допустим, что усовершенствование пилотажно-навигационного комплекса было проведено за счёт внедрения в состав пилотажно-навигационного комплекса бортовой динамической экспертной системы, реализующей интеллектуальную поддержку экипажа ЛА путём анализа складывающейся особой ситуации и формирования рекомендаций по действию в данной ситуации это, может способствовать снижению времени распознавания особой полётной ситуации при решении пилотажно-навигационных задач; повышению эффективности реагирования на возникновение

особой ситуации; оповещает экипаж о внутреннем состоянии ПНК и внешней навигационной обстановке.

При реализации интеллектуальной поддержки экипажа ЛА непосредственно на борту, можно рассмотреть схему ПНК с дополнительным элементом для организации интеллектуальной поддержки экипажа. Этим ключевым элементом является бортовая система ситуационной осведомленности (БССО) на основе бортовой экспертной системы.

Аппаратная часть БССО представляет собой бортовую цифровую электронную вычислительную машину. Бортовая ЭВМ взаимодействует с другими системами комплекса бортового оборудования (КБО) по интерфейсу AFDX (Avionics Full-Duplex Switched Ethernet) или ARINC-664. Все системы, включая БССО, объединены в общую сеть с использованием сетевого коммутатора. Стандарт ARINC-664, активно используется в перспективной авионике, основан базе стандарта AFDX. Данный стандарт используется на борту самолётов: Airbus A380, Sukhoi Superjet, Boeing-787-900 и др. Основной особенностью системы AFDX и ARINC является использование распределённой резервируемой шины данных, что достигается при помощи предоставления выделенных полос пропускания трафика для каждого маршрута информации в сети и обеспечения доступности спецификации качества обслуживания на каждом узле системы. Это позволяет взаимодействие экспертной системы (ЭС) с ПНК по каналу связи AFDX. Данные, поступающие от датчиков и систем КБО и бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО), принимаются и первично обрабатываются в соответствующем блоке, после чего поступают в качестве фактов в рабочую память ЭС. Далее с использованием машины логического вывода и базы знаний (БЗ) система формирует оценку сложившейся ситуации и передаёт эту оценку в блок окончательной обработки и формирования сообщений экипажу, после чего данные сообщения поступают по каналу связи AFDX на информационно-управляющее поле кабины для непосредственного отображения экипажу ЛА.

Программная часть БССО функционально разделяется на следующие группы:

- основная часть программы, осуществляющая контроль верхнего уровня и управление всеми этапами выполнения и работы программы;

- группа функций, отвечающих за подключение, загрузку и настройка модуля с экспертной системой;

- группа функций, отвечающих за подключение и взаимодействие с сопрягаемым оборудованием, формирование и передачу вектора состояния в экспертную систему и получение данных от неё;

- набор баз знаний, правилами которых реализуется анализ ситуации.

В соответствии с группами особых ситуаций, следует выделить в составе программного обеспечения (ПО) БССО пять баз знаний. Каждая БЗ представляет собой набор правил, отражающих знания экспертов о группе особых ситуаций, и состоит из двух разделов:

- основной раздел – база знаний, формируемая разработчиком в процессе создания системы и кор-

ректируемая (усовершенствуемая) при ее регламентном обслуживании;

- переменный (конфигурационный) раздел – база знаний, формируемая пользователем для обработки оперативно устанавливаемых ситуаций.

Получаемая по линиям связи информация от навигационных систем и подсистем ПНК, КБО, ЭВМ, информационно-управляющее поле (ИУП) предварительно обрабатывается специализированными алгоритмами функционального ПО БССО. Данные группируются для подачи на экспертные системы, сгруппированные по типам распознаваемых ими особых ситуаций с целью формирования по соответствующей базе знаний и правил рекомендации и предупреждения для экипажа (оператора) и передаваемые по линиям связи в ИУП кабины и в бортовой накопитель информации. Эти данные используются экипажем при выполнении полетного задания или наземным оператором для тестирования, проверки и анализа работы экспертной системы.

Параллельно с вычислительными задачами работают задачи контроля состояния БССО и подпрограммы, обеспечивающие информационный обмен с системами БРЭО. Конфигурационные параметры работы БССО, базы данных и правил считываются из памяти БССО при включении системы. Запись их осуществляется с помощью технологического оборудования (используется внешний USB-накопитель или Ethernet) при подготовке системы. Последовательность операций для записи конфигурационного файла во внутреннюю память БССО уточняется при дальнейшей разработке БССО.

Применительно к БССО – каналы интерфейса ЭВМ и специальное ПО ЭВМ, обеспечивающее полное или частичное обновление базы знаний (БЗ). Кроме того, к средствам приобретения знаний относятся также средства ИУП (органы управления, многофункциональные индикаторы, многофункциональные пульты – индикаторы), используемые экипажем при выполнении полета, и специальное ПО, обрабатывающее текущие данные и формирующее «предложения» по внесению в базу знаний (БЗ) правил.

Из вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

Первое, ключевым элементом КБО ЛА является ПНК, обеспечивающий решение задач пилотирования и навигации как одного из важнейших условий выполнения полетного задания. Современные ПНК характеризуются использованием модульной иерархической структуры, ИУП типа «стеклянная кабина», мощными вычислителями и развитым ПО, реализующим детерминированные и статистические методы и алгоритмы комплексной обработки информации.

Второе, основой развития ПНК является внедрение методов и средств интеллектуальной поддержки экипажа для надежного и качественного выполнения широкого круга задач в усложняющихся условиях.

Третье, исходя из анализа отчетов международных организаций ICAO и Euro Control о состоянии безопасности полётов в мире, причиной возникновения 60...80 % авиационных происшествий является

человеческий фактор, определяющийся ошибками в действиях экипажей ЛА.

Четвертое, к возникновению человеческого фактора приводит наличие психофизиологических ограничений, таких как ограниченное время реакции, наличие полосы пропускания лётчика при приёме сигналов, а также малое время развития опасной ситуации из особой в катастрофическую.

Пятое, существующие современные методики поддержки экипажа в случае возникновения отказа или попадания в опасную ситуацию не обеспечивают устранения человеческого фактора, так как зачастую не предусматривает своевременной выдачи рекомендации по действиям и причинах сложившейся ситуации.

Шестое, создание ПНК с интеллектуальной поддержкой экипажа ЛА может быть реализовано на основе бортовых интегрированных экспертных систем.

Библиографические ссылки

1. Лапа В. В., Пономаренко В. А., Чунтул А. В. Психофизиология безопасности полётов. М. : МОО «Ассоциация журналистов, пишущих на правоохранительную тематику», 2013. 396 с.
2. Кучерявый А. А. Бортовые информационные системы : курс лекций. Ульяновск : УлГТУ, 2004. 504 с.
3. Акт правительства Российской Федерации «Правила расследования авиационных происшествий

и инцидентов с гражданскими воздушными судами Российской Федерации» от 1998 № 609 // Постановление Правительства РФ. 2008 г. № 34.

4. Бабиченко А. В., Земляной Е. С. К обоснованию требований к бортовым экспертным системам интеллектуальной поддержки экипажа //Авиакосмическое приборостроение. 2014. № 12. С. 26–37.

References

1. Lapa V. V., Ponomarenko V. A., Chuntul A. V. Psihofiziologija bezopasnosti poljotov. M. : MOO «Associacija zhurnalistov, pishushhih na pravoohranitel'nuju tematiku», 2013. 396 p.
2. Kucherjavj A. A. Bortovye informacionnye sistemy : kurs lekcij. Ul'janovsk : UIGTU, 2004. 504 p.
3. Akt pravitel'stva Rossijskoj Federacii «Pravila rassledovaniya aviacionnyh proisshestvij i incidentov s grazhdanskimi vozdušnymi sudami Rossijskoj Federacii» ot 1998 № 609 // Postanovlenija Pravitel'stva RF. 2008 g. № 34.
4. Babichenko A. V., Zemljanyj E. S. K obosnovaniju trebovanij k bortovym jekspertnym sistemam intellektual'noj podderzhki jekipazha // Aviakosmicheskoe priborostroenie. 2014. № 12. P. 26–37 (In Russ.)

© Тимохович А. С., Кунин И. С., 2014

УДК 338.001.36

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА БЕ-200ЧС

А. С. Тимохович, Д. М. Попов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: djdimon4a@mail.ru

BE-200ЧС как высокоэффективное средство обеспечения экологической безопасности на планете. В работе раскрыты способы повышения общей эффективности авиации, выявлены основные направления в области топливной эффективности при выполнении полетов.

Ключевые слова: экономическая эффективность, содержание самолета, противопожарный, задачи авиации, экологическая безопасность, стоимость эксплуатации.

STUDY OF THE ECONOMIC FEASIBILITY OF USING THE BE-200CHS AIRCRAFT

A. S. Timokhovich, D. M. Popov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: djdimon4a@mail.ru

BE-200CHS as a highly effective means of ensuring environmental safety on the planet. The paper reveals ways to improve the overall efficiency of aviation, identifies the main directions in the field of fuel efficiency in flight operations.

Keywords: economic efficiency, aircraft maintenance, fire prevention, aviation tasks, environmental safety, cost of operation.

На сегодняшний день авиация решает широкий круг задач, главная из которых – авиационное обеспечение экстренного реагирования сил и средств МЧС России на возникающие чрезвычайные ситуации. В рамках этой задачи авиацией доставляются на место ЧС оперативные группы спасателей, медиков, специальное снаряжение, техника и оборудование.

Другая важная задача – участие авиации в поисково-спасательных и аварийно-спасательных работах при проведении спасательных операций, включающих в себя воздушную и инженерную разведку местности в районе ЧС, оперативная доставка и наведение поисково-спасательных групп на объекты поиска, десантирование спасателей, специальных грузов, аэромобильного госпиталя в районы с нарушенной или ограниченной авиационной транспортной системой, эвакуация пострадавших из районов ЧС.

Свыше 70 % поверхности Земли покрыто водой, причем это не безжизненное пространство, а зона активной деятельности человека. Пожарные гидросамолеты в последние годы не заменимы при тушении пожаров на огромных лесных массивах. Чтобы решить проблемы возникновения и устранения такого вида чрезвычайных ситуаций как пожары, изобретен многоцелевой самолет-амфибия БЕ-200ЧС.

Самолеты семейства БЕ-200 являются высокоэффективным средством обеспечения экологической безопасности на планете и сохранения жизни и собственности людей. Летательный аппарат БЕ-200ЧС предназначен для тушения или уменьшения скорости

распространения фронта открытых (лесных) пожаров непосредственно воздействием на горящую кромку или путем создания перед ней заградительных полос с целью оказания помощи наземным силам (командам) пожаротушения. Базовая модификация самолета-амфибии БЕ-200 – противопожарный вариант, может заправляться водой, как на аэродроме, так и осуществлять ее забор на водоеме в режиме глиссирования.

Благодаря наличию шасси самолёт способен осуществлять взлет и посадку, как посредством водной поверхности, так и на стандартных летных аэродромах.

Основные сферы применения: тушение пожаров, поисково-спасательные операции, охрана водных поверхностей, экологические миссии, перевозки пассажиров и грузов.

В своей статье мы попробуем исследовать экономическую эффективность самолета БЕ-200ЧС.

Опыт развития авиационной индустрии за последние годы подтверждает необходимость системного рассмотрения совокупности летно-технических и эксплуатационно-технических характеристик самолетов, соответствия сертификационным требованиям, во взаимосвязи с экономикой эксплуатации парка авиатехники, которая в первую очередь характеризуется величиной стоимости жизненного цикла изделия авиационной техники [1].

Такой подход, ориентированный на функциональную взаимосвязь многих разнородных параметров, характеризующих высокотехнологические изделия,

к которым следует относить авиационной технику, можно проиллюстрировать классической оптимизационной цепочкой взаимосвязей.

Для поддержания должного уровня надежности и безопасности эксплуатации самолетов необходимо улучшать надежность их конструкции, систем и оборудования, вводить резервирование и специальные системы безопасности, что непосредственно влияет на стоимость эксплуатации (через стоимость компонентов, массу и т. д.) и обуславливает новые требования к системе технического обслуживания и ремонта самолетов гражданской авиации.

Основными принципами оценки стоимости жизненного цикла самолета являются:

1. Справедливая оценка затрат на применение продукции, отражающие реальные расходы на содержание самолета на протяжении всего жизненного цикла.

2. Целевое и экономически эффективное расходование денежных средств на содержание самолета.

3. Сокращение издержек.

При оценке эффективности противопожарного самолета основным показателем служит его производительность, выражаемая количеством доставляемой к очагу пожара воды за один летный час. В условиях России среднее расстояние от сухопутных аэродромов до потенциальных зон лесных пожаров составляет около 200 км. В то же время среднее расстояние от пригодных для забора воды водоемов до очагов пожаров колеблется по районам страны от 10 до 30 км.

Одно из главных направлений повышения общей эффективности авиации заключается в снижении расхода топлива.

Основные цели в области топливной эффективности при выполнении полетов заключаются в следующем:

а) в максимально возможной степени выполнять полет на наиболее эффективных с точки зрения расхо-

да топлива скоростях и высотах для конкретной массы воздушного судна;

б) использовать наименьшие воздушные расстояния (например, маршруты с оптимальным учетом ветрового и температурного режимов);

в) одновременно с вышеизложенным обеспечивать управление бортовыми системами с целью сведения к минимуму потребления топлива, и оказывать содействие оптимальному использованию топливно-эффективных траекторий с учетом метеорологических условий [2].

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что для улучшения показателя расхода топлива и уменьшения затрат самолета БЕ-200ЧС нужно, учитывая направление ветра, прокладывать оптимальные маршруты, уменьшая время полета к очагу пожара, и сокращая пройденный путь.

Библиографические ссылки

1. АО «РОСОБОРОНЭКСПОРТ», Пресс-служба. С. 1–7.
2. К проблеме повышения топливной эффективности гражданских самолетов [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-probleme-povysheniya-toplivnoy-effektivnosti-grazhdanskih-samoletov> (дата обращения: 12.05.2020).

References

1. AO «ROSOBORONEKSPORT», Press service. P. 1–7.
2. To the problem of improving the fuel efficiency of civil aircraft [Electronic resource]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-probleme-povysheniya-toplivnoy-effektivnosti-grazhdanskih-samoletov> (access: 12.05.2020).

© Тимохович А. С., Попов Д. М., 2020

УДК 629.7.017.1

**АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ САМОЛЕТА АН-26
ПО ДАННЫМ АВИАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОГО ЦЕНТРА**

С. С. Тришин, О. Г. Бойко*

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: bouko1962@yandex.ru

Рассмотрены статистические данные по процессам технической эксплуатации и технического обслуживания самолетов Ан-26 авиакомпании «Турухан» и авиационно-технического центра Черемшанка за период 2017–2018 гг. Выполнена оценка параметров процесса с использованием аппарата теории Марковских процессов.

Ключевые слова: процесс технической эксплуатации, авиакомпания, показатели эффективности.

**ANALYSIS OF THE PROCESS OF MAINTENANCE OF THE AN-26 AIRCRAFT ACCORDING
TO THE DATA OF THE AVIATION TECHNICAL CENTER**

S. S. Trishin, O. G. Bouko*

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: bouko1962@yandex.ru

The paper considers statistical data on the processes of technical operation and maintenance of An-26 aircraft of the Turukhan airline and the Cheremshanka aviation technical center for the period 2017–2018. The process parameters are estimated using the apparatus of the Markov theory processes.

Keywords: process of technical operation, airline, performance indicators.

Главной целью создания воздушного судна Ан-26 являлось создание надежного и недорогого в обслуживании военного транспортника, на основе самолета Ан-24. По своей сути, конструкция Ан-26 является глубокой модификацией самолета Ан-24Т. При этом, несмотря на незначительные внешние различия, силовые узлы и агрегаты при разработке подверглись серьезным усовершенствованиям [1; 2]. Основными конструктивными особенностями самолета являются:

- наличие грузового люка;
- установлены более мощные двигатели серии АИ-24ВТ;
- доработана топливная система;
- наличие системы нейтрального газа;
- на шасси самолета установлены колеса повышенной проходимости, что допускает эксплуатацию на аэродромах с грунтовыми взлетно-посадочными полосами.

Авиакомпания «Турухан» в составе приписного парка имела два борта Ан-26 [3]. Однако наличие в парке таких уникальных по своим возможностям машин, не приносит прибыли. Оценка экономической эффективности процессов технической эксплуатации (ТЭ) и технического обслуживания (ТО) воздушных судов, является актуальной задачей, поскольку позволяет обосновывать управляющие решения и планировать деятельность предприятия.

Целью работы является исследование процесса ТО самолета Ан-26 по статистическим данным авиакомпании «Турухан» и «Авиационно-технического центра Черемшанка» за период 2017–2018 гг. для выяснения причин его неэффективности.

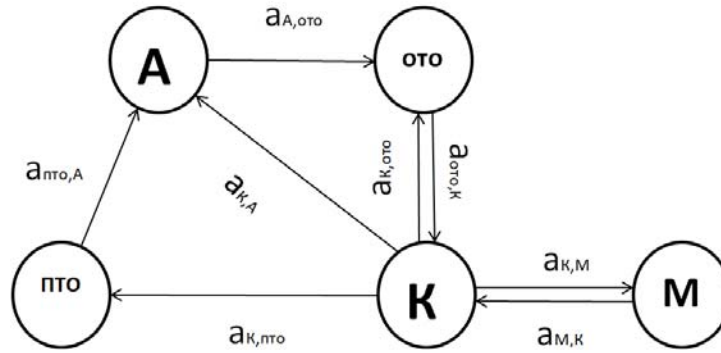
Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи

Собраны, систематизированы и проанализированы статистические данные по временам нахождения в процессах ТЭ и ТО. Разработана математическая модель процесса ТЭ воздушного судна Ан-26 в виде графа состояний и переходов процесса. Составлена система дифференциальных уравнений Колмогорова, выполнен расчет конечных вероятностей процесса и коэффициентов пребывания в его состояниях. Определены показатели эффективности процесса ТЭ [4–6].

Модель процесса ТЭ Ан-26 в виде графа состояний и переходов приведена на рисунке. Обработанные статистические данные о временах процесса приведены в таблице.

Конечные вероятности (P_j) нахождения в состояниях процесса технической эксплуатации, и, коэффициенты пребывания (K_j) в состояниях эксплуатации приведены в табл. 1 [6].

Из таблицы видно, что доминирующим состоянием процесса является состояние простоя в исправном состоянии.



Описание процесса технической эксплуатации графом состояний и переходов:
 А – простой между рейсами в исправном состоянии (резерв);
 К – исправное ВС, находящееся в рейсе;
 М – простой по метеоусловиям; ОТО – оперативно-техническое обслуживание;
 ПТО – периодическое-техническое обслуживание

Показатели процесса ТЭ самолета Ан-26 за период 2017-2018 гг.

Состояние ($N = 5$)	P_j , $j = 1, 2, \dots, k, \dots, N$	μ_j , среднее время пребывания в состояниях процесса, ч	$P_j \cdot \mu_j$	$K_j = \frac{K_j \cdot P_j \cdot \mu_j}{\sum_{k=1}^N P_k \cdot \mu_k}$
К	0,37	754,5	279,165	0,2236
А	0,33	2260	745,8	0,5974
ПТО	0,01	14214	142,14	0,1138
ОТО	0,2898	281	81,209	0,006505
М	0,002	12	0,024	0,00001

Такие показатели, объясняются спецификой использования данных воздушных судов, они незаменимы в сложных климатических условиях и критических ситуациях. Для изменения показателей эффективности в лучшую сторону, необходимо повышать интенсивность использования. В работе рассмотрены и показатели процесса технического обслуживания в АвиаТЦ. Процесс ТО оценивался алгоритмом Систем массового обслуживания (СМО). АвиаТЦ моделировался как многоканальная система с ожиданием. Расчеты показывают, что при высокой пропускной способности Авиатехцентра ($q = 0,97$), вероятность простоя на ТО существенна ($P_{отк} = 0,3$). Основной причиной этого является то, что процесс технического обслуживания воздушного судна Ан-26 хоть и является простым и технологичным, но с закрытием заводов изготовителей, возникает проблема с запасными частями и комплектующими, а запасы старых истощаются, следовательно, эффективность обслуживания ВС Ан-26 в АвиаТЦ снижается.

Вывод. В настоящее время воздушное судно Ан-26 благодаря своим уникальным техническим характеристикам и надежности является незаменимым, так как аналогов подобного типа воздушного судна на

данный момент не существует или они находятся на стадии проектирования, как среди отечественных так и среди иностранных типов воздушных судов.

В нашем регионе техническая эксплуатация воздушного судна Ан-26 не приносит прибыли из-за низкой интенсивности использования.

Процесс технического обслуживания Ан-26 в «АвиаТЦ» с каждым годом становится все более затратным и длительным.

Библиографические ссылки

1. Самолет Ан-26; Руководство по техническому обслуживанию. Часть 2.
2. Наставление по технической эксплуатации и ремонту авиационной техники в гражданской авиации России [Электронный ресурс]. URL: <http://zakonrus.ru/avia/nterat-93.html> (дата обращения: 01.06.2020).
3. Сведения о компании «Турухан» [Электронный ресурс]. URL: <http://samoleting.ru/aviakompanii/otzyvy-ob-aviakompanii-turuhan.html> (дата обращения: 3.01.2020)
4. Ицкович А. А., Чинючин Ю. М., Смирнов Н. Н. Управление качеством процессов технической экс-

плуатации авиационной техники : учеб. пособие. М. : МГТУ ГА. 2011. 90 с

5. Техническая эксплуатация летательных аппаратов : учебник для вузов / Н. Н. Смирнов, Н. И. Владимиров и др. М. : Транспорт. 1990. 423 с.

6. Бойко О. Г. Управление системами и процессами технической эксплуатации летательных аппаратов : практикум / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017. 29 с.

References

1. Samolet An-26; Rukovodstvo po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu. Part 2.

2. Nastavlenie po tekhnicheskoy ekspluatatsii i remontu aviacionnoj tekhniki v grazhdanskoj aviacii Rossii [Elektronnyj resurs]. URL: <http://zakonrus.ru/avia/nterat-93.html> (access: 01.06.2020).

3. Svedeniya o kompanii «Turuhan» [Elektronnyj resurs]. URL: <http://samoleting.ru/aviakompanii/otzyvy-ob-aviakompanii-turuhan.html> (access: 03.01.2020).

4. Ickovich A. A., Chinyuchin Yu. M., Smirnov N. N. Upravlenie kachestvom processov tekhnicheskoy ekspluatatsii aviacionnoj tekhniki : uchebnoe posobie. М. : MGTU GA. 2011. 90 p.

5. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya letatel'nyh apparatov : ucheb. dlya vuzov / N. N. Smirnov, N. I. Vladimirov et al. М. : Transport. 1990. 423 p.

6. Bojko O. G. Upravlenie sistemami i processami tekhnicheskoy ekspluatatsii letatel'nyh apparatov : praktikum / Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2017. 29 p.

© Тришин С. С., Бойко О. Г., 2020



Секция

**«ТЕХНОЛОГИЯ И МЕХАТРОНИКА
В МАШИНОСТРОЕНИИ»**

УДК 621.91.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ РОТАЦИОННЫМ ТОЧЕНИЕМ МНОГОГРАННЫМИ РЕЗЦАМИ

А. С. Бинчуров^{1,2*}, А. П. Грибанов¹, Д. А. Жабинская¹, Ю. И. Гордеев², В. Б. Ясинский²

¹Аэрокосмический колледж Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

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

²Сибирский федеральный университет

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

*E-mail: mexanix@mail.ru

Изучение морфологии стружки подтверждает адекватность предложенных теоретических оценок по форме и размерам срезаемого слоя, с учетом особенностей кинематики резания методом РТМР.

Ключевые слова: частицы порошка, ротационное точение, многогранный ротационный резец, дробление стружки, отвод стружки.

RESEARCH OF THE PROCESS OF OBTAINING POWDER MATERIALS BY ROTARY TURNING MULTIFACETED CUTTERS

A. S. Binchurov^{1,2*}, A. P. Gribanov¹, D. A. Zhabinskaya¹, Y. I. Gordeev², V. B. Jasinski²

¹Aerokosmicheskyy College of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

²Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

*E-mail: mexanix@mail.ru

The study of the morphology of chips confirms the adequacy of the proposed theoretical estimates for the shape and size of the cut layer, taking into account the features of the kinematics of cutting by the RTMC method.

Keywords: the powder particles, rotational turning, versatile rotary cutter, chip control, chip removal.

Композиционные материалы получили широкое применение в авиационной и ракетно-космической технике, где используются такие их свойства, как высокая удельная прочность и стойкость к воздействию высоких температур, стойкость к вибрационным нагрузкам, малый вес. Из этих материалов изготавливают корпусные детали и детали внутреннего интерьера. Наиболее перспективными наполнителями являются порошки вязких, пластичных материалов. Высокая прессуемость порошков алюминия позволяет использовать их в качестве связки при формировании композитов с порошками и волокнами других металлов, в том числе и при изготовлении порошковой проволоки и брикетированных ферросплавов [1–3].

Одним из перспективных методов получения порошков из данных материалов, по всей видимости, будет, является метод ротационного точения многогранными резцами, в котором одно из двух вращательных движений сообщается инструменту, а другое обрабатываемой заготовки. При этом ось вращения инструмента устанавливается перпендикулярно оси вращения заготовки и находится на линии оси центров. Режущая кромка резца многогранная и состоит из N режущих лезвий. Резец совершает принудительное вращение вокруг своей оси, что приводит

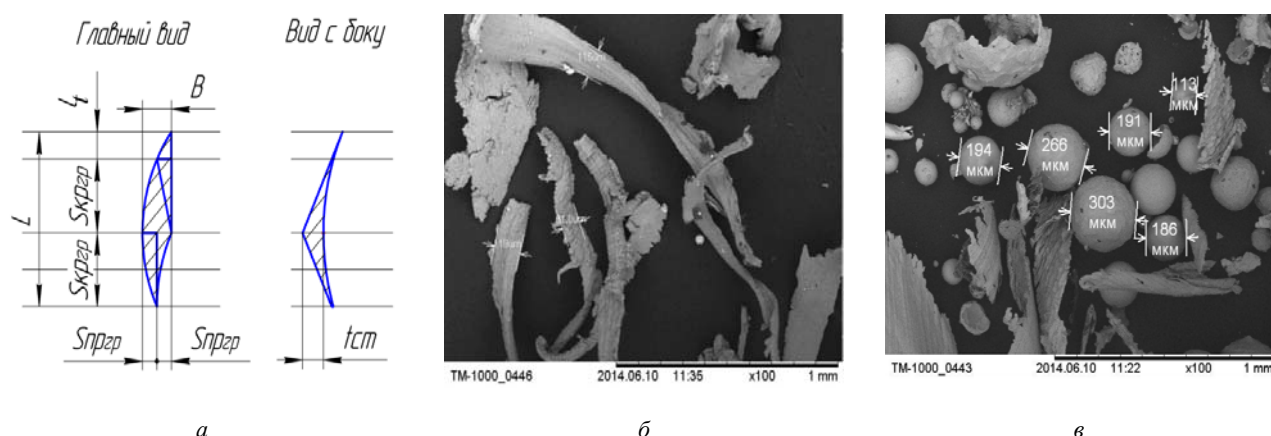
к постоянному обновлению режущей кромки в зоне резания.

Главным движением является вращение инструмента [4; 5]. Причем скорость вращения инструмента должна быть как минимум на порядок больше скорости вращения заготовки. Обработка ротационным резцом производится таким образом, что основное направление деформации стружки происходит вдоль режущей кромки резца. В формировании единичного среза участвуют три движения: главное движение V_p , прямолинейное движение, или продольная подача S_{np} , и круговая подача $S_{кр}$ (рис. 1).

Для определения формы и размеров срезаемого слоя при ротационном точении многогранными резцами (РТМР) в процессе исследований была разработана графоаналитическая, стереологическая, модель. Из приведенной кинематико-геометрической схемы (рис. 2, а) видно, что толщина срезаемого слоя является величиной переменной и изменяется от 0 до величины, равной глубине резания. Аналогичный характер имеет зависимость ширины срезаемого слоя. Важнейшей особенностью модели является возможность прогнозирования размеров и формы срезаемого слоя.



Рис. 1. Схема обработки многогранным ротационным резцом

Рис. 2. Форма и размеры стружки:
а – теория (расчет); б – эксперимент (Д16); в – эксперимент (Сталь 45)

Особенности процесса указывают на прерывистый характер резания, что способствует дроблению срезаемого слоя материала. Кинематические особенности метода РТМР заключаются в постоянном изменении поперечного сечения срезаемого слоя, что обеспечивает повышение интенсивности деформационных процессов.

Экспериментальные исследования проводились на токарно-винторезном станке, модель ИЖ250 ИТВМ.Ф1, с использованием инструментального модуля, состоящего из электрошпинделя, кронштейна, оправки и специально заточенных типовых многогранных твердосплавных пластин. Испытания проводились на оправке с образцами, материалы образцов сталь 45, Д16.

Характер формирующейся стружки убедительно подтверждает теоретические предположения о гарантированном дроблении и отводе стружки из зоны резания.

Значительный интерес представляют результаты изучения морфологии элементной стружки алюминиевого сплава. При обработке алюминия вершинными резцами формируется длинная сливная стружка, а при использовании метода РТМР на аналогичных режимах элементная мелкодробленая с размерами от 0,05 до 1,5 мм (рис. 2, б). Особый интерес представляют результаты изучения морфологии стальной

стружки, полученной на различных режимах РТМР. В зависимости от условий резания формируются разные типы стружек, что отражает высокую интенсивность деформационных процессов в зоне резания, дискретность процесса, локальный разогрев элементов стружки.

Совместное воздействие всех экстремальных по интенсивности в единицу времени силовых и температурных факторов приводит к образованию совершенно новых структур стружки в виде полых сфер с размерами от 100 до 300 мкм и толщиной стенки от 0,5 до 2 мкм (рис. 2, в). На наружной и внутренней поверхности полых сфер наблюдаются следы сдвиговых деформаций. Размеры по поверхностям сдвига около 2 мкм, что соответствует частоте образования элементов $\nu = 120000 \text{ сек}^{-1}$.

Обнаруженные экспериментально особенности формирования разных по морфологии типов стружек подтверждают по нашему мнению повышенную интенсивность деформационных процессов в срезаемом слое материала заготовки.

Библиографические ссылки

1. Сметанин С. Д., Шаламов В. Г. Получение порошков с частицами заданных формы и размеров ротационным фрезерованием // Вестник машиностроения. 2013. № 10. С. 62–64.

2. de Oliveira D., Gomes M. C., da Silva M. B. Spheroidal chip in micromilling // *Wear*. 2019. Vol. 426. P. 1672–1682.

3. Шаламов В. Г., Савельев Д. А., Сметанин С. Д. Получение порошковых материалов ротационным точением // *Вестник машиностроения*. 2012. №. 11. С. 56–58.

4. Влияние кинематических и технологических параметров ротационного точения многогранными резцами на формирование стружки и шероховатость поверхности / Н. С. Индаков, А. С. Бинчуров, Ю. И. Гордеев и др. // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2017. Т. 18, №. 2. С. 379–386.

5. Индаков Н. С., Бинчуров А. . Исследование метода ротационного точения многогранными резцами // *Станки инструмент (СТИН)*. 2013. № 6. С. 21–24.

References

1. Smetanin S. D., Shalamov V. G. [Receiving Powders with Particles Set a Form and the Sizes Rotational Milling] // *Vestnik mashinostroeniya [Bulletin*

of Mechanical Engineering]. 2013. № 10. P. 62–64 (in Russ.).

2. de Oliveira D., Gomes M. C., da Silva M. B. Spheroidal chip in micromilling // *Wear*. 2019. Vol. 426. P. 1672–1682.

3. Shalamov V. G., Savel'ev D. A., Smetanin S. D. Producing powder by rotary grinding // *Russian Engineering Research*. 2013. Vol. 33. № 3. P. 133–135.

4. Indakov N. S., Binchurov A. S., Gordeev Y. I. [Influence of kinematic and technological parameters of rotary turning by multifaceted cutters on chip formation and surface roughness] // *Siberian Journal of Science and Technology*. 2017. Vol. 18, № 2. P. 379–386 (In Russ.).

5. Indakov N. S., Binchurov A.S. Turning by multifaceted cutters // *Russian Engineering Research*. 2014. Vol. 34, № 1. P. 52–54

© Бинчуров А. С., Грибанов А. П., Жабинская Д. А., Гордеев Ю. И., Ясинский В. Б., 2020

УДК 621.791

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ АЛЮМИНИЕВОЙ ФОЛЬГИ И КОНТРОЛЬ

Э. Е. Брюханов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: bryukhanov25@yandex.ru

В работе представлены методы и особенности лазерной сварки алюминиевой фольги.

Ключевые слова: лазерная сварка, контроль, алюминий, алюминиевая фольга.

PECULIARITIES PROCESS OF THE LASER WELDING ALUMINUM FOIL AND CONTROL

E. E. Bryukhanov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: bryukhanov25@yandex.ru

The paper presents the methods and features of laser welding of aluminum foil.

Keywords: laser welding, control, aluminum, aluminum foil.

Метрологическое обеспечение процесса изготовления тонкостенных труб из алюминиевой фольги лазерной сваркой предусматривает контроль параметров сварочного процесса, а также контроль герметичности сварного соединения. Лазерная сварка является сложным процессом, требующим детального контроля.

Среди технологических применений мощных лазеров все более широкое распространение получает лазерная сварка. Это связано со специфическими особенностями указанной технологии, делающими ее привлекательной, а в ряде случаев – незаменимой для решения технических проблем. К таким особенностям относятся [1]:

- концентрация в зоне воздействия лазерного луча высоких плотностей мощности;
- высокий энергетический КПД процесса сварки;
- высокий уровень физико-механических свойств сварного шва;
- возможность точного дозированного подвода энергии в зону сварки.

Принцип действия лазерной сварки сводится к тому, что лазерное излучение направляют в фокус, где из него создается пучок, который и попадает на свариваемые детали. Пучок попадает внутрь металла, поглощается им, нагревает металл, вследствие чего происходит плавка и возникает сварочный шов [1].

Удобство метода состоит в том, что такую сварку производят путем частичного или полного проплавления, в любом положении, под любым углом.

Сварка алюминиевых сплавов характеризуется рядом особенностей, связанных с взаимодействием расплавленного металла с газами окружающей среды, испарением легирующих элементов, образованием оксидной пленки на поверхности, затрудняющей качественное проведение сварочного процесса. Основ-

ные трудности сварки алюминия и его сплавов в большинстве своем устраняются применением концентрированных источников энергии, к которым относятся лазерный и электронный луч.

Под лазерную сварку соединяемые поверхности подготавливают также тщательно, как и под дуговую, включая механическую обработку, травление с последующим осветлением, промывку в горячей воде и зачистку шабером непосредственно перед сваркой [2].

Лазерную сварку осуществляют в среде защитных газов. Обычно рекомендуется использовать гелий для защиты верхней части сварочной ванны, а для корневой части шва может быть использован аргон. Расход гелия должен быть не менее 7–8 л/мин, а аргона 5–6 л/мин [2].

При лазерной сварке алюминиевых сплавов (табл. 1) наблюдается характерная особенность расплавления металла лишь при определенном уровне мощности и плотности мощности. Например, для сплава АМг6 пороговая мощность излучения СО₂ составляет 2–2,2 кВт. При этом сразу достигается глубина проплавления 1,5–2,0 мм, а при меньших значениях мощности проплавление полностью отсутствует. Это обстоятельство связано с высоким коэффициентом отражения алюминиевой поверхностью и последующим резким снижением отражения после начала плавления.

Прочность сварных соединений толщиной 2,0 и 3,0 мм составляет не менее 0,9 от прочности основного металла при сварке без присадочной проволоки (табл. 2). Разрушаются соединения преимущественно по шву [3].

На протяжении всего процесса лазерной сварки необходимо обеспечивать контроль основных технологических режимов и параметров, а также контролировать входные и выходные значения заготовки.

Таблица 1

Оптимальные режимы сварки алюминиевых сплавов излучением CO₂ – лазера

Материал	h , мм	P , кВт	$U_{св}$, м/ч	F , см
АМг6	2,0	2,1	90	12
	2,0	2,3	120	12
АМг6	3,0	2,3	90	14
	3,0	2,8	120	14
АМг6	4,0	2,8	90	14
	4,0	3,1	120	14
АМг61	2,0	2,3	100	12
	4,0	2,8	90	12
АМг6НП	4,0	3,1	120	12

Таблица 2

Механические свойства основного металла и сварных соединений из сплава АМг6

δ , мм	$\sigma_{мм}$, Н/мм ²	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	КСУ, МД ж/м ²	НВ	α , град
2,0	353/346	174/-	0,21/0,25	75/72	-/116
3,0	378/348	188/-	0,22/0,25	82/82	-/74
4,0	468/345	326/-	0,22/0,27	98/80	-/64

Таблица 3

Приборы для контроля технологических параметров лазерной сварки

№	Параметр	Прибор	Характеристики, кл.точности, диапазон
1	Точность	Большой инструментальный микроскоп БМИ-1 (измерительный)	Предел измерения длин по оси X, мм от 0 до 150 Предел измерения длин по оси Y, мм от 0 до 50
2	Шероховатость	Измеритель шероховатости ELCOMETER 224	Ra, 0.005...500 мкм Точность $x \pm 5\%$
3	Внутренние и внешние размеры	Штангенциркуль цифровой ADA Mechanic 150 Pro	Диапазон измерений 0–150 мм; Точность ± 3
4	Температура	Тепловизор testo 865	Диапазон измерений от –20 до +750 °С Точность $\pm 2^\circ\text{C} / \pm 2\%$ от изм. значения
5	Мощность лазерного луча	Измеритель мощности лазерного излучения Sanwa LP1	Диапазоны измерений: 40.00μ/400.0μ/4.000м/40.00 мВт

В процессе лазерной сварки, важным параметром является плотность мощности лазерного луча, характеризующая тепловое воздействие излучения на материал [3]:

$$q_c^{(1)} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{T_{пл} \kappa}{A \sqrt{a \tau_u}}, \quad (1)$$

где $q_c^{(1)}$ – плотность потока; A – поглощательная способность материала; $T_{пл}$ – температура плавления; a – температуропроводимость материала, τ – время воздействия излучения.

Скорость охлаждения материала при действии лазерного излучения имеет не меньшее значение в процессе лазерной сварки:

$$v_c = \frac{\partial T(0,t)}{\partial t} \Big|_{t>\tau} = \frac{A q_0}{\sqrt{\pi \kappa c \rho}} \left(\frac{1}{\sqrt{t}} - \frac{1}{\sqrt{t-\tau}} \right), \quad (2)$$

где v_c – скорость охлаждения материала; τ – время воздействия или продолжительность процесса; q_0 – плотность мощности падающего излучения.

Контроль достигается путем измерений значений входных и выходных данных свариваемого материала, мощности лазерного луча, энергию импульса, частоту повторений, температуру, скорость и т. д.

Измерения происходят с помощью специальных приборов (табл. 3).

Библиографические ссылки

1. Технологические процессы лазерной обработки : учеб. пособие для вузов / А. Г. Григорьянц [и др.] ; под ред. А. Г. Григорьянца. М. : МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2006. 667 с
2. Хренов К. К. Сварка, резка и пайка металлов. М. : Машиностроение, 1970. 408 с.
3. Андрияхин В. М. Процессы лазерной сварки и термообработки. 1988. 125 с.

References

1. Grigoryants A. G. *Tekhnologicheskkiye protsessy lazernoy obrabotki: ucheb. Posobiye dlya vuzov* [Technological processes of laser processing: textbook. manual for universities] / ed. A. G. Grigoryants. M. : MSTU named after N. E. Bauman, 2006. 667 p.
2. Khrenov K. K. *Svarka, rezka i paykametallov* [Welding, cutting and brazing of metals]. M. : Mechanical engineering, 1970. 408 p.
3. Andriyakhin V. M. *Protsessy lazernoy svarki i termoobrabotki* [laser welding and heat treatment processes]. 1988. 125 p.

УДК 621.79.01

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. С. Видлацкий

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

В работе обоснована актуальность изделий из металлополимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: композиционные материалы, металлополимерные материалы, метрологическое обеспечение.

METROLOGICAL SUPPORT OF PRODUCTION OF PRODUCTS FROM METAL-POLYMER COMPOSITE MATERIALS

A. S. Vidlatsky

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

The work substantiates the relevance of products made of metal-polymer composite materials.

Keywords: composite materials, metal-polymer materials, metrological support.

Перспективным направлением в развитии машиностроения является применение полимерных композиционных материалов. Создание легких материалов с улучшенными механическими и физическими свойствами – актуальная задача. В связи с этим исследования в области создания материалов из металлов, упрочненных углеродными наноструктурами, последнее десятилетие активно развиваются [1].

Композиционный материал – конструкционный (металлический или неметаллический) материал, в котором имеются усиливающие его элементы в виде нитей, волокон или хлопьев более прочного материала (рис. 1, 2, см. таблицу).

Примеры композиционных материалов: пластик, армированный борными, углеродными, стеклянными волокнами, жгутами или тканями на их основе; алюминий, армированный нитями стали, бериллия. Комбинируя объемное содержание компонентов, можно получать композиционные материалы с требуемыми значениями прочности, жаропрочности, модуля упругости, абразивной стойкости, а также создавать композиции с необходимыми магнитными, диэлектрическими, радиопоглощающими и другими специальными свойствами.

Металлополимерные трубы – технические характеристики подобных изделий вызывают чувство острой зависти у всех производителей иных сортов трубного проката. Ведь сплав металла и полимера наделяет эти трубы и высокой кольцевой жесткостью, и отменной теплостойкостью, и абсолютной инертностью к любым агрессивным веществам [2]. Поэтому трубы многослойные металлополимерные постепенно вы-

тесняют своих конкурентов из тематических отделов строительных супермаркетов и сердец потенциальных покупателей.

Учет плюсов и минусов позволит реализовать одно из главных достоинств металлополимерных соединений – долговечность и надежность.

Преимущества: не токсичность; антистатичность, исключая воздействие блуждающих токов; устойчивость к коррозии; устойчивость к воздействию агрессивных сред; низкая теплопроводность; хорошая звукоизоляция; повышенная пропускная способность; пластичность; легкость монтажа и удобство проведения ремонта; эстетичный внешний вид [3].

Недостатки: следует учитывать разность коэффициентов расширения металла и пластика, входящих в состав изделия. Поэтому, во избежание протечек соединений, трубы укладываются не внатяжку, а на изгибах предусматривают компенсационные петли; изгибание допускается только определенного радиуса, многократных изгибов надо избегать; относительно центральной оси трубы скручивать нельзя.

Металлополимерные композиты обеспечивают:

- 1) снижение скорости роста усталостной трещины – в 5–100 раз;
- 2) повышение виброакустической выносливости – в 10 раз;
- 3) снижение массы деталей – на 10–15 %.

Свойства композиционных материалов зависят от состава компонентов, их сочетания, количественного соотношения и прочности связи между ними. Армирующие материалы могут быть в виде волокон, жгутов, нитей, лент, многослойных тканей [4].

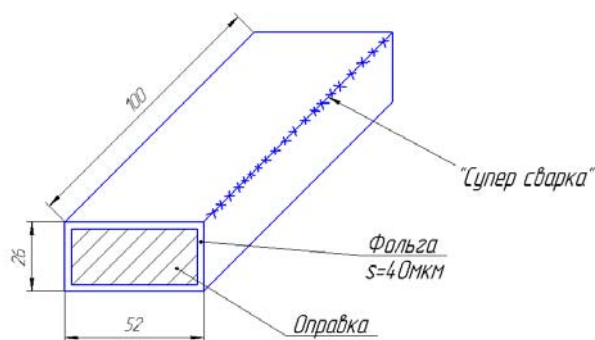


Рис. 1. Общий вид

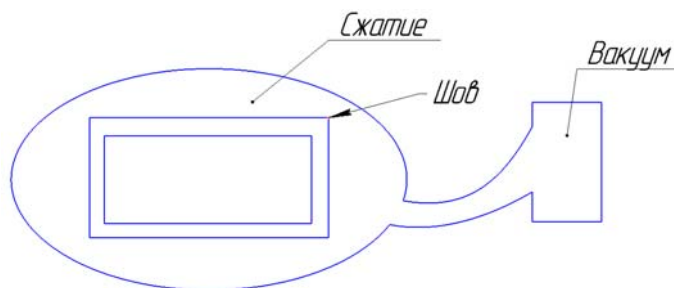


Рис. 2. Создание вакуума

Приборы для контроля технологических параметров

№	Параметр	Прибор	Диапазон, класс точности
1	мм	Нутромер МЕГЕОН 80030	От 5 до 30 Класс точности 1
3	мм	Штангенциркуль ADA Mechanic 150 Pro	От 0 до 150 Точность ± 0.03
4	мкм	Измеритель шероховатости TR220	Ra 0.005 – 40 мкм Класс 3

Технология изготовления труб из металлополимерных композиционных материалов.

1) внутрь делается оправка повторяющая канал из металла или дерева: Ra оправки = 0,08 мкм, 10 класс;

2) фольгу наматывают на оправку и холодной сваркой склеить по ребру, затем нанести ПКМ (полимерный композиционный материал). Обмотать нитью и поместить в чехол с вакуумом, далее в печь;

3) в печи происходит полимеризация при температуре 160–170 °С. Время нахождения изделия в печи $t = 4$ часа;

4) помещаем в холодильник при -24 °С;

5) проведение контроля качества: визуальный, метрологический.

Применение композитов интеллектуального типа позволит снизить массу, увеличить срок эксплуатации, надежность и безопасность эксплуатации конструкции крыла транспортных, пассажирских и маневренных самолетов благодаря применению нового композиционного материала «алюминий–углепластик».

Библиографические ссылки

1. Концепции и основные принципы конструирования интеллектуальных материалов. Технология / Т. А. Голубкова, В. И. Короткова, Т. Г. Золкина, Л. В. Гладышева. Сер.: Конструкции из КМ. 1995. № 2. С. 3–21.

2. Гуняев Г. М., Железина Г. Ф., Ильченко С. И. Слоистые металлополимерные композиты на основе алюминиевых и титановых сплавов // Полимерные композиционные материалы. 2002. С. 50–58.

3. Слоистые металлополимерные композиционные материалы / В. В. Антипов, О. Г. Сенаторова, Н. Ф. Лукина и др. // Авиационные материалы и технологии 2012. № S. С. 226–230.

References

1. *Conceptii i osnovnie printsipi konstruirovaniya intellektualnih materialov* [Concepts and basic principles for the design of intelligent materials] / T. A. Golubkova, V. I. Korotkova, T. G. Zolkina, L. V. Gladysheva. Interdisciplinary scientific and technical collection. Ser.: Structures from CM. 1995. № 2. P. 3–21.

2. Gunyaev G. M., Zhelezina G. F., Ilchenko S. I. *Sloistie metalopolimernie kompoziti na osnove aluminiyevih i titanovih splavov* [Layered metal-polymer composites based on aluminum and titanium alloys] // Polymer composite materials. 2002. P. 50–58.

3. *Sloistie metalopolimernie kompozitsionnie materialy* [Layered metal-polymer composite materials] / V. V. Antipov, O. G. Senatorova, N. F. Lukina et al. // Aviation materials and technologies. 2012. № S. P. 226–230.

© Видлацкий А. С., 2020

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ДРОБИЛКЕ С ВАЛКАМИ В ФОРМЕ РК-ПРОФИЛЯ

Ю. И. Гордеев¹, А. С. Бинчуров^{1,2*}, Д. А. Кривов¹, С. В. Филиппов¹, А. С. Сморкалова²

¹Сибирский федеральный университет

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

²Аэрокосмический колледж Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

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

*E-mail: mexanixs@mail.ru

Предложена конструкция и методика расчета сборной валковой дробилки с рабочими элементами в форме РК-профиля обеспечивающими повышенную интенсивность измельчения.

Ключевые слова: валковая дробилка, измельчение, РК-профиль.

FEATURES OF SHREDDING PROCESSES BY CRUSHER WITH EC – THE PROFILE ROLLS

Y. I. Gordeev¹, A. S. Binchurov^{1,2*}, D. A. Krivov¹, S. V. Filippov¹, A. S. Smorkalova²

¹Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

²Aerokosmicheskyy College of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: mexanixs@mail.ru

The design and calculation methodology of a prefabricated roller crusher with working elements in the form of an EC -profile providing increased grinding intensity.

Keywords: roller crusher machine, shredding, EC – the profile.

На предприятиях машиностроительной (в том числе аэрокосмической) отрасли в процессе производственной деятельности образуется значительное количество различных видов отходов в виде металлической сливной стружки из цветных металлов и сплавов [1]. Поэтому задача дальнейшей переработки и измельчения стружковых отходов является актуальной и практически значимой [2]. Измельчение отходов цветных металлов и сплавов на основе алюминия и титана, связанные с их пластичностью, широко распространёнными методами и устройствами механического дробления вызывает затруднения, поэтому требуется использование альтернативных конструкций в которых сочетаются процессы измельчения дроблением и резанием.

Целью работы является снижение себестоимости и повышение интенсивности измельчения, а также предотвращение заклинивания дробимого материала в щелевом зазоре.

В качестве технического решения проблемы предлагается сборная конструкция валковой дробилки с рабочими органами в форме равноосного контура (РК) [3]. Модернизированная конструкция валковой дробилки (рис. 1) состоит из основных рабочих органов – сборных валков: фиксированного 1 и регулируемого 2 дисков в форме РК-профиля (1.п, 2.п) которые устанавливаются на валы с рабочими поверхностями, в форме шестигранника, что позволяет разме-

щать диски на встречно вращающихся валах 3, 4 со смещением профиля с углом 60° на каждом из валов. Кроме того, встречные диски, установленные на валах 1, 2 также расположенные со смещением. Таким образом, разрушение происходит в зоне контакта четырех встречных поверхностей дисков 1.1 – 2.1 и 1.2 – 2.2, а на измельчаемый материал действуют усилия сжатия – сдвига, а также силы резания по эффекту гильотины (вращающихся ножниц) – рис. 2. Валы 3, 4 устанавливаются в подшипниковые опоры 5, 6, которые имеют возможность перемещения по направляющим 7, 8 для регулировки зазора между поверхностями дисков 1, 2.

Поскольку форма профиля рабочей поверхности дисков выполнена в виде РК-профиля, то это приводит к изменению направления вектора и численной величины скорости измельчения:

$$\text{от } V_{\max} = \frac{2\pi \cdot \rho_{\max} \cdot n}{1000}; \quad (1)$$

$$\text{до } V_{\min} = \frac{2\pi \cdot \rho_{\min} \cdot n}{1000}; \quad (2)$$

где ρ_{\max} – максимальный радиус-вектор контура режущей кромки, [мм]; ρ_{\min} – минимальный радиус-вектор контура режущей кромки, [мм]; n_p – число оборотов диска валковой дробилки, [об/мин].

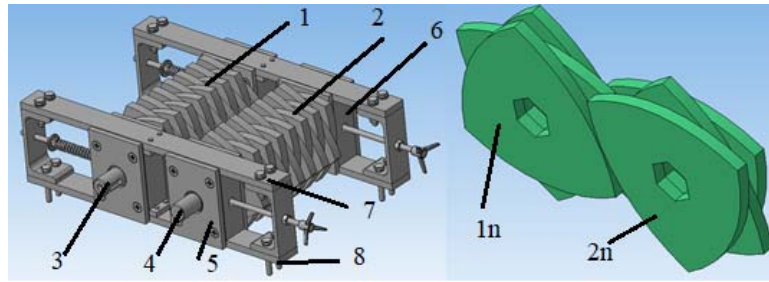


Рис. 1. Конструкция дробилки

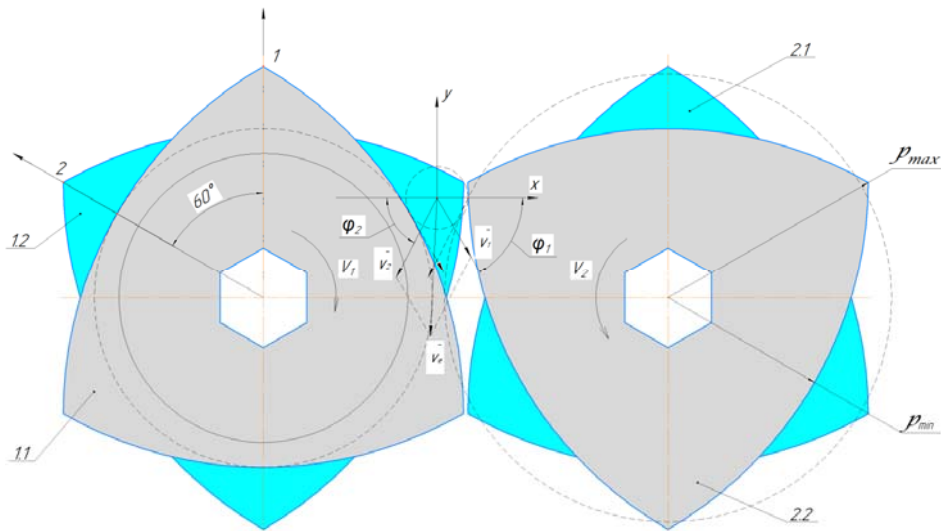


Рис. 2. Схема определения результирующей скорости

Сочетание двух вращательных движений поверхностей дисков, непостоянство численной величины и направленности скорости диктует необходимость в определении результирующей скорости измельчения [4]. В соответствии с предложенной кинематической схемой скорость результирующего движения может быть определена по формуле:

$$|v_e| = \sqrt{\left(\frac{2\pi \cdot \rho_1 \cdot n_1}{1000} \cdot \cos \varphi_1 - \frac{2\pi \cdot \rho_2 \cdot n_2}{1000} \cdot \cos \varphi_2\right)^2 + \left(-\frac{2\pi \cdot \rho_1 \cdot n_1}{1000} \cdot \sin \varphi_1 - \frac{2\pi \cdot \rho_2 \cdot n_2}{1000} \cdot \sin \varphi_2\right)^2}, \quad (3)$$

где φ – угол наклона между вектором скорости v и координатной осью X .

Результаты расчетов по обобщенной формуле (3) подтверждают возможность увеличения результирующей скорости измельчения почти в 2 раза по сравнению с цилиндрическими валками. Эти же расчетные выражения можно использовать в полуэмпирических расчетных формулах для определения производительности (Q) и усилия (P), полученных по методу частных независимых экспериментов. В конечном итоге это позволяет оперативно оценивать силовые и эксплуатационные (производительность)

характеристики модернизированной дробилки при изменении размеров и прочностных свойств измельчаемого материала, а также решать обратную задачу – выбирать рациональные режимы измельчения n , V , размеры валков и щелевого зазора для обеспечения повышенной интенсивности и производительности измельчения.

Проведенное методом конечно-элементного анализа изучение напряженно-деформированного состояния в зоне измельчения [5] подтверждает, что эффективное сочетание различных механизмов разрушения (истирание, раздавливание, резание – скалывание, знакопеременные нагрузки) увеличивают интенсивность деформационных процессов и удельные нагрузки на материал.

Библиографические ссылки

1. Сиваченко Л., Добровольский Ю. История развития и современный уровень техники измельчения // Вестник Белорусско-Российского университета. 2012. № 4 (37). С. 69–76.
2. Падалко С. Оборудование предприятий порошковой металлургии. М.: Металлургия, 1998. 448 с.
3. Кривов Д. А., Гордеев Ю. И. Разработка принципиальной схемы дробилки с валками в форме РК-профиля // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2017. №. 7. С. 78–82.

4. Индаков Н. С., Бинчуров А. С. Особенности ротационного точения многогранными резцами // Вестник машиностроения. 2013. № 10. С. 56–58.

5. Simulation of the stress-strain state of the combined rolls plates in the form of a Reuleaux Triangle Profile roller grinder / D. A. Krivov, Y. I. Gordeev, D. D. Krivova, E. A. Chzhan // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing. 2019. Т. 1353, №. 1. С. 012076.

References

1. Sivachenko L., Dobrovolskiy Y. History of development and modern level of grinding technology // Bulletin of the Belarusian-Russian University. 2012. № 4 (37). P. 69–76.

2. Padalko S. Equipment for powder metallurgy enterprises. M. : Metallurgy, 1998. 448 p.

3. Krivov D. A., Gordeev Y. I. Development of a schematic diagram of a crusher with rolls in the form of an EC-profile // Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University. 2017. № 7. P. 78–82.

4. Indakov N. S., Binchurov A. S. [Features of rotational turning by indexable cutters] // *Vestnik mashinostroeniya*. 2013. № 10. P. 56–58 (in Russ.).

5. Simulation of the stress-strain state of the combined rolls plates in the form of a Reuleaux Triangle Profile roller grinder / D. A. Krivov, Y. I. Gordeev, D. D. Krivova, E. A. Chzhan // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing. 2019. Т. 1353, №. 1. С. 012076.

© Гордеев Ю. И., Бинчуров А. С., Кривов Д. А., Филиппов С. В., Сморгалова А. С., 2020

РАЗРАБОТКА ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ПРИВОДА ТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

С. А. Дубова, А. А. Иголкин

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

Описание этапов разработки электропневматического привода точного позиционирования. Данный привод используется для лабораторных исследований физических процессов внутри цилиндра, используемого для раскрытия посадочного устройства пилотируемого космического корабля.

Ключевые слова: пневматический привод, позиционирование, программируемый контроллер, сжатый воздух, посадочное устройство.

DEVELOPMENT OF A PNEUMATIC PRECISION POSITIONING DRIVE

S. A. Dubova, A. A. Igolkin

Samara University named after academician S. P. Korolev
 34, Moscow highway, Samara, 443086, Russian Federation
 E-mail: simonau@mail.ru

Description of the stages of development of an electro-pneumatic actuator for precise positioning. This drive is used for laboratory studies of physical processes inside a cylinder used to deploy the landing gear of a manned spacecraft.

Keywords: pneumatic drive, positioning, programmable controller, compressed air, landing gear.

В данной работе был разработан пневматический привод точного позиционирования для проведения лабораторных работ и изучения физических процессов внутри пневмоцилиндров, которые используются в системе раскрытия посадочного устройства пилотируемого космического корабля.

В процессе работы была разработана структурная схема пневматического привода точного позиционирования, разработаны принципиальные пневматическая и электрическая схемы, произведён выбор элементной базы под заданные характеристики: длина штока пневмоцилиндра 600 мм, со способностью перемещать объекты массой до 150 кг [1]. В качестве микроконтроллера использовался NI USB-6001. Для выбранного цилиндра была рассчитана надёжность (рис. 1). Рассчитанная вероятность безотказной работы цилиндра в течение года гарантийной работы составила – 93,6 % [2].

Для управления электропневматическим приводом в среде LabView [3] была разработана программа (рис. 2) и SCADA-система для комфортной работы оператора (рис. 3).

Имеется возможность использования трех режимов работы [4]: ручной режим, режим позиционирования и цикловой режим, и двух режимов позиционирования: аperiodический и с перерегулированием.

При ручном режиме работы оператор, нажимая на соответствующие кнопки приводит шток в состояние полного выдвигания или втягивания. В режиме позиционирования оператор на мониторе персонального компьютера вводит требуемую координату.

Программа, сравнивая значение координаты и значение с датчика положения, приводит шток в необходимое положение. Цикловый режим позволяет пользователю задать два крайних положения, между которыми будет производиться поступательно-возвратное движение.

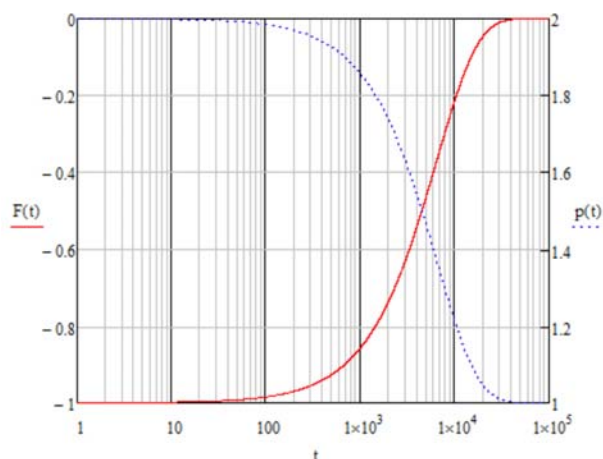


Рис. 1. График функции распределения (красная линия) и график вероятности безотказной работы (синий пунктир)

Также имеется аварийный режим. Он включается автоматически при превышении допустимой границы датчиком давления. При аварийном режиме происходит автоматическое отключение подачи сжатого воздуха в полости пневмоцилиндра.

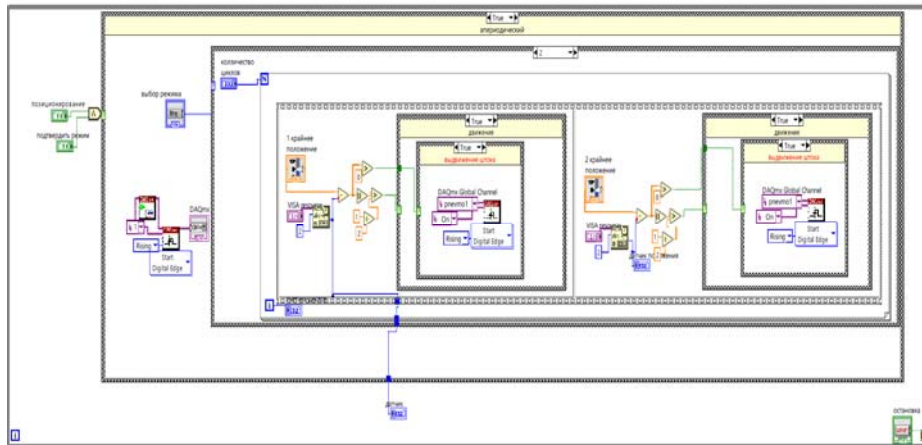


Рис. 2. Скриншот блок-схемы программы управления

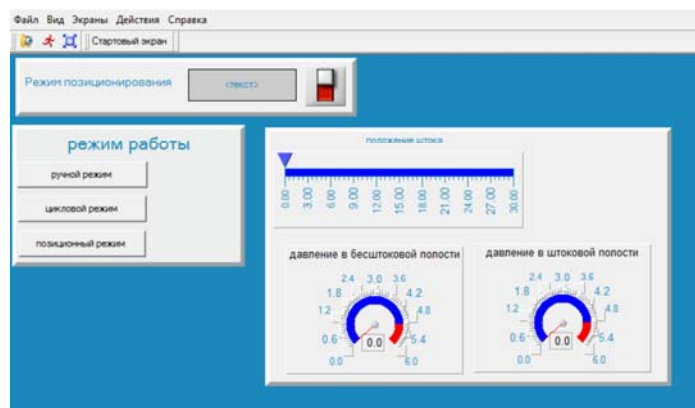


Рис. 3. Лицевая панель SCADA-системы

Для выбора режима позиционирования используется пневмораспределитель 2/2 при включении которого воздух проходит через более открытые дроссели, следовательно, скорость штока увеличивается и режим позиционирования становится с перерегулированием [5]. Выбор режима позиционирования необходим для отработки возможных ситуаций, возникающих в ходе посадки пилотируемого космического корабля.

Для моделирования процессов внутри цилиндра производится запись значений с датчиков напряжения и положения в файл Excel.

Библиографические ссылки

1. Пневматическая аппаратура: каталог Camozzi: разработчик и изготовитель Camozzi Пневматика. М., 2012.
2. Свешников В. К. Станочные гидро-пневмоприводы : справ. библиотека конструктора / В. К. Свешников. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 2004. 512 с.
3. Лупов С. Ю., Муякшин С. И., Шарков В. В. LabVIEW в примерах и задачах : учеб.-метод. материалы. Нижний Новгород, 2007. 101 с.

4. Трифонов, О. Н., Иванов В. И., Трифонова Г. О. Приводы автоматизированного оборудования. М. : Машиностроение, 1991. 336 с.

5. Касимов А. М., Шубин А. Н. Некоторые результаты исследований в области пневмогидроавтоматики // Приборы и системы управления. 1994. Вып. № 11. С. 34–37.

References

1. Pneumatic equipment: Camozzi catalog: developer and manufacturer Camozzi Pneumatics. M., 2012.
2. Svshnikov V. K. Machine hydraulic pneumatic drives: ref. Designer library. 4th ed., Revised and added. M. : Mechanical Engineering, 2004. 512 p.
3. Lupov S. Yu., Muyakshin S. I., Sharkov V. V. LabVIEW in examples and problems : teaching materials for the advanced training program "Teaching National Instruments Technologies". Nizhny Novgorod, 2007. 101 p.
4. Trifonov O. N., Ivanov V. I., Trifonova G. O. Drives of automated equipment. M. : Mechanical Engineering, 1991. 336 p.
5. Kasimov A. M., Shubin A. N. Some results of research in the field of pneumohydroautomatics // Instruments and control systems. 1994. № 11. P. 34–37.

© Дубова С. А., Иголкин А. А., 2020

УДК 62.752, 621:534;833; 888.6, 629.4.015;02

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВИБРАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ПРИ НАЛИЧИИ В СТРУКТУРЕ РЫЧАЖНЫХ СВЯЗЕЙ

С. В. Елисеев, Р. С. Большаков, А. В. Николаев

Иркутский государственный университет путей сообщения
Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15
E-mail: bolshakov_rs@mail.ru

Рассматривается подход, направленный на получение необходимых режимов работы вибрационной технологической машины за счёт изменения параметров приведённой жёсткости системы.

Ключевые слова: вибрационная технологическая машина, приведённая жёсткость, динамическое состояние.

THE FORMATION OF DYNAMICAL CONDITION OF VIBRATION TECHNOLOGICAL MACHINE IN THE PRESENCE LEVER TIES

S. V. Eliseev, R. S. Bolshakov, A. V. Nikolaev

Irkutsk State Transport University
15, Chernishevskiy Str., Irkutsk, 664074, Russian Federation
E-mail: bolshakov_rs@mail.ru

An approach is considered, aimed at obtaining the necessary operating modes of a vibrating technological machine by changing the parameters of the reduced rigidity of the system.

Keywords: vibrating technological machine, reduced rigidity, dynamical condition.

Введение. Решение задач, связанных с оценкой, формированием и управлением динамическим состоянием вибрационного технологического оборудования промышленных предприятий, горной промышленности, строительства и других отраслей, обсуждалось в ряде научных публикаций [1–3]. Достаточно разнообразны конструктивно-технические решения и подходы, позволяющие получать необходимые режимы работы вибрационных технологических машин различного назначения [4; 5].

В предлагаемом докладе рассматриваются особенности оценки и контроля динамического состояния

вибрационной технологической машины при наличии рычажных связей в её составе.

I. Общие положения. Постановка задачи. Расчетная схема исходного технического объекта (вибрационной технологической машины) представляет собой механическую колебательную систему с тремя степенями свободы, как показано на рис. 1.

В структуре системы используется рычажный механизм, обеспечивающий перемещение дополнительных пригрузов m_1 и m_2 на концах элементов рычажно-го механизма в тт. А, В.

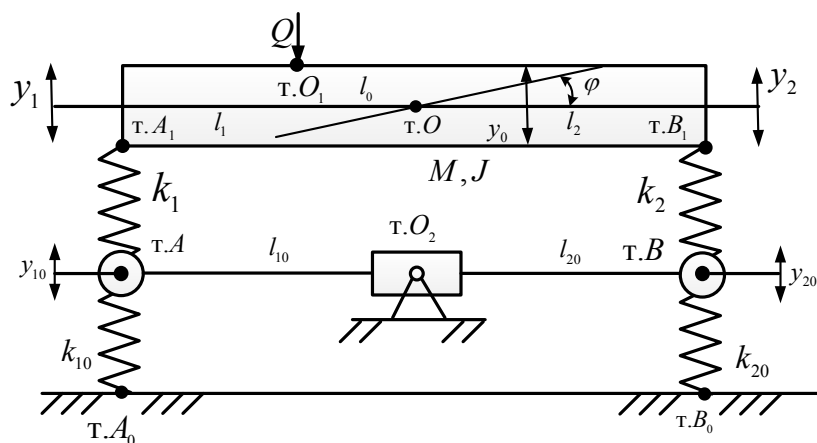


Рис. 1. Расчётная вибрационной технологической машины

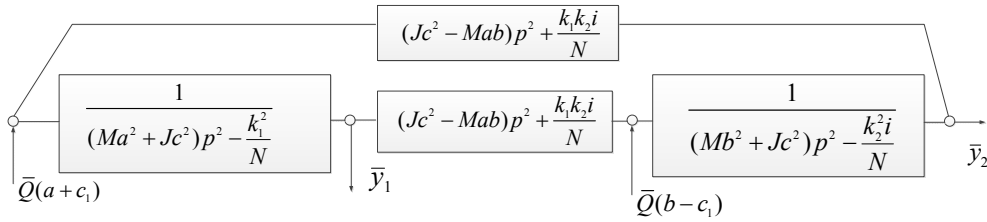


Рис. 2. Структурная математическая модель структурная схема исходной системы по рис. 1

Рабочий орган машины представлен твердым телом, обладающим массой M и моментом инерции J ; рабочий орган опирается на упругие опоры, входящие в систему связанных между собой (рис. 1) пружин и рычажного механизма с центром вращения в т. O_2 . Для построения математической модели в координатах y_1, y_2, y_{10} используется технология, основанная на применениях уравнений Лагранжа 2-го рода с учётом специфики построения, характерной для методов структурного математического моделирования [1].

Рычажный механизм имеет центр вращения в т. O_2 , который может в случае необходимости изменить свое положение и соответственно варьировать значение передаточного отношения (l_{10}, l_{20} – размеры плеч рычажного механизма), определяемое выражением:

$$i = \frac{l_{20}}{l_{10}}. \quad (1)$$

Наличие передаточного отношения i предопределяет связь между координатами y_{10} и y_{20}

$$y_2 = iy_1, \quad (2)$$

что может использоваться как возможность построения самонастраивающихся систем автоматического управления динамическим состоянием технологической машины.

Для построения математической модели вибрационной машины (рис. 1) используется система дифференциальных уравнений движения, получаемая после нахождения выражений для кинетической и потенциальной энергий. Применение преобразований Лапласа при нулевых начальных условиях

$$\bar{y}_1 \left[(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1 \right] - \bar{y}_2 (Jc^2 - Mab)p^2 - k_1 \bar{y}_{10} = \bar{Q}(a + c_1); \quad (3)$$

$$\bar{y}_2 \left[(Mb^2 + Jc^2) + k_2 \right] - \bar{y}_1 (Jc^2 - Mab)p^2 - k_2 i \bar{y}_{10} = 0; \quad (4)$$

$$\bar{y}_{10} \left[(m_1 + m_2 i^2)p^2 + k_1 + k_{10} + i^2(k_2 + k_{20}) \right] - k_1 \bar{y}_1 - k_2 i \bar{y}_2 = \bar{Q}(b - c_1), \quad (5)$$

где $p = j\omega$ – комплексная переменная ($j = \sqrt{-1}$); знак $\langle \rightarrow \rangle$ над переменной означает ее изображение по Лапласу [1; 3].

Полученная система уравнений движения при использовании некоторых преобразований позволяет построить структурную схему системы (рис. 2).

II. Оценка динамических свойств системы. Учитывая свойства системы, можно отметить, что

структура вибрационного поля может корректироваться и оцениваться под необходимые режимы технологического процесса соответствующим выбором значений настроечных параметров и с помощью изменения передаточного отношения i рычажной связи. Исключение переменной y_{10} позволяет получить передаточную функцию межпарциальных связей

$$W_{12}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{(b - c_1) \left[(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1 - \frac{k_1^2}{N} \right] + (a + c_1) \left[(Jc^2 - Mab)p^2 - \frac{k_1 k_2 i}{N} \right]}{(a + c_1) \left[(Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2 - \frac{k_2^2 i}{N} \right] + (b - c_1) \left[(Jc^2 - Mab)p^2 + \frac{k_1 k_2 i}{N} \right]}, \quad (6)$$

анализ которой позволяет построить амплитудно-частотные характеристики системы при изменении параметров передаточного отношения.

Заключение. Таким образом, предлагаемый способ расширения возможностей настройки и контроля динамического состояния вибрационной технологической машины, основанный на свойствах рычажных механизмов, изменение параметров которых позволяет корректировать получать необходимые режимы работы. Предложена методика упрощения динамических свойств системы, основанная на исключении переменных и переходе исходной системы к системе с двумя степенями свободы, что позволяет ввести в рассмотрение ряд новых динамических свойств. Получены аналитические соотношения, необходимые для оценки действия внешних сил на систему.

Библиографические ссылки

1. Eliseev S. V., Eliseev A. V. Theory of oscillations. Structural mathematical modeling in problems of dynamics of technical objects. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2019. 521 p.
2. Елисеев С. В. Прикладной системный анализ и структурное математическое моделирование. Иркутск : ИрГУПС, 2018. 692 с.
3. Большаков Р. С. Особенности вибрационных состояний транспортных и технологических машин. Динамические реакции и формы взаимодействия элементов. Новосибирск : Наука, 2020. 411 с.
4. Механические цепи в задачах коррекции динамических состояний вибрационных технологических машин / С. В. Елисеев, С. К. Каргапольцев, Р. С. Боль-

шаков, А. В. Елисеев // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24, № 4 (153). С. 718–727.

5. Елисеев С. В., Большаков Р. С., Ситов И. С. О влиянии избыточных связей между элементами на динамические свойства технических объектов // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 2 (46). С. 7–11.

References

1. Eliseev S. V., Eliseev A. V. Theory of oscillations. Structural mathematical modeling in problems of dynamics of technical objects. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2019. 521 p.

2. Eliseev S. V. Applied system analysis and structural mathematical modeling. Irkutsk : ISTU, 2018. 692 p.

3. Bolshakov R. S. Features of vibration states of transport and technological machines. Dynamic reactions and forms of interaction of elements. Novosibirsk : Science, 2020. 411 p.

4. Mechanical chains in the problems of correcting the dynamic conditions of vibration technological machines / S. V. Eliseev, S. K. Kargapol'tsev, R. S. Bolshakov, A. V. Eliseev // Bulletin of the Irkutsk State Technical University. 2020. Vol. 24, № 4 (153). P. 718–727.

5. Eliseev S. V., Bolshakov R. S., Sotov I. S. On the influence of redundant connections between elements on the dynamic properties of technical objects // Systems. Methods. Technology. 2020. № 2 (46). P. 7–11.

© Елисеев С. В., Большаков Р. С.,
Николаев А. В., 2020

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАЧАЛЬНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАЗЦОВ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ ТРИБОПАРЫ

А. С. Калашников, А. Д. Кучеренко, А. В. Гирн, М. С. Руденко, А. Е. Михеев

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

Представлены результаты экспериментальных исследований по влиянию начальной шероховатости контртела в паре трения с образцами из титанового VT-1 и алюминиевого сплава АМг-6 на коэффициент трения.

Ключевые слова: трение, коэффициент трения, шероховатость, зависимость.

THE RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE INITIAL RUGGEDNESS OF THE SAMPLES ON THE FRICTION COEFFICIENT OF THE FRICTION PAIR

A. S. Kalashnikov, A. D. Kucherenko, A. V. Girn, M. S. Rudenko, A. E. Miheev

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

The results of the experimental research on the influence of the initial ruggedness of the counterbody in a pair of friction with titanium VT-1 and aluminum alloy AMg-6 samples on the friction coefficient are presented.

Keywords: friction, friction coefficient, ruggedness, relation.

Современное состояние теории трения и изнашивания не дает конструктору надежных методов расчета сопряженных пар на износ и большинства изнашивающихся деталей на долговечность, на заранее предусматриваемый срок службы [1]. В связи с этим, изучение явления трения и изнашивания является важной задачей.

В нашей работе изучается влияние начальной шероховатости исследуемых образцов на коэффициент трения. Для этого используется специальная установ-

ка трения с парой трения «контртело – образец», в которой контртело (рис. 1, а) принудительно совершает вращательное движение по исследуемому образцу (рис. 1, б), который имеет возможность вращаться свободно. При этом контртело за счет силы трения придает вращательный момент исследуемому образцу. С помощью тензометрического датчика в каждый момент времени фиксировалась сила, которая позволяет образцу оставаться в покое и затем преобразовывалась в коэффициент трения.

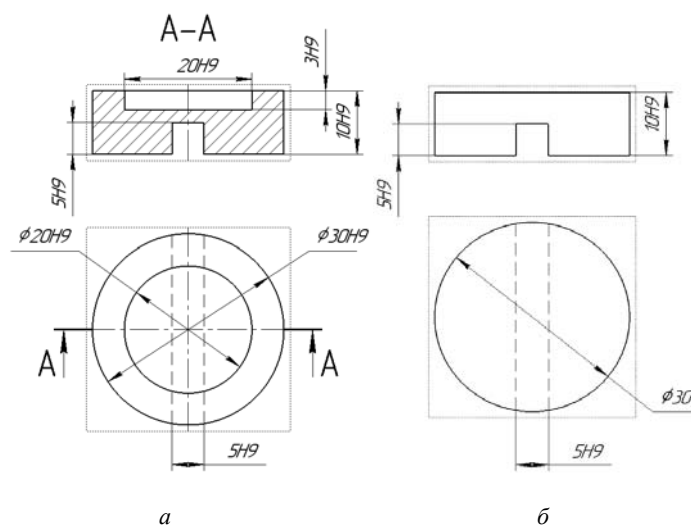


Рис. 1. Пара трения «контртело – образец»: а – контртело; б – образец

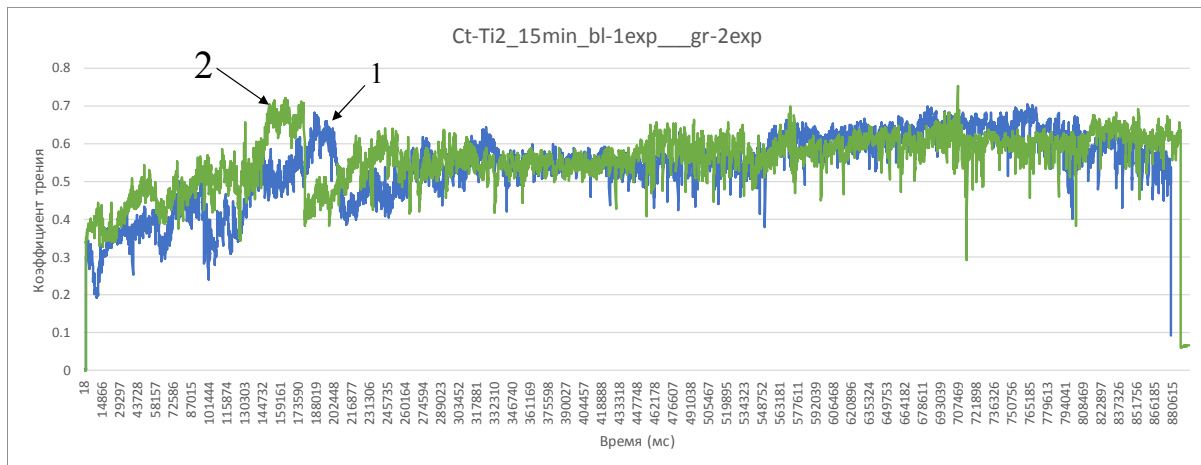


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения пары «контртело – образец ВТ-1» от продолжительности обработки: 1 – шероховатость контртела 0,1 Ra; 2 – шероховатость, контртела 0,83 Ra

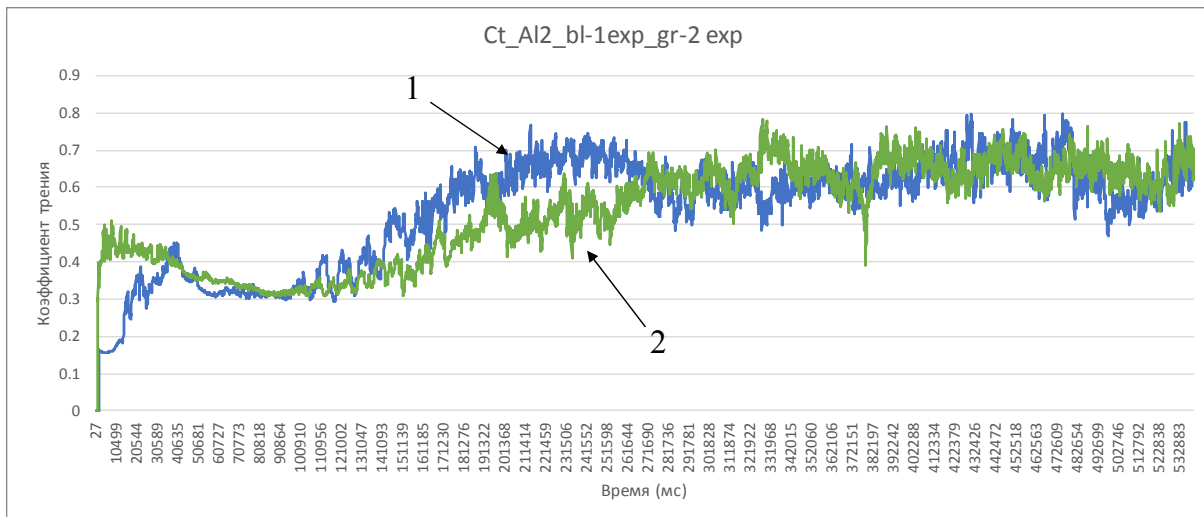


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения пары «контртело – образец АМГ-6» от продолжительности обработки: 1 – шероховатость контртела 0,17 Ra; 2 – шероховатость контртела 0,69 Ra

В качестве материала образцов были выбраны сплав титана ВТ-1 и алюминия АМГ-6.

При исследовании пары трения «контртело – образец ВТ-1» материалом контртела являлась закаленная (65 HRC) сталь У8 с шероховатостью Ra = 0,1 и 0,83 мкм, а шероховатость образцов из титанового сплава составляла Ra 0,24.

Продолжительность обработки составляла 15 минут.

При исследовании пары трения «контртело – образец АМГ-6» материалом контртела являлась закаленная (65 HRC) сталь У8 с шероховатостью Ra = 0,17 и 0,69 мкм, а шероховатость образцов из алюминиевого сплава составляла Ra 0,68. Продолжительность обработки составляла 9 минут.

Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 2 и 3.

Как видно из графиков, шероховатость контртела значительно влияет на коэффициент трения только на начальном этапе процесса трения, что говорит о том,

что при скольжении контактирующих поверхностей в этот период происходит процесс приработки, сопровождающийся изменением микрогеометрии поверхности пары трения [2]. После приработки наступает стационарное состояние трибосистемы, характеризующееся постоянством во времени скорости изнашивания, коэффициента трения, микрогеометрии контакта и т. д. [3].

Также, на графиках присутствуют определённые некорректные значения, которые существенно выбиваются из среднего диапазона, что является следствием несовершенства механической части конструкции.

В дальнейшем планируется:

1. Исследовать влияние других параметров на коэффициент трения, таких как: скорость вращения контртела, сила нормального давления и т. д.
2. Провести более длительные по времени эксперименты для определения границ применимости полученного в результате данной работы выводов.

3. Усовершенствовать конструкцию установки, для ликвидации «шумов» на графиках.

Библиографические ссылки

1. Гаркунов Д. Н. Триботехника : учебник для студентов вузов. 2–3-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1989. 328 с.

2. Трение, изнашивание и смазка : справочник. В 2 кн. / под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. М. : Машиностроение, 1978. Кн. 1. 1978. 400 с.

3. Лебедев В. М., Смирнов Н. А. Работоспособность металлических трибосопряжений узлов трения машин. Красноярск : КПИ, 1990. 140 с.

References

1. Garkunov D. N. Tribotekhnika: uchebnik dlya studentov vtuzov. 2–3 izd., pererab. i dop. M. : Mashinostroenie, 1989. 328 p.: il.

2. Trenie, iznashivanie i smazka: Spravochnik. V 2 kn. / pod red. I. V. Kragel'skogo, V. V. Alisina. M. : Mashinostroenie, 1978. Kn. 1. 1978. 400 p.

3. Lebedev V. M., Smirnov N. A. Rabotosposobnost' metallicheskih tribosopryazhenij uzlov treniya mashin. Krasnoyarsk : KPI, 1990. 140 p.

© Калашников А. С., Кучеренко А. Д., Гирн А. В., Руденко М. С., Михеев А. Е., 2020

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ МЕТОДОМ ВОЛОЧЕНИЯ

А. А. Калмыков

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

В работе приведена характеристика метода изготовления тонкостенных труб волочением. Рассмотрены их достоинства и недостатки.

Ключевые слова: волочение, труба, станок, сечение, точность, метод.

PRODUCTION OF THIN WALLED PIPES BY DRAWING METHOD

A. A. Kalmykov

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

The paper describes the method of manufacturing thin-walled pipes by drawing. Their advantages and disadvantages are considered.

Keywords: lug, tube, machine, cross-section, the accuracy of the method, roughness.

Обоснование метрологического и нормативно-технического обеспечения процесса изготовления тонкостенных труб малого сечения волочением удовлетворять требованиям нормативной документации.

Повышение качества изготовления тонкостенных труб волочением с обеспечением точности и качества поверхности. Тонкостенные трубы применяются в приборостроении, машиностроении, для изготовления линий передач энергии антенно-фидерных устройств.

Суть метода заключается в увеличении обжатия протягиваемых труб за счет установки в волокодержатель волочильного стана одновременно четырех волочильных колец, за счет чего увеличивается коэффициент вытяжки за один проход волочения, а так же снижается коэффициент проходимости, снижается цикличность производства, появляется возможность унификации оптимального размера применяемой заготовки [1–2].

Способ изготовления труб и устройство, для его осуществления включают холодную прокатку трубной заготовки, в рабочей клетки прокатного стана. Круглую трубку устанавливают на устройство, зажимают между 4-мя роликами, 2 ролика расположены по бокам, а 2 ролика по высоте трубы, совершающей возвратно-поступательное перемещение, подачу и поворот трубной заготовки в обоих направлениях на одинаковую величину. Сделанные после волочения трубы, можно использовать в авиации, гражданской промышленности, а также в ракетостроении. В жидкостных ракетных двигателях топливо и окислитель находятся в жидком состоянии в двух отдельных резервуарах. По трубопроводам, которые мы создали с помощью волочения, они попадают в камеру сгорания. Здесь они перемешиваются и сгорают, создавая

поток горячих газов с высокой скоростью и давлением. Эти газы проходят через сопло, которое еще больше их ускоряет, а после выходят, образуя реактивную тягу [3–4].

Показатели деформации металла при волочении. Главной характеристикой деформации металла при волочении служит показатель вытяжки (или просто вытяжка):

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} = \frac{F_0}{F_1}, \quad (1)$$

где l_0 , F_0 , l_1 , F_1 – длина и площадь поперечного сечения до и после прокатки. Для круглой трубы очевидны соотношения:

$$\lambda = \frac{D_0^2 - d_0^2}{D_1^2 - d_1^2} = \frac{D_0^2 - (D_0 - S_0)^2}{D_1^2 - (D_1 - S_1)^2}, \quad (2)$$

где D_0 , d_0 , S_0 и D_1 , d_1 , S_1 – соответственно наружный и внутренний диаметры и толщина стенки трубы до и после волочения

Напряжения при волочении. Часто в расчетах предел текучести при волочении принимают величиной постоянной по всему очагу деформации и равной среднему значению

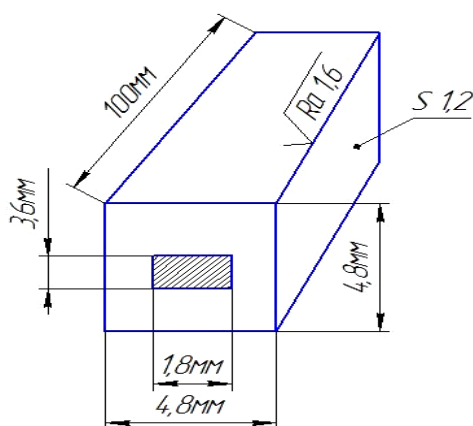
$$\sigma_{\text{тср}} = 0,5(\sigma_{\text{т0}} + \sigma_{\text{т1}}), \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{т0}}$ и $\sigma_{\text{т1}}$ – пределы текучести до и после волочения.

В процессе работы, волочением подвергается труба из меди (см. рисунок) с такими характеристиками ($3,6 \times 1,8$; $4,8 \times 4,8$ мм); толщина стенки 0,6–1,2 мм; $R_a = 0,2$ –0,16 мм; точность = 0,015 мм, длина 100 мм. Технологические условия метода волочения, указаны в (см. таблицу).

Технологические условия процесса волочения

Параметр	Значение
Достижимая шероховатость	0,2–0,16 мм
Точность	0,015 мм
смазка	мыльный порошок
время	3–5 мин
скорость	до 25–30 м/с
температура	250–350 °С



Труба из меди.

Достоинства волочения:

1. Высокая производительность.
2. Точная и чистая поверхность (не нуждается в механической обработке).
3. Не требуется нагрев.

4. Метод подвергается автоматизации.

Недостатки волочения:

1. Высокая стоимость волоки.
2. Необходимость термообработки [5].

Метод выгоден для крупносерийного производства заготовок, само производство обладает высокой

конкурентоспособностью. Волочение необходимая технология для машиностроения, которая облегчает подбор трубчатых изделий.

Библиографические ссылки

1. Хачин В. Н., Пушин В. Г., Кондратьев В. В. Структура и свойства волочения. 1992, 160 с.
2. Перлин И. Л. Теория волочения. 1971. 448 с.
3. Ерманок М. З., Ватрушин Л. С. Волочение легких сплавов. 1998. 211 с.
4. Воронин И. А. Разработка и анализ процесса волочения труб через два последовательно установленных волочильных кольца. 2015. 79 с.
5. Шаталов В. К., Гаврилин В. А., Карабахин В. Г. Волочение : метод. указания / Москов. гос. технич. ун-т им. Н. Э. Баумана. М., 2011.

References

1. Khachin V. N., Pushin V. G., Kondratyev V. V. *Struktura i svojstva volocheniya* [Structure and properties dragging]. 1992. 160 p.
2. Perlin I. L. *Teoriya volocheniya* [Drawing Theory]. 1971. 448 p.
3. Ermanok M. Z., Vatrushin L. S. *Volochenie legkih splavov* [Drawing of light alloys]. 1998. 211 p.
4. Voronin I. A. *Razrabotka i analiz processa volocheniya trub cherez dva posledovatel'no ustanovlennyh volochil'nyh kol'ca* [Development and analysis of the process of drawing pipes through two successively installed drawing rings]. 2015. 79 p.
5. Shatalov V. K., Gavrilin V. A., Karabakhin V. G. *Volochenie metodicheskie ukazaniya N.E.Bauman* [Moscow State Technical University named after. Methodical instructions] / Moskovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet imeni. M., 2011.

© Калмыков А. А., 2020

УДК 621.924.079

ПРОБЛЕМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

С. В. Леванович, Л. В. Зверинцева

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

Представлен анализ загрязнений корпусных деталей внутреннего сгорания и особенности их восстановления в процессе длительной эксплуатации. Цель – разработать в дальнейшем эффективную технологию их восстановления.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, износ и загрязнения деталей, технологический процесс восстановления.

PROBLEMS OF RESTORATION OF BODY PARTS OF AUTOMOBILE INTERNAL COMBUSTION ENGINES

S. V. Levanovich, L. V. Zverintseva

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

The article presents the analysis of contamination of internal combustion body parts and the features of their recovery during long-term operation. The goal is to develop in the future an effective technology for their recovery.

Keywords: internal combustion engine, wear and contamination of parts, restoration process.

Конкурентоспособность автомобильной техники напрямую зависит от срока службы двигателей внутреннего сгорания (ДВС). От качества их изготовления и обслуживания зависят надежность, экономичность, минимизация негативных экологических последствий эксплуатации.

Наиболее сложными узлами ДВС с точки зрения изготовления и материалоемкости являются корпусные изделия. Для них, как и для других деталей двигателя, наряду с требованиями точности не менее важными являются требование промышленной чистоты. Образование загрязнений на рабочих поверхностях в процессе изготовления и эксплуатации приводит к ускоренному износу пар трения, засорению масляных каналов и, как следствие, к снижению и в итоге потере работоспособности. Развитие конструкций автомобильного транспорта происходит при постоянном стремлении к увеличению производительности, что почти всегда сопровождается повышением механической и тепловой нагруженности подвижных сопряжений деталей [1].

При этом ставятся задачи достижения высокой надежности и долговечности машины сокращения расхода топлива и дефицитных материалов. Чем дольше каждая составляющая машины находится в работоспособном состоянии, тем экономичнее использование машины в целом. Основной составляющей транспортной техники, от которой зависит эффективность ее использования является силовая установка, а это, как правило, двигатели внутреннего сгорания различ-

ного типа и назначения, главная функция которых эффективное преобразование химической энергии топлива в механическую работу [2]. В двигателестроении, наряду с комплексным улучшением эколого-экономических показателей всех типов ДВС, увеличивается удельная мощность, надежность, срок службы [3].

Одним из возможных путей увеличения срока службы ДВС является применение современных технологий на всех этапах их изготовления и восстановления. Практика эксплуатации машин и оборудования подтверждает, что наиболее распространенной причиной выхода из строя в 80 случаях из 100 является не поломка, а износ и повреждение рабочих поверхностей [4]. Восстановление изношенных и поврежденных рабочих поверхностей является технически и экономически целесообразным. Отказ от восстановления изношенных и поврежденных деталей ДВС и переход к замене вышедшей из строя детали или агрегата, оказывает негативное влияние на себестоимость эксплуатации ДВС. Технологии восстановления деталей машин позволяют качественно восстановить, а иногда и превысить значения начальных эксплуатационных параметров.

При изготовлении отливки блока цилиндров (БЦ) возникают внутренние силовые напряжения, которые вызывают изменение геометрической формы и расположения рабочих поверхностей и, в конечном итоге, могут привести к возникновению трещин и разрушению изделия. Искусственное старение и механическая

обработка их полностью не снимают. В начале работы сохраняющиеся внутренние напряжения из-за изменения формы и расположения поверхностей приводят к повышенному износу и преждевременному отказу [5].

Технологический процесс изготовления деталей и их восстановления имеют определенные отличия. При восстановлении изношенных отверстий могут использоваться операции железнения, установки дополнительной ремонтной детали и др. В основном производстве изготовления эти операции отсутствуют. Одной из таких операций ремонтного производства является очистка от различных видов загрязнений.

В связи с тем, что ТП восстановления деталей ДВС содержит формообразующие операции, совпадающие с ТП их основного производства, в дальнейшем будем рассматривать ТП восстановления.

Поступающий в ремонт ДВС имеет специфические загрязнения, возникающие при эксплуатации. Различные загрязнения в трущихся сопряжениях при повторной сборке вызывает их интенсивное изнашивание.

Анализ основных моечно-очистных процессов ремонтного производства показывает их высокую энергоемкость. Для удаления наиболее распространенных загрязнений расходуется энергия, кДж/м² (кВт·ч/м²), указанная в таблице.

Расход энергии

Основные загрязнения	Энергоемкость
Дорожно-почвенные отложения	3600(1)
Масляно-грязевые отложения	7200(2)
Асфальто-смолистые отложения	10800(3)
Старая краска	14400(4)
Нагар	36000(10)

Наличие загрязнений на деталях, подлежащих окраске или покрытию гальваническими и химическими способами, приводит к нарушению процесса нанесения покрытий. При дальнейшей эксплуатации это вызывает отслоение покрытий и потери их защитных и декоративных свойств. Загрязнение на деталях, восстанавливаемых наплавкой, выбивают образование в наплавленном металле пор и раковин.

Решение проблемы повышения качества восстановления автомобилей и их составных частей заключается в совершенствовании технологии и оборудования моечно-очистных работ.

Библиографические ссылки

1. Макарова Е. И. Комплексная технология очистки поверхностей и утилизации отходов [Электронный ресурс]. URL: <http://rostransport.com/transportrf/pdf/12/36-40> (дата обращения: 09.09.2020).
2. Левтеров А. М. Основы методологии исследования и проектирования транспортных ДВС, работающих на альтернативных топливах [Электронный ресурс]. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/153> (дата обращения: 09.09.2020).
3. Белогуб А. В. Особенности механического нагружения и учета ресурсной прочности тонкостенного поршня бензинового ДВС [Электронный ресурс]. URL: <http://nti.khai.edu:57772/csp/nauchportal/Arhiv/AKTT/2013/AKTT913/Pilev> (дата обращения: 09.09.2020).
4. Гаркунов Д. Н. Триботехника. Конструирование, изготовление и эксплуатация машин [Электронный ресурс]. URL: http://www.studmed.ru/garkunov-dn-tribotekhnika-konstruirovaniye-izgotovlenie-i-ekspluatatsiya-mashin_777ac7c90d6.html (дата обращения: 09.09.2020).
5. Карагодин В. И., Митрохин Н. Н. Ремонт автомобилей и двигателей М. : Академия, 2007. С. 496.

References

1. Makarova E. I. Kompleksnaya tekhnologiya ochkistki poverkhnostey i utilizatsii otkhodov [Elektronnyy resurs]. URL: <http://rostransport.com/transportrf/pdf/12/36-40> (data obrashcheniya: 09.09.2020).
2. Levterov A. M. Osnovy metodologii issledovaniya i proyektirovaniya transportnykh DVS, rabotayushchikh na al'ternativnykh toplivakh [Elektronnyy resurs]. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/153> (data obrashcheniya: 09.09.2020).
3. Belogub A. V. Osobennosti mekhanicheskogo nagruzheniya i ucheta resursnoy prochnosti tonkostennogo porshnya benzinovogo DVS [Elektronnyy resurs]. URL: <http://nti.khai.edu:57772/csp/nauchportal/Arhiv/AKTT/2013/AKTT913/Pilev> (data obrashcheniya: 09.09.2020).
4. Garkunov D. N. Tribotekhnika. Konstruirovaniye, izgotovleniye i ekspluatatsiya mashin [Elektronnyy resurs]. URL: http://www.studmed.ru/garkunov-dn-tribotekhnika-konstruirovaniye-izgotovlenie-i-ekspluatatsiya-mashin_777ac7c90d6.html (data obrashcheniya: 09.09.2020).
5. Karagodin V. I., Mitrokhin N. N. Remont avtomobiley i dvigateley M. : Akademiya, 2007. S. 496.

© Леванович С. В., Зверинцева Л. В., 2020

УТОЧНЕННАЯ СХЕМА КОНТАКТА ЕДИНИЧНОГО ЗЕРНА ПРИ ОБРАБОТКЕ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ ВЫСОКОВЯЗКОЙ СРЕДОЙ

В. А. Левко*, О. В. Литовка, Д. И. Савин

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

*E-mail: levko@sibsau.ru

Для повышения производительности финишной обработки деталей летательных аппаратов предложена обработка абразивным потоком высоковязкой рабочей средой. Для этого уточнена модель удаления материала единичным абразивным зерном. В ней абразивное зерно описано как многолезвийный инструмент, воздействующий на обрабатываемую поверхность, как по фактической площади контакта, так и по контурной.

Ключевые слова: обработка абразивным потоком, высоковязкая среда, контактное взаимодействие, абразивное зерно.

REFINED DIAGRAM OF SINGLE GRAIN CONTACT FOR ABRASIVE FLOW MACHINING BY HIGH-VISCOSITY MEDIUM

V. A. Levko*, O. V. Litovka, D. I. Savin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: levko@sibsau.ru

To increase the productivity of finishing processing of aircraft parts, it is proposed process to abrasive flow machining with a high-viscosity working medium. For this, the model of material removal by a single abrasive grain has been refined. It describes the abrasive grain as a multi-edge tool that acts on the surface to be machined, both in terms of the actual contact area and the contour area.

Keywords: abrasive flow machining, high viscosity medium, contact interactions, abrasive grain.

Введение. Мировой опыт проектирования и производства ракетно-космической техники показывает, что одной из наиболее трудоемких, неконтролируемых областей в изготовлении сложных деталей являются операции финишной обработки. Их доля может достигать до 15 % от общего объема затрат на производство. Одним из представителей нетрадиционных методов финишной обработки является обработка абразивным потоком (*abrasive flow machining*), которая в России имеет названия абразивно-экструзионная обработка или экструзионное хонингование. Повышение производительности этого вида обработки возможно за счет анализа контактных взаимодействий между абразивным зерном и микронеровностями обрабатываемой поверхности.

Аналізу таких взаимодействий посвящен ряд работ. Установлено, основным механизмом удаления материала при обработке абразивным потоком являются трение и пластическое оттеснение [1]. Следует отметить, что этот результат выявлен для обработки абразивным потоком деталей средой низкой и средней вязкости. Давление экструзии при этом варьировалось в диапазоне от 2 МПа до 8 МПа.

Установлено, что пластичность и твердость обрабатываемой детали оказывают большое влияние на процесс обработки абразивным потоком. Рабочая среда должна характеризоваться вязкоупругими свойст-

вами с очень высоким коэффициентом восстановления. Более высокая вязкость среды увеличивает закрепленность абразивных частиц в полимерной основе среды, что положительно влияет на производительность обработки [2]. Однако приведенные в данной работе зависимости производительности съема материала и шероховатости поверхности носят эмпирический характер либо основаны на формальной интерпретации геометрических характеристик абразивных зерен и микронеровностей обрабатываемой поверхности.

На основе опыта предыдущих разработок была предложена схема расчетной модели удаления материала единичным абразивным зерном (рис. 1) [3].

Единичное зерно вступает в контакт с неровностью заготовки под действием нормальной F_n и тангенциальной F_t составляющих сил резания, возникающих при деформации абразивного потока со скоростью v . Под действием нормальной составляющей F_n абразивное зерно внедряется в деталь на глубину h , образуя вмятину длиной d_0 . Размер вмятины также зависит от радиуса вершины кромки зерна λ и максимального угла θ между двумя линиями, соединяющих нижнюю точку вмятины и две точки на верхней кромке вмятины. В начальное время $t = t_0$ происходит контакт выступа зерна и неровности детали с проявлением момента сил M . За счет F_t абразивное

зерно перемещается в направлении потока среды. Длина контакта определяется как производная скорости абразивного зерна по времени dt [3].

Для анализа контактных взаимодействий при обработке абразивным потоком деталей высоковязкой средой схема, показанная на рис. 1 требует уточнения. Это уточнение связано с масштабным коэффициентом, учитывающим то, что контакт «микронеровность заготовки – абразивное зерно» происходит как на уровне абразивного зерна в целом, так и ее отдельных микровыступов. При этом эти микровыступы являются отдельными режущими кромками.

При контакте единичного абразивного зерна с микровыступами поверхности детали образуется контурная площадь касания A_c . На этой площади возникает контурное давление равное отношению силы, действующей на контактирующие тела, к контурной площади касания $p_c = N / A_c$. Масштабный коэффициент абразивного зерна и шероховатости поверхности (рис. 2) в сравнении показывает, что из-за сравнительно больших размеров абразивное зерно одновременно находится в контакте с целым рядом микронеровностей [4].

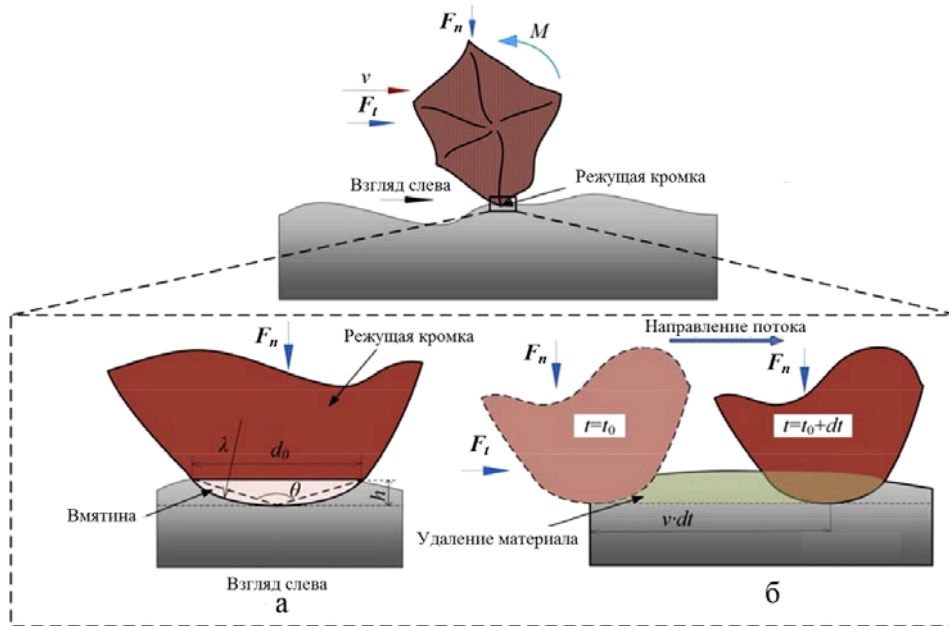


Рис. 1. Принципиальная схема модели удаления материала единичным абразивным зерном: а – вдавливание в заготовку под действием нормальной составляющей силы резания (F_n); б – удаление материала единичным абразивным зерном [3]

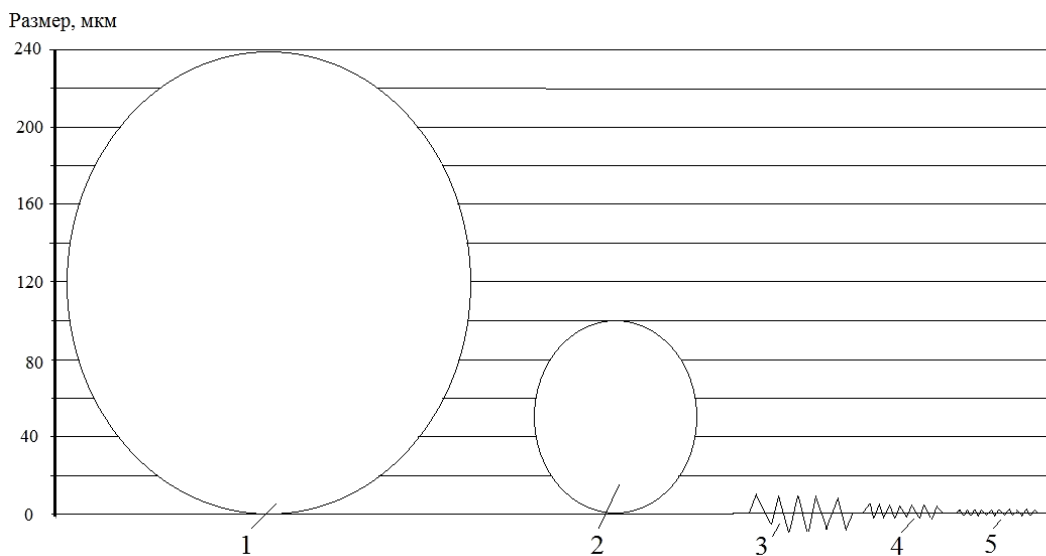


Рис. 2. Масштабный коэффициент абразивного зерна и шероховатости поверхности: 1 – зерно размером 240 мкм; 2 – зерно размером 100 мкм; 3 – шероховатость $Ra = 10$ мкм; 4 – шероховатость $Ra = 5$ мкм; 5 – шероховатость $Ra = 2,5$ мкм [4]

При этом на каждой микронеровности образуется элементарная фактическая площадь касания A_{r_i} . Суммарная площадь контактных зон микронеровностей абразивного зерна и обрабатываемой поверхности образует фактическую площадь касания [5].

Абразивное зерно в пределах контурной площади касания воздействует на все единичные микронеровности обрабатываемой поверхности в целом, а также на каждую единичную микронеровность отдельным выступом, представляющим собой режущую кромку. Угол таких кромок зависит от вида и величины абразивного зерна.

В рассмотренной выше принципиальной схеме модели удаления материала единичным абразивным зерном (рис. 2), зерно в контакте имеет одну режущую кромку. В действительности абразивное зерно представляет собой многолезвийный инструмент, воздействующий на обрабатываемую поверхность как по фактической площади контакта (режущими кромками), так и по контурной площади контакта (зерно в целом) [4].

Таким образом, единичное абразивное зерно при обработке абразивным потоком представляет собой многогранный керамический инструмент. При его контакте с микронеровностями обрабатываемой поверхности могут возникать различные виды контакта. Вид контакта зависит от твердости и шероховатости обрабатываемой поверхности и абразивного зерна. Как правило, на уровне микровыступов зерна происходят микрорезание и пластическое отгеснение, а на уровне абразивного зерна – упругая и пластическая деформации.

В процессе контакта абразивные зерна могут раскрашиваться, а их режущие кромки затупляться. Это предположение подтверждено экспериментально при исследовании износа абразивных сред и его влияния на результаты обработки абразивным потоком [6]. Скалывание граней абразивного зерна обеспечивает эффект самозатачивания.

Библиографические ссылки

1. Gorana V. K., Jain V. K., Lal G. K. Experimental investigation into cutting forces and active grain density during abrasive flow machining // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2004. Vol. 44, iss. 2–3. P. 201–211.
2. Petare A. C., Jain N. K. A critical review of past research and advances in abrasive flow finishing process // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 97, iss. 1. P. 741–782.

3. Wei Haibo, Peng Can, Gao Hang, Xuanping, Xuyue Wang. On establishment and validation of a new predictive model for material removal in abrasiveflow machining // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2019. Vol. 138. P. 66–79.

4. Левко В. А., Савин Д. И., Литовка О. В. Контактные взаимодействия при обработке абразивным потоком средой высокой вязкости заготовок из сплавов порошкового молибдена // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24, № 1. С. 36–51.

5. Левко В. А. Контактные процессы при абразивно-экструзионной обработке // *Металлообработка*. 2008. № 3. С. 19–23.

6. Wear of abrasive media and its effect on abrasive flow machining results / T. Bremerstein, A. Potthoff, A. Michaelis et al. // *Wear*. 2015. Vol. 342–343. P. 44–51.

References

1. Gorana V. K., Jain V. K., Lal G. K. Experimental investigation into cutting forces and active grain density during abrasive flow machining // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2004. Vol. 44, iss. 2–3. P. 201–211.
2. Petare A. C., Jain N. K. A critical review of past research and advances in abrasive flow finishing process // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 97, iss. 1. P. 741–782.
3. Wei Haibo, Peng Can, Gao Hang, Xuanping, Xuyue Wang. On establishment and validation of a new predictive model for material removal in abrasiveflow machining // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2019. Vol. 138. P. 66–79.
4. Levko V. A., Savin D. I., Litovka O. V. Contact interactions in abrasive flow machining by high viscosity media of workpieces from powder molybdenum alloys // *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020. № 24(1). P. 36–51 (In Russ.).
5. Levko V. A. [Contact processes under abrasive flow machining processes] // *Metalloobrabotka*. 2008. № 3. P. 19–23 (In Russ.).
6. Wear of abrasive media and its effect on abrasive flow machining results / T. Bremerstein, A. Potthoff, A. Michaelis et al. // *Wear*. 2015. Vol. 342–343. P. 44–51.

© Левко В. А., Литовка О. В., Савин Д. И., 2020

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОТЯЖЁННЫХ ВОЛНОВОДНО-РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

М. М. Михнёв^{1*}, И. В. Кудрявцев², П. Н. Сильченко²

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

²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
*E-mail: 'mix@iss-reshetnev.ru'

При сборке пайкой ВРС угловые и линейные смещения в местах соединения отдельных элементов приводят к нарушению всей общей геометрии конструкции, что приводит к изменению координат расположения начальной и конечной точек крепления ВРС.

Ключевые слова: волноводно-распределительная система, технология изготовления, пайка, точность, прочность, жёсткость, паяный шов, монтажные точки.

TECHNOLOGICAL ISSUE OF MANUFACTURING EXTENDED WAVEGUIDE DISTRIBUTION SYSTEMS FOR SPACECRAFT

M. M. Mikhnev¹, I. V. Kudryavtsev², P. N. Silchenko^{2*}

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

²Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
*E-mail: Psilchenko@sfu-kras.ru

During the assembling waveguide distribution systems through soldering, displacements at the joints of the elements distort the general geometry of the structure, which leads to a change in the coordinates of the location of the starting, intermediate and ending points of attachment with rigidity and structural failure.

Keywords: waveguide distribution system, manufacturing technology, soldering, accuracy, strength, rigidity, soldered seam, mounting points.

Введение. При изготовлении протяженной тонкостенной волноводно-распределительной системы (ВРС) пайкой каждый отдельный элемент и ВРС в целом подвергаются тепловому воздействию, что вызывает в локальных областях температурные напряжения и деформации, которые могут стать причиной необратимых местных прогибов и искажения геометрии поперечного сечения конструкции.

Предлагается для изготовления ВРС обосновать все процессы, действия, технологические параметры и режимы то возможные нарушения прочностных, жесткостных и точностных параметров минимизируются и даже исключаются в зависимости от того какие требования по точности будут заложены в расчёты.

В глобальной постановке НДС протяжённой ВРС рассматривается как стержневая модель, и выделяются критические локальные области с максимальными напряжениями, и производится их уточнённый расчёт как тонкостенной оболочечной конструкции.

Такой подход позволяет оценивать напряженно-деформированное состояние и оперативно определять в процессе изготовления или монтажа отдельных участков или ВРС в целом напряжения и деформации

любой исследуемой локальной области с требуемой точностью.

Исследованы изменения зазоров между тонкостенными элементами в процессе их пайки с анализом НДС монтажного паяного шва. Полученные с помощью предлагаемой методики результаты обеспечивают требуемое качество на всей технологической цепочке изготовления любого участка или всей протяженной ВРС для космического аппарата.

При моделировании геометрии элементов ВРС требуется использование теории пластин и оболочек [1–3] Однако образующий прямоугольное поперечное сечение контур невозможно описать одной непрерывной функцией радиуса кривизны R_1 или R_2 (рис. 1), как того требует классическая теория оболочек, из-за наличия особых точек, в которых описывающая функция имеет разрывы. Расчет оболочечной конструкции с такой сложной формой поперечного сечения проводят путем ее разбиения на несколько отдельных элементов более простой формы.

Методы расчёта в теории тонкостенных стержней, созданные на основе фундаментальных работ. Упрощением этих методов расчета является «полусдвиго-

вая теория» В. И. Сливкера [4], позволяющая рассчитывать НДС тонкостенных стержней открытого и закрытого профиля, которые является частным случаем некоторых отдельных элементов протяженных конструкций ВРС.

Одним из выходов в рассматриваемом случае может являться моделирование и расчет тонкостенных протяженных пространственных конструкций ВРС по теории оболочек [14], которая позволяет учитывать такие особенности НДС как деформация сечения, прогибы стенок тонкостенных элементов и др. Использование теории оболочек возможно если для исследуемой конструкции выполняется так называемое условие «тонкостенности»: $h/R_{\min} < 1$, где h – толщина стенки оболочки (рис. 1, б), R_{\min} – минимальный радиус кривизны срединной поверхности оболочки, либо ее характерный размер по срединной поверхности (размер $h/2$ на рис. 1, б). Для тонкостенных элементов конструкций ВРС это условие (3) выполняется, следовательно, с учетом гипотез Кирхгофа–Лява для рассматриваемого элемента можно использовать уравнения теории оболочек в виде [1]. Но такую систему линейных дифференциальных уравнений составить и решить будет невозможно [5; 6].

Предложено на первом этапе ВРС в глобальной постановке моделировать пространственной стержневой конструкцией (рис. 2) с эквивалентными условиями нагружения и закрепления. Муфтами и фланцами можно пренебречь ввиду их незначительной протяженности и рассматривать поперечное сечение стержневой модели ВРС неизменным по форме и размеру (рис. 2). При использовании стержневой модели можно рассчитывать стержневые системы практически любой геометрической сложности и конфигурации, разбивая их на требуемое число элементов. Решение задач в такой постановке можно выполнять как аналитическими, так и численными методами. На рис. 2, б видны области с максимальными напряжениями.

Для выделенного локального участка необходимо приложить соответствующие граничные условия по ее краям, полученные на этапе расчета стержневой модели (рис. 2, б).

Все элементы ВРС в процессе сборки пайкой из отдельных участков подвергаются воздействию температурных, силовых и деформационных нагрузок. Это приводит к образованию неконтролируемых случайных технологических погрешностей изготовления, которые нарушают расчетную геометрию всего участка и при его монтаже требуют приложения дополнительных усилий для совмещения точек крепления, что в конечном итоге может нарушать условия локальной и глобальной прочности.

Следовательно, на каждом этапе изготовления необходимо производить теоретические расчеты [7–9] и вносить соответствующие изменения в технологический процесс настройки при изготовлении отдельных участков и всей ВРС в целом для получения минимально допустимых значений отклонений, обеспечивающих локальную и глобальную прочность в любой (см. рис. 2, б).

На рис. 1, а представлен пример участка волново-водно-распределительной системы, состоящего из блоков I, II, III, VI и V, которые содержат все основные элементы.

Вся конструкция участка разбивается на блоки I, II, III, VI и V, которые собираются пайкой и в каждом из паяных соединений возникают соответствующие погрешности, которые в итоге при векторном суммировании образуют вектор суммарных накопленных отклонений в конце соответствующего блока ($\{W_I^k\}, \{W_{II}^k\}, \{W_{III}^k\}, \{W_{IV}^k\}, \{W_V^k\}$ на рис. 3, а).

Этот вектор (например, $\{W_{II}^k\}$) складывается из отклонений размеров элементов при их изготовлении, погрешностей установки этих элементов для пайки, случайных неконтролируемых смещений, вызванных действием сил электромагнитного поля индуктора на элементы в процессе пайки и других внешних случайных факторов (температура окружающей среды, температура и давление охлаждающей жидкости в индукторе, величина и точность зазоров между элементами и индуктором и др.).

Для этого же блока II, согласно проектной документации, который состоит из двух прямых и двух изогнутых элементов, пяти соединительных муфт, после сборки пайкой его геометрия уже будет отличаться от проектной, то есть иметь в зонах пайки между каждым элементом соответствующие отклонения вследствие вышеуказанных погрешностей.

Если после окончательного изготовления участка из отдельных блоков (I, II, III, VI и V) одну его сторону оставить закрепленной в точке A (рис. 3, а), то под действием всех вышеуказанных факторов, вторая сторона участка окажется в некоторой точке G , отстоящей от расчетной точки F на величину вектора суммарных накопленных отклонений участка, $\overline{\Delta W_F}$, который в локальной системе координат $\alpha\beta z$ последнего элемента участка (рис. 3, б) образуют компоненты линейных и угловых отклонений:

$$\{\Delta W_F\} = [\delta_\alpha \quad \delta_\beta \quad \delta_z \quad \Delta\phi_\alpha \quad \Delta\phi_\beta \quad \Delta\phi_z].$$

Здесь $\delta_\alpha, \delta_\beta, \delta_z$ – компоненты линейных отклонений вдоль осей; $\Delta\phi_\alpha, \Delta\phi_\beta, \Delta\phi_z$ – три угловых отклонения вокруг этих осей.

При монтаже участка ВРС состоящего из блоков I, II, III, VI и V, собранных в единую конструкцию, после закрепления его в точке A , необходимо принудительно совместить точку G с точкой F на величину суммарных накопленных отклонений участка $\overline{\Delta W_F}$, что эквивалентно приложению дополнительных внешних силовых и деформационных монтажных воздействий на весь участок и все его элементы.

Очевидно, что вектор суммарного отклонения $\overline{\Delta W_F}$ зависит от величин отклонений каждого паяного соединения элементов участка, а его суммарная величина будет зависеть от всех вышеуказанных факторов и количества элементов, составляющих этот участок.

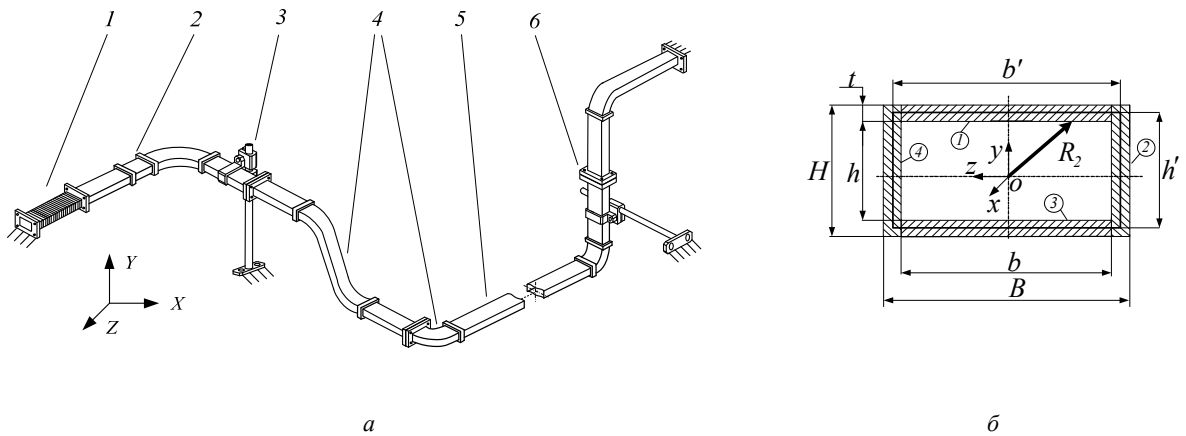


Рис. 1. Участок ВРС (а):
 1 – гибкая секция; 2 – соединительная муфта; 3 – промежуточная опора; 4 – криволинейный элемент; 5 – прямолинейный элемент; б – фланец; б – поперечное сечение

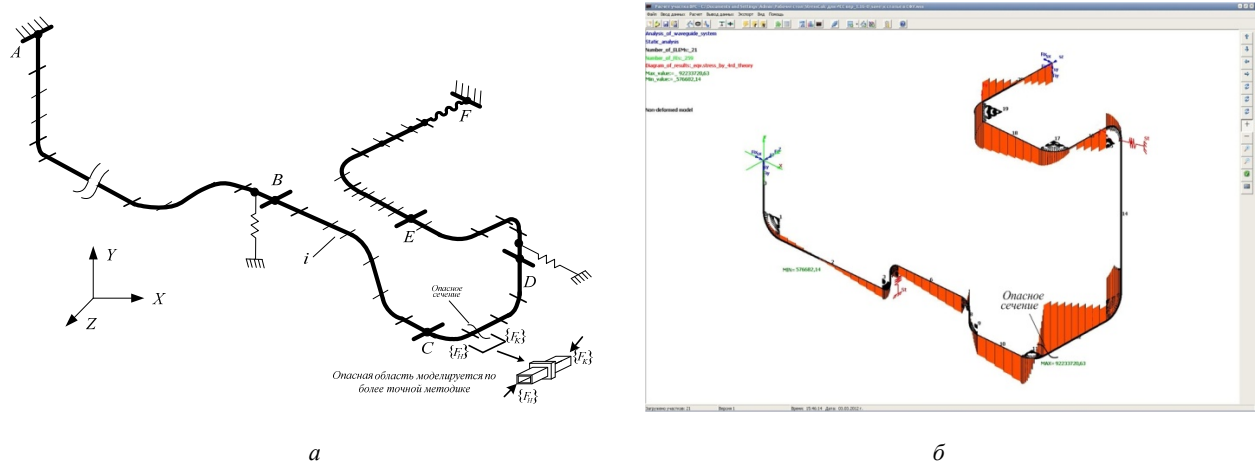


Рис. 2. Расчетная схема и результаты расчёта стержневой модели участка ВРС

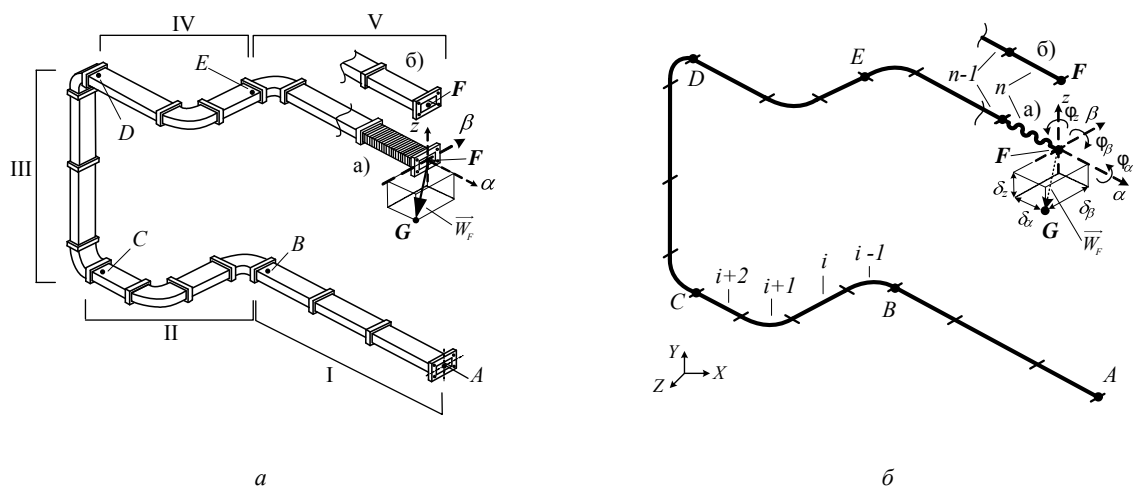


Рис. 3. Пример участка волноводно-распределительной системы:
 а – общий вид участка; б – стержневая модель участка

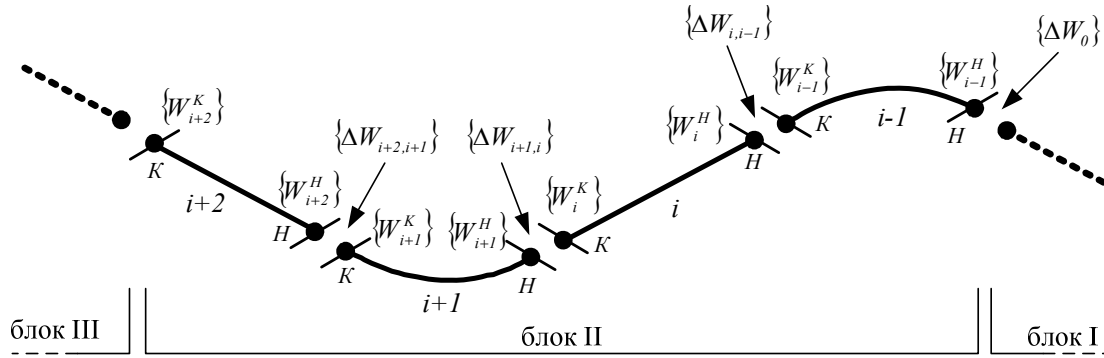


Рис. 4. Схема накопления погрешностей при сборке пайкой в блоке II

Значительные величины вектора отклонений $\overline{\Delta W}_F$ приводят к необходимости приложения больших значений монтажных усилий для принудительного совмещения точек G и F .

Для обеспечения прочности элементов участка необходимо чтобы смещение точки F относительно точки G не приводило к возникновению в любой точке рассматриваемого участка напряжений, превосходящих их допускаемые значения. Следовательно, для проведения подобных расчетов необходимо знать компоненты вектора накопленных отклонений (1) в конечной точке каждого участка. Чтобы их определить, необходимо получить зависимость суммарного вектора (1) от отклонений каждого соединения элементов и их конструктивных особенностей.

Блок может состоять из произвольного количества любых элементов (рис. 4). Рассматриваемый блок в общей постановке представим состоящим из наиболее распространенных типов элементов, в данном случае 4 элемента $i - 1, i, i + 1$ и $i + 2$, каждый из которых имеет свое начало «H» и конец «K».

При соединении n элементов в блоке получим обобщенное выражение для вектора суммарных накопленных отклонений в конце этого блока в виде следующего ряда:

$$W_n^K = \sum_{i=1}^n [A_n][A_{n-1}] \dots [A_{i+1}][A_i] \{ \Delta W_{i-1, i} \}.$$

Матрицы перехода $[A_i]$ зависят от типа элементов и строятся согласно [8].

Ситуация осложняется тем, что в каждом соединении эти виды случайных отклонений сочетаются между собой также в случайном порядке. Если рассматривать отклонение i -го элемента относительно $i-1$ -го элемента, то получается уже два соединения (прямой элемент-муфта и муфта-прямой элемент). Результирующий вектор отклонения для участка ВРС будет иметь многофакторный вероятностный характер, аналитическая формулировка которого будет весьма затруднительна. Для выхода из этой ситуации и практического решения задачи минимизации погрешностей сборки пайкой предлагается блочный подход, при котором сборка участка осуществляется в два этапа. На первом этапе вся конструкция участка разбивается на N отдельных блоков I, II, III, VI и V (рис. 3, а). Точками B, C, D и E обозначены места соединения блоков

между собой, где образуется вектор суммарных накопленных отклонений, который необходимо измерить.

Зависимость, учитывающая все вектора суммарных накопленных отклонений между соединяемыми блоками, аналогично тому, как это было выполнено для блоков I и II, будет иметь вид: $\overline{W}_{\text{рез}} =$

$\sum_{i=1}^N \overline{W}_i + \sum_{i=1}^{N-1} \overline{\Delta W}_{i, i-1}$. Процесс сборки продолжается при соединением (наращиванием) каждого последующего i блока с предыдущим $i-1$, собранным пайкой, с учетом отклонений и последнего N -го блока рассматриваемого участка ВРС.

При сборке пайкой из отдельных блоков рассматриваемого участка его конечная точка F будет смещена в точку G (рис. 1) на величину, определяемую вектором $\{W_F\} = \overline{W}_{\text{рез}}$.

Наиболее простым является вариант (см. рис. 1) с принудительным перемещением точки F в точку G и вектор $\{W_F\}$ будет вектором деформационных нагрузок необходимо обеспечить проверку условия НДС во всех точках ВРС в целом как указано выше.

При невозможности такого решения по результатам расчета варианта исполнения НДС участка волноводно-распределительной системы в целом и ее локальных точках не будет в пределах допустимых значений, то в этом случае необходима установка гибкой секции с соответствующими деформационными параметрами.

Библиографические ссылки

1. Новожилов В. В., Черных К. Ф., Михайловский Е. И. Линейная теория тонких оболочек. СПб. : Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2010. 380 с.
2. Обеспечение прочности и точности крупногабаритных волноводно-распределительных систем космических аппаратов связи / П. Н. Сильченко, М. М. Михнев, И. В. Кудрявцев и др. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012. № 1. С. 112–117.
3. Сравнительная оценка решений системы дифференциальных уравнений в задаче изгиба прямых участков волноводов космических аппаратов связи / И. В. Кудрявцев, П. Н. Сильченко, М. М. Михнев

и др. // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение.

4. Сливкер В. И. Строительная механика. Вариационные основы. М. : АСВ, 2005. 710 с.

5. Polyanin A. D., Nazaikinskii V. E. Handbook of Linear Partial Differential Equations for Engineers and Scientists, Second Edition, CRC Press, Boca Raton–London, 2016. 1632 p.

6. Полянин А. Д., Зайцев В. Ф., Журов А. И. Методы решения нелинейных уравнений математической физики и механики. М. : Физматлит, 2005. 256 с.

7. Особенности расчета на прочность паяных конструкций волноводно-распределительных систем космических аппаратов связи / П. Н. Сильченко, И. В. Кудрявцев, М. М. Михнев и др. // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2008. № 2. С. 53–58.

8. Сильченко П. Н., Кудрявцев И. В., Михнев М. М. Напряженно-деформированное состояние паяных волноводно-распределительных систем космических аппаратов связи // Технология машиностроения. 2006. № 9. С. 53–57.

9. Кудрявцев И. В., Михнев М. М., Сильченко П. Н. Экспресс-анализ прочности волноводно-распределительных систем космических аппаратов на стадии их изготовления // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред им. А. Г. Горшкова : материалы XVI межд. симпозиума. М., 2010.

References

1. Novozhilov V. V., Chernykh K. F., Mikhailovsky E. I. Linear theory of thin shells. SPb. : Publishing house of St. Petersburg University, 2010. 380 p.

2. Providing strength and accuracy of large-sized waveguide distributive systems of space communication / P. N. Silchenko, M. M. Mikhnev, I. V. Kudryavtsev et al.

// Problems of Mechanical Engineering and Reliability of Machinery. 2012. № 1. P. 112–117.

3. Comparative evaluation of solutions of a differential equations system for the issue of bending waveguide straight sections in space communication units / I. V. Kudryavtsev, P. N. Silchenko, M. M. Mikhnev et al. // Proceedings of Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering Series.

4. Slivker V. I. Structural mechanics. Variational foundations. M. : ASV, 2005. 710 p.

5. Polyanin A.D., Nazaikinskii V.E. Handbook of Linear Partial Differential Equations for Engineers and Scientists, Second Edition, CRC Press, Boca Raton – London, 2016. 1632p.

6. Polyanin A. D., Zaitsev V. F., Zhurov A. I. Methods for solving nonlinear equations of mathematical physics and mechanics. M. : Fizmatlit, 2005. 256 p.

7. Strength analysis of soldered structural units of waveguide distributive systems of space communication / P. N. Silchenko I. V. Kudryavtsev, M. M. Mikhnev et al. // Problems of Mechanical Engineering and Automation. 2008. № 2. P. 53–58.

8. Silchenko P. N., Kudryavtsev I. V., Mikhnev M. M. Stress-strain state of soldered waveguide distributive systems of space communication units // Mechanical Engineering Technology. 2006. № 9. P. 53–57.

9. Kudryavtsev I. V., Mikhnev M. M., Silchenko P. N. Rapid strength analysis of waveguide distributive systems of spacecraft at the stage of their manufacture // Dynamic and Technological Issues of Structural and Continuum Mechanics after A. G. Gorshkov : proceedings of the XVI International symposium. M., 2010.

© Михнёв М. М., Кудрявцев И. В.,
Сильченко П. Н., 2020

УДК 621.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ ИНКРЕМЕНТАЛЬНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

И. Н. Петров, В. А. Разживин, Р. И. Лищенко, Е. В. Сычев

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

Исследован процесс формообразования осесимметричной детали – гиперболоидной чаши с переменным углом наклона образующей. Предельные деформации материала при инкрементальном формообразовании оценивались по углу наклона образующей детали в месте разрыва.

Ключевые слова: инкрементальное формообразование, SprutCAM, Vic-3D, предельный угол.

RESEARCH OF THE LIMIT STRAINS DURING INCREMENTAL FORMING OF SHEET METAL

I. N. Petrov, V. A. Razzhivin, R. I. Lishchenko, E. V. Sychev

Samara National Research University
34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation
E-mail: vasia.razzhivin@yandex.ru

In this paper, the process of forming an axisymmetric part – a hyperboloid bowl with a variable angle of inclination of the part is studied. The limit strains of the material during incremental forming were estimated by the angle of inclination of the part at the failure point.

Keywords: incremental forming, SprutCAM, Vic-3D, limit angle.

Введение. Технология инкрементальной штамповки, суть которой заключается в локальном поэтапном деформировании отдельных частей листовой заготовки по заданной программе, позволяет быстро реагировать на изменение производственной программы при значительном снижении трудоемкости подготовки производства и затрат на штамповую оснастку.

Кроме того реализация гибкого подхода к производству изделий на основе инкрементальной штамповки позволяет быстро проводить прототипирование

изделий, что может использоваться и в массовом производстве, например, при разработке концептов, в автомобилестроении, а также в медицине, архитектуре, дизайне и т. д. [1–5].

Методика проведения эксперимента. Исследование деформированного состояния при инкрементальном формообразовании проводилось на специальном стенде, состоящем из промышленного робота KR 160 R1570 nano, рамы для фиксации заготовки и бесконтактной оптической системы измерения деформаций Vic 3D.

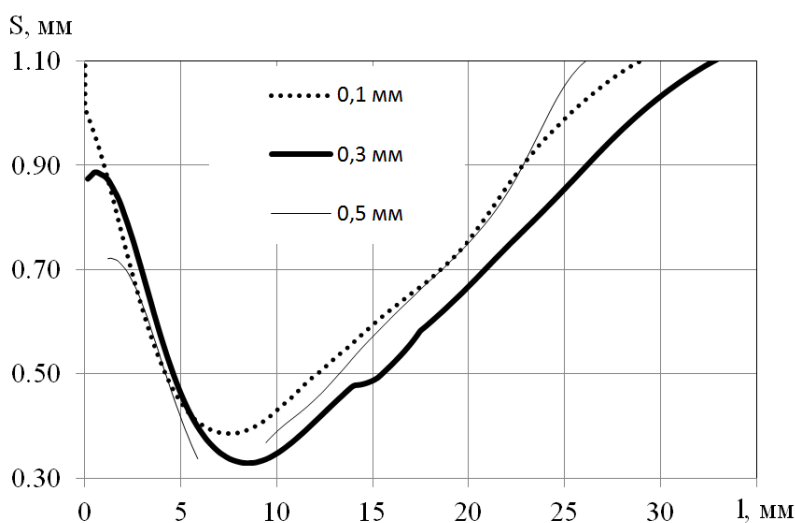


Рис. 1. Распределение толщины стенки детали по образующей

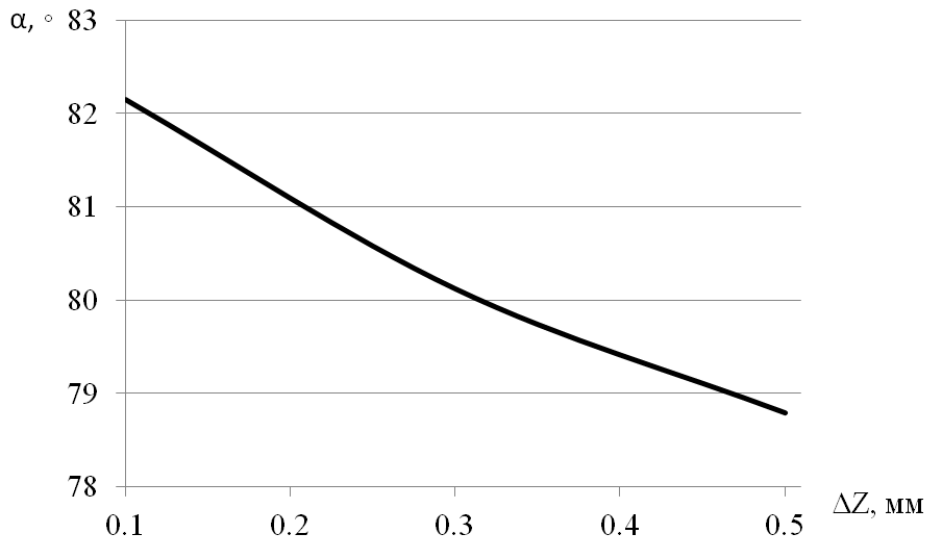


Рис. 2. Зависимость предельного угла инкрементального формообразования от шага смещения пуансона

Рассматривался процесс инкрементального формообразования осесимметричной детали – гиперболоидной чаши с переменным углом наклона образующей. В качестве заготовки использовался стальной лист 08X18H10 толщиной 1,2 мм. Диаметр пуансона – 6 мм. Траектория перемещения пуансона – криволинейная спираль, для построения которой использовалась программа SprutCAM. Эксперимент проводился для трех различных шагов смещения пуансона между соседними витками спирали в осевом направлении (ΔZ): 0,1 мм, 0,3 мм и 0,5 мм. Деформированное состояние определялось бесконтактной оптической системой измерения деформаций Vis 3D.

Результаты и их обсуждение. На рис.1 приведено распределение толщины стенки детали по образующей (от центра к краю), а на рис. 2 зависимость предельного угла инкрементального формообразования от шага смещения пуансона.

Установлено, что влияние шага на предельный угол имеет обратно пропорциональную зависимость: с увеличением шага пуансона угол между образующей и горизонтальной прямой уменьшается.

Заключение. Таким образом, меньшее смещение пуансона при инкрементальном формообразовании обеспечивает более высокие деформационные возможности.

Библиографический список

1. Кривошеин В. А., Анцифиров А. А., Майстров Ю. В. Перспективы использования технологий инкрементальной формовки в современном производстве // Известия высших учебных заведений. 2014. № 11. С. 84–89.
2. Emmens W. C., van den Boogaard A. H. An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming // J Mater Process Technol. 2009. Vol. 209. P. 3688–3695.

3. Kitazawa K., Nakane M. Hemi-ellipsoidal stretch expanding of aluminum sheet by CNC incremental forming process with two path method // Journal of Japan Institute of Light Metals. 1997. Vol. 47. P. 440–445.

4. Jeswiet J., Duflou J. R., Szekeres A. Forces in Single Point and Two Point Incremental Forming // Advanced Materials Research. 2005. Vol. 6–8. P. 449–456.

5. Process optimization and control for incremental forming sheet metal forming / S. Jadhav, R. Goebel, W. Homberg, M. Kleiner // Proceedings of the International Deep Drawing Research Group Conference. 2003. P. 165–171.

References

1. Krivoshein V. A., Antsifirov A. A., Maistrov Yu. V. Prospects for using incremental molding technologies in modern production // Proceedings of higher educational institutions. 2014. № 11. P. 84–89.

2. Emmens W. C., van den Boogaard A. H. An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming // J Mater Process Technol. 2009. Vol. 209. P. 3688–3695.

3. Kitazawa K., Nakane M. Hemi-ellipsoidal stretch expanding of aluminum sheet by CNC incremental forming process with two path method // Journal of Japan Institute of Light Metals. 1997. Vol. 47. P. 440–445.

4. Jeswiet J., Duflou J. R., Szekeres A. Forces in Single Point and Two Point Incremental Forming // Advanced Materials Research. 2005. Vol. 6–8. P. 449–456.

5. Process optimization and control for incremental forming sheet metal forming / S. Jadhav, R. Goebel, W. Homberg, M. Kleiner // Proceedings of the International Deep Drawing Research Group Conference. 2003. P. 165–171.

© Петров И. Н., Разживин В. А.,
Лищенко Р. И., Сычев Е. В., 2020

УДК 658.5

ЭТАПЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА И БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Л. Ю. Русакова

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

Рассмотрены вопросы разработки и внедрения интегрированной системы менеджмента качества, бережливого производства и проектного менеджмента с целью совершенствования управления качеством производства геосинтетических материалов. Также предложены основные этапы построения интегрированной системы.

Ключевые слова: интегрированная система менеджмента, бережливое производство, качество, конкурентоспособность, геосинтетические материалы.

PROJECT STAGES OF INTEGRATED QUALITY MANAGEMENT SYSTEM AND LEAN PRODUCTION OF AGEOSYNTHETIC MATERIALS

L. Yu. Rusakova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

Issues of development and implementation of integrated system of quality management, lean production and design management in order to improve quality management of production of geosynthetic materials are considered. The main stages of the integrated system construction are also proposed.

Keywords: integrated management system, lean production, quality, competitiveness, geosynthetic materials.

Исследование, анализ и систематизация требований международного стандарта ISO 9001:2015 (ГОСТ Р ИСО 9001–2015) показали, что на сегодняшний день наличие и развитие в организации только СМК, уже недостаточно. Возникает целый ряд немаловажных вопросов развития компаний: экологический менеджмент, менеджмент безопасности труда и охраны здоровья, бережливого производства, социальной ответственности, информационной безопасности и т. д.

Внедрять несколько систем менеджмента одновременно довольно сложная задача, которая помимо ресурсов требует в первую очередь системного подхода. В этой связи большую актуальность приобретает разработка и внедрение на предприятии интегрированной системы менеджмента (ИСМ).

В соответствии с ГОСТ Р 56366–2015/IAF MD 11:2013, ИСМ – это единая система менеджмента, обеспечивающая управление многочисленными аспектами организационной деятельности для выполнения требований нескольких стандартов в области менеджмента при данной степени интеграции [1]. Таким образом, ИСМ – это совокупность не менее двух систем менеджмента, которые ориентированы на различные заинтересованные стороны и функционирующие в организации как единое целое.

Важнейшим отличием системы управления качеством от разрозненных и случайных действий в направлении улучшения характеристик продукта или недопущения производственного брака является то,

что работа системы способствует повышению конкурентоспособности организации, гарантии её стабильности и устойчивого развития.

Как правило, создание ИСМ может осуществляться по одному из вариантов:

– создание аддитивных моделей ИСМ, когда к существующей СМК (выполняющей роль базовой системы) последовательно добавляются «необходимые системы менеджмента»;

– создание полностью интегрированных моделей, когда «все системы менеджмента» объединяются в единый комплекс одновременно (рис. 1, 2).

Второй вариант предполагает неоспоримые организационные и экономические преимущества, но встречается он крайне редко, поскольку требует больших единовременных затрат и достаточно сложен для персонала организации.

Определенной проблемой служит определение таких категорий, как «необходимые системы менеджмента» и «все системы менеджмента». Тем не менее в этой части можно найти важные руководящие указания. Так, в 2017 г. вышел приказ Министерства промышленности и торговли РФ «Об утверждении Рекомендаций по применению принципов бережливого производства в различных отраслях промышленности» (№ 1907 от 20 июня 2017 г.), который воплощает в жизнь ранее принятые директивы Правительства РФ о внедрении, так называемого, «бережливого производства – во исполнение поручений Президента РФ и решений заседаний ответственных лиц по линии

ВПК (от 16 апреля 2015 № 2303п-П13 и от 11 июня 2015 № 3666п-П13) [4].

Так, в приказе Министерства промышленности и торговли РФ «Об утверждении Рекомендаций по применению принципов бережливого производства в различных отраслях промышленности» (№ 1907 от 20 июня 2017 г.), который воплощает в жизнь ранее принятые директивы Правительства РФ о внедрении «бережливого производства» (от 16 апреля 2015 № 2303п-П13 и от 11 июня 2015 № 3666п-П13) [2], указано на необходимость широкого применения ряда национальных стандартов, непосредственно связанных с ИСМ, таких как:

- 11 стандартов по бережливому производству;
- стандарта по аудиту ИСМ;
- стандарта по менеджменту рисков;
- стандарта по СМК.

Данный набор формирует некоторое понимание содержания ИСМ (отличающееся от «классического»), где в качестве базового подхода принимается интеграция СМК, СЭМ и СМБТиОЗ).

Основной задачей для производителей геосинтетических материалов, например, ЗАО «ТЕХПОЛИМЕР», является обеспечение требуемого качества продукции, которая поставляется для предприятий, занимающихся автодорожным строительством и др. Для обеспечения требуемого качества геосинтетических материалов, а также для повышения эффективности производства, от предприятия требуется организовать внедрение инновационных методов бережливого производства [3], которые будут направлены на повышение результативности и эффективности процессов. Решение этой задачи базируется на построении ИСМ на предприятии геосинтетических материалов в составе системы менеджмента качества, системы бережливого производства, а также проектного менеджмента.

Методической основой создания интегрированной системы менеджмента качества, бережливого производства и проектного менеджмента служат базовые стандарты ГОСТ Р ИСО 9001–2015, ГОСТ Р 56404–2015, ГОСТ Р 54869–2011 [4–6], которые содержат требования к составным частям ИСМ. Для создания ИСМ необходимо разработать систему взаимосвязанных процессов, которые будут направлены на обеспечение требуемого качества продукции, также необходимо организовать постоянное улучшение процессов ИСМ за счет внедрения методов бережливого производства, применяя при этом методы проектного менеджмента. На рис. 3 приведена обобщенная схема взаимосвязи процессов производства геосинтетических материалов предприятия, входящих в ИСМ.

Построение ИСМ на ЗАО «ТЕХПОЛИМЕР» предполагает выполнение таких основных этапов, как:

- организация разработки ИСМ;
- проектирование процессов ИСМ;
- стандартизация и документирование процедур ИСМ;
- внедрение ИСМ на предприятии.

Разберем этапы построения ИСМ более детально.

Этап 1. Организация разработки ИСМ

При подготовке к созданию ИСМ руководство предприятия должно определить политику ИСМ, цели и задачи в области качества, внедрения методов бережливого производства и организацию проектного подхода. Руководству предприятия необходимо четко установить цели, стоящие перед ИСМ, анализировать сложность и продолжительность работы, необходимые трудовые и материальные ресурсы, а также возможные риски. Необходимо оценить уровень подготовленности руководителей подразделений и специалистов для успешного выполнения намечаемой работы и, в случае необходимости, провести обучение персонала.



Рис. 1. Аддитивная модель создания ИСМ

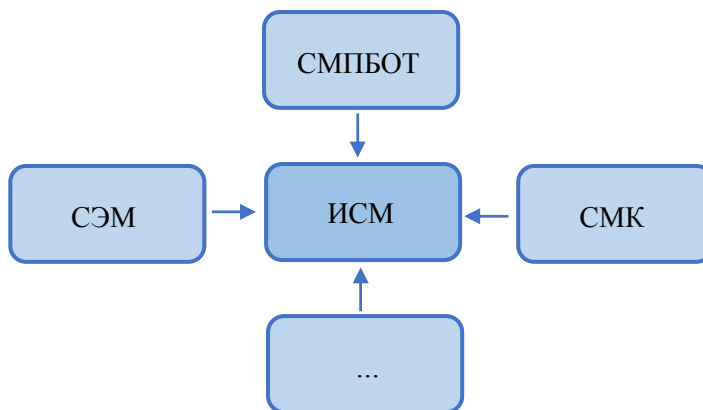


Рис. 2. Модель создания ИСМ при одновременном объединении СМ



Рис. 3. Обобщенная схема взаимосвязи процессов ИСМ

Для организации разработки ИСМ целесообразно сформировать рабочую группу по разработке ИСМ и назначить ее руководителя.

Управление созданием и внедрением ИСМ возлагается на руководителя рабочей группы, который должен регулярно информировать руководство предприятия о ходе разработки ИСМ. На него возлагается ответственность за координацию совместной работы владельцев процессов ИСМ, в качестве которых назначаются руководители подразделений и служб организации.

В состав рабочей группы по разработке ИСМ должны включаться специалисты предприятия, которые обладают соответствующими компетенциями для организации функционирования процессов ИСМ. Члены рабочей группы должны пройти обучение по программам, включающим изучение требований базовых стандартов ИСМ и методов применения инструментов бережливого производства.

Рабочая группа составляет техническое задание (ТЗ) на создание ИСМ, которое утверждается руководителем предприятия. В ТЗ определяются этапы и виды работ, исполнители, а также сроки их выполнения.

Этап 2. Проектирование процессов ИСМ

На этапе проектирования процессов ИСМ проводится анализ системы управления качеством предприятия с целью выявления слабых сторон деятельности организации в области качества. Такой анализ может быть осуществлен путем проведения внутреннего аудита бизнес-процессов предприятия. Аудит осуществляется во всех подразделениях и службах

предприятия, в первую очередь, в производственных подразделениях. Выявленные несоответствия и потери позволяют наметить наиболее важные направления совершенствования процессов предприятия, выбрать наиболее подходящие для этого методы бережливого производства (БП).

С учетом результатов проведенного аудита системы управления качеством предприятия определяются процессы ИСМ, устанавливается их взаимосвязь, проводится моделирование процессов; назначаются владельцы процессов, ответственные за результативность и эффективность; также устанавливаются параметры мониторинга результативности процессов и определяются критерии оценки результативности ИСМ.

Этап 3. Стандартизация и документирование процедур ИСМ

С целью стандартизации деятельности ИСМ на данном этапе необходимо осуществить разработку документированных процедур, которые регламентируют выполнение процессов ИСМ. Разработку документации необходимо проводить с учетом требований базовых стандартов ИСМ и стандарта.

Документация ИСМ может состоять из трех уровней:

- руководство по ИСМ, в котором приводится политика, цели и задачи предприятия в области обеспечения качества и совершенствования процессов БП;
- документированные процедуры описания процессов ИСМ для реализации всех видов деятельности предприятия, влияющих на результативность ИСМ;
- записи по результативности проводимых мероприятий по обеспечению качества продукции

и повышению результативности и эффективности процессов.

Количество документации ИСМ зависит от вида и уровня сложности производства, характера процессов, компетентности и подготовленности персонала.

Этап 4. Внедрение ИСМ

Для осуществления внедрения ИСМ персонал предприятия должен быть ознакомлен с документацией ИСМ и подготовлен работе в условиях функционирования ИСМ. С целью проверки готовности к работе в новых регламентах на предприятии должен быть проведен внутренний аудит подразделений и служб.

Несоответствия, выявленные в процессе проведения внутреннего аудита ИСМ, должны анализироваться руководством предприятия с целью устранения причин их возникновения путем проведения корректирующих мероприятий.

Реализация рассмотренных этапов создания интегрированной системы качества и бережливого производства позволяет организовать на предприятии работу по совершенствованию процессов производства геосинтетических материалов.

Библиографические ссылки

1. ГОСТ Р 56366–2015/IAF MD 11:2013. Применение ИСО/МЭК 17021:2011 при аудитах интегрированных систем менеджмента. М. : Стандартиформ, 2015. С. 6.

2. Об утверждении Рекомендаций по применению принципов бережливого производства в различных отраслях промышленности [Электронный ресурс] : Приказ Минпромторга России от 20.06.2017 № 1907. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_212572 (дата обращения: 01.09.2020).

3. ГОСТ Р 56407–2015. Бережливое производство. Основные методы и инструменты. М. : Стандартиформ, 2015. С. 20

4. ГОСТ Р ИСО 9001–2015. Системы менеджмента качества. Требования. М. : Стандартиформ, 2015. С. 24

5. ГОСТ Р 56404–2015. Бережливое производство. Требования к системам менеджмента. М. : Стандартиформ, 2015. С. 42

6. ГОСТ Р 54869–2011. Проектный менеджмент. Требования к управлению проектом. М. : Стандартиформ, 2012. С.7

References

1. GOST R 56366–2015/IAF MD 11:2013. [Application of ISO/IEC 17021:2011 in audits of integrated management systems]. М. : Standartinform Publ., 2015. 6 p.

2. Order of the Ministry of Industry and Trade of Russia dated 20.06.2017 № 1907 [On Approval of Recommendations on the Application of Lean Production Principles in Various Industries] (In Russ.) [Electronic resource]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_212572 (access: 01.09.2020).

3. GOST R 56407–2015. [Lean production. Main methods and tools]. М. : Standartinform Publ., 2015. 20 p.

4. GOST R ISO 9001–2015. [Quality Management Systems. Requirements]. М. : Standartinform Publ., 2015. 24 p.

5. GOST R 56404–2015. [Lean production. Requirements for management systems]. М. : Standartinform Publ., 2015. 42 p.

6. GOST R 54869–2011. [Project Management. Requirements for project management]. М. : Standartinform Publ., 2012. 7 p.

© Русакова Л. Ю., 2020

УДК 691.793

ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ АЗОТИРОВАНИЕ МЕЛКОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС ПРИВОДОВ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

П. Н. Сильченко^{1*}, Е. С. Новиков², М. М. Михнёв³

¹Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
²МГТУ им. Н. Э. Баумана,

105005, Москва, Российская Федерация, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

³Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

*E-mail: Psilchenko@sfu-kras.ru

Создаётся высокая твёрдость рабочих поверхностей зубьев по сравнению с вязкой сердцевиной для обеспечения прочности, изгибной и контактной выносливости зубьев мелко модульных зубчатых передач приводов механических систем космических аппаратов.

Ключевые слова: установка, низко температурная плазма, ионно-плазменное упрочнение, твёрдость, поверхность зубьев, технология, технологические режимы.

ION-PLASMA NITRIDING OF FINE-MODULE GEARS IN SPACECRAFT MECHANICAL DRIVES

P. N. Silchenko^{1*}, E. S. Novikov², M. M. Mikhnev³

¹Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

²Bauman Moscow State Technical University,
Building 5, 2nd Baumanskaya Str, 105005 Moscow, Russian Federation,

³Joint-Stock Company “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

*E-mail: Psilchenko@sfu-kras.ru

It has been achieved higher hardness of the working surfaces of the teeth in comparison with the ductile core to provide strength, bending and contact endurance of the teeth of fine-module gears for drives of mechanical systems in spacecraft.

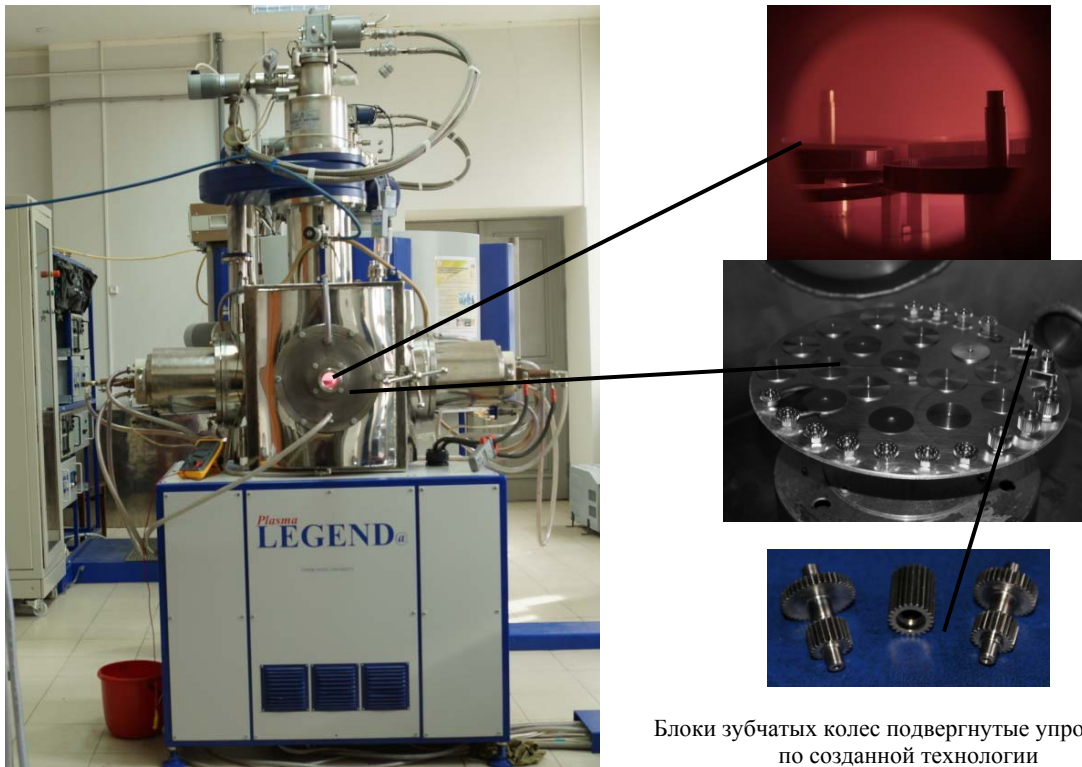
Keywords: installation, low-temperature plasma, ion-plasma hardening, hardness, tooth surface, technology, technological modes.

Введение. Работоспособность [1–4] приводов механических систем космических аппаратов достигается обеспечением [3] прочности, изгибной и контактной выносливости зубьев мелко модульных зубчатых передач достигается получением на стадии изготовления более высокой твёрдости рабочих поверхностей зубьев, чем их сердцевины, которая должна оставаться вязкой.

Традиционные способы поверхностного термического и химико-термического упрочнения не позволяют достичь указанных требований в мелко модульных зубчатых передачах, так как толщина упрочнённого слоя после цементации, простым азотированием или ТВЧ является соизмеримой с половиной толщины зуба. Упрочнение рабочей поверхности зуба мелко модульных зубчатых колёс должно быть таким [1; 2], что бы сформированный поверхностный слой имел толщину от 10 до 50 мкм и обладал повышенной

твёрдостью, износостойкостью, а контактирующие поверхности зубьев умели минимальный коэффициент трения. Получение такой толщины упрочнённого слоя, рабочей поверхности зуба мелко модульных зубчатых колёс, можно обеспечить [5; 6] наномодифицированием поверхностного слоя зубьев, т. е. насыщением азотом в потоке низкотемпературной плазмы.

Технологию, технологические режимы для упрочнения мелко модульных зубчатых колёс нам удалось получить в разработанной и изготовленной установке «Легенда», которая позволяет в ходе технологического процесса упрочнения изменять параметры режимов и как следствие влиять на функциональные характеристики поверхностей зубьев в широком диапазоне конкретного узла механической системы космического аппарата. Это позволило нам разработать технологических процессов упрочнения зубчатых колёс из различных конструкционных сталей.



Блоки зубчатых колес подвергнутые упрочнению по созданной технологии

Вакуумно-плазменная установка «ЛЕГЕНДА»

Краткое описание изготовленной установки.

В общем виде вакуумная камера и все основные узлы и системы и установки представлены на рисунке.

Состав установки. Технологическая вакуумная камера. Системы:

- вакуумной откачки;
- водяного охлаждения; подачи рабочих газов в вакуумную камеру;
- измерения давления; вращения обрабатываемых образцов и изделий в вакуумной камере;
- контроля температуры обрабатываемых образцов и изделий;
- технологические источники плазмы (генераторы газоразрядной плазмы);
- электропитания технологических источников плазмы и потенциала смещения обрабатываемых образцов и изделий;
- управления; шкаф телекоммуникационный источников электропитания.

Основные системы и узлы установки специально изготовлены под определённый ряд конструкционных сталей, применяемых для деталей и узлов приводов различных механических систем космических аппаратов.

Вакуумно-плазменная установка «ЛЕГЕНДА», обеспечивает ионно-плазменным азотированием [5; 6] получение упрочнённых поверхностных рабочих слоев мелкозубчатых зубчатых колёс с требуемыми характеристиками (твёрдость поверхности, толщина слоя) для механических систем, устройств и приводов космического аппарата.

Создана система автоматизированного управления установкой «ЛЕГЕНДА», позволяющая осуществлять

управление всеми параметрами технологического процесса ионно-плазменного упрочнения азотированием изделий с отображением событий на мониторе ПЭВМ.

Основными критериями качественного ионно-плазменного азотирования рабочих поверхностей зубьев зубчатых колёс является равномерное интенсивное облучение ионами азота всех макроскопических участков их поверхности, включая вершины, впадины, отверстия, кромки и т. д., с исключением эффекта «теней» – участков с отсутствием плазменного воздействия, а также перегрева и ионного растревания выступов с острыми кромками. Иными словами, плазма должна равномерно охватывать все макроучастки поверхности зуба [5; 6], что и обеспечивает его однородное качественное упрочнение на требуемую глубину от поверхности.

Технологический процесс упрочнения поверхностей зубьев зубчатых колёс осуществляется в несколько этапов определённых этапов подготовки для непосредственно ионно-плазменного азотирования.

Заключительным является процесс финишной плазменной очистки мелкозубчатых колёс в вакууме, при котором достигается необходимая температура поверхности зубчатого колеса для ионно-плазменного азотирования и производится переключение подачи газа – аргон на азот. Для получения на заданную глубину (см. таблицу) от рабочей поверхности эвольвенты зуба необходимой твёрдости и сохранения в пределах допусков качественных контрольных параметров геометрии требуется строгий контроль параметров технологических режимов ионно-плазменного азотирования.

Твёрдость рабочих поверхностей зубьев

Расстояние от поверхности, мкм ± 3	Твёрдость по Виккерсу, HV по эвольвенте от вершины зуба
0 (поверхность)	$1200 \pm 20 \%$
0 – 20	$\approx 990 \pm 20 \%$
40	$\approx 900 \pm 20 \%$
50	$850 \pm 20 \%$
70	$750 \pm 20 \%$
90	$500 \pm 20 \%$
120	$337^* \pm 20 \%$
и т. д. ... 300 ...	*твёрдость поверхности и сердцевинны зуба до азотирования

Библиографические ссылки

1. Сильченко П. Н., Новиков Е. С., Леканов А. В. Обоснования выбора способов упрочнения мелко-модульных зубчатых колёс приводов устройств исполнительской автоматизации космических аппаратов // Техника и технологии. Журнал СФУ. 2011. № 6. С. 670–673.

2. Сильченко П. Н., Новиков Е. С., Леканов А. В. Повышение надёжности приводов раскрытия крупногабаритных антенн и солнечных батарей космических аппаратов // Безопасность и живучесть технических систем : тр. III Всерос. конф. Красноярск, 2009. С. 252–253.

5. Vacuum-plasma technologies for high-quality surface-treatment applications / D. P. Borisov, N. N. Koval, P. N. Silchenko et al. // Proceedings of Higher Educational Institutions. Physics. 2012. Vol. 55, № 12-2. P. 29–33.

6. Efficient arc sources of gas-discharge plasma in vacuum-plasma production facilities / D. P. Borisov, N. N. Koval, P. N. Silchenko et al. // Proceedings of Higher Educational Institutions. Physics. 2012. Vol. 55, № 12-2. P. 24–28.

5. Расчёт ресурса работы зубчатых механизмов электромеханических приводов / П. Н. Сильченко, Е. С. Новиков, Г. А. Тимофеев, С. И. Красавин // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 6. С. 10–19.

6. Расчёт долговечности зубчатых механизмов электромеханических приводов / П. Н. Сильченко, Г. А. Тимофеев, Е. С. Новиков, С. И. Красавин // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2017. № 9. С. 12–21.

References

1. Sil'chenko P. N., Novikov E. S., Lekanov A. V. Obosnovaniya vybora sposobov uprochneniya melkomodul'nykh zubchatykh kol'es privodov ustroystv ispolnitel'noy avtomatiki kosmicheskikh apparatov // Tekhnika i tekhnologii. ZHurnal SFU. 2011. № 6. P. 670–673.

2. Sil'chenko P. N., Novikov E. S., Lekanov A. V. Povysheniye nadëzhnosti privodov raskrytiya krupnogaabaritnykh antenn i solnechnykh batarey kosmicheskikh apparatov // Bezopasnost' i zhivuchest' tekhnicheskikh sistem : tr. III Vseros. konf. Krasnoyarsk, 2009. P. 252–253.

5. Vacuum-plasma technologies for high-quality surface-treatment applications / D. P. Borisov, N. N. Koval, P. N. Silchenko et al. // Proceedings of Higher Educational Institutions. Physics. 2012. Vol. 55, № 12-2. P. 29–33.

6. Efficient arc sources of gas-discharge plasma in vacuum-plasma production facilities / D. P. Borisov, N. N. Koval, P. N. Silchenko et al. // Proceedings of Higher Educational Institutions. Physics. 2012. Vol. 55, № 12-2. P. 24–28.

5. Raschët resursa raboty zubchatykh mekhanizmov elektromekhanicheskikh privodov / P. N. Sil'chenko, E. S. Novikov, G. A. Timofeyev, S. I. Krasavin // In-zhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii. 2017. № 6. P. 10–19.

6. Raschët dolgovechnosti zubchatykh mekhanizmov elektromekhanicheskikh privodov / P. N. Sil'chenko, G. A. Timofeyev, E. S. Novikov, S. I. Krasavin // Vestnik MGTU im. N. E. Bauman. Seriya «Mashinostroyeniye». 2017. № 9. P. 12–21.

© Сильченко П. Н., Новиков Е. С., Михнёв М. М., 2020

ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИИ ФРЕЗЫ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

М. В. Стахнова

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

Рассмотрена проблема влияния вибрации фрезы при высокоскоростной обработке деталей из алюминиевых сплавов, используемых в производстве ракетно-космической техники.

Ключевые слова: фрезерная обработка, высокоскоростная обработка, обработка алюминиевых сплавов.

EFFECT OF MILL VIBRATION ON SURFACE QUALITY DURING HIGH-SPEED PROCESSING OF ALUMINUM ALLOYS

M. V. Stakhnova

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

In this paper, the problem of the influence of vibration of a cutter during high-speed machining of parts from aluminum alloys used in the production of rocket and space technology is considered.

Keywords: milling, high – speed machining, aluminum alloy processing.

В производстве РКТ (ракетно-космической техники) при обработки поверхностей деталей из алюминиевых сплавов применяют высокоскоростную фрезерную обработку. При этом существует ряд недостатков, одним из которых являются вибрации.

В процессе снятия припуска на поверхности детали, при некотором сочетании факторов, возникает автоколебания, действие которых оказывает влияние на профиль обработанной поверхности деталей. Автоколебания системы СПИД (станок – приспособление – инструмент – деталь) создаются силами, возникающими в процессе резания. Возмущающая сила создается и управляется процессом резания и после прекращения его исчезает [1].

Использование новых методик, устройств и средств измерения способствуют расширению знаний о влиянии автоколебаний на процесс резания тонкостенных элементов деталей.

Исследованиями Жаркова И. Г. установлено, что вибрации при лезвийной обработке имеют как положительное (при малых амплитудах колебаний), так и отрицательное (с увеличением амплитуды) влияние на стойкость режущего инструмента. С увеличением амплитуды колебаний параметры шероховатости и волнистости обработанной поверхностей увеличиваются [2; 3].

При этом, для понимания от чего зависит увеличение шероховатости и волнистости были проведены многочисленные эксперименты, в которых было видно, что шероховатость поверхности также зависит от режима резания, геометрии и износа инструмента,

однако общая тенденция ухудшения параметров шероховатости с повышением амплитуды колебаний всегда и во всех опытах сохранялась, потому что причинами были изменения сил резания, трение на рабочих поверхностях инструмента, образование наростов, площади поперечного сечения срезаемого слоя металла, упругие деформации заготовки и инструмента.

По итогу экспериментальных исследований параметров волнистости и шероховатости поверхности были получены эмпирические зависимости высоты волнистости от амплитуды автоколебаний и среднеарифметического отклонения профиля от элементов режима резания, геометрии инструмента и амплитуды колебаний. Зависимость высоты волнистости (W_z) от амплитуды автоколебаний (A) может быть выражена зависимостью [4; 5]:

$$W_z = c_1 \cdot A^{(\lambda_1)}, \quad (1)$$

где коэффициенты $c_1 = 0,3$ и $\lambda_1 = 1$.

$$R_a = c_2 \frac{s^{y_2} \cdot x_2 \cdot n_2 \cdot \lambda_2}{v^{z_2} \cdot m_2}. \quad (2)$$

где s – подача, мм/об; v – скорость резания, м/мин; c_2 , y_2 , x_2 , n_2 , λ_2 , z_2 , m_2 – коэффициенты полученные экспериментальным путем при обрабатываемом материале.

Анализируя уравнения (1) и (2) можно сделать вывод, что расчетным путем возможно прогнозировать параметры волнистости и шероховатости поверхности, изменяя режимы резания, параметры упругой технологической системы, а также геометрию режущего инструмента. При этом коэффициенты, которые

получены исходя из эксперимента, были проведены с помощью фрезерования дисковыми, пазовыми, цилиндрическими, концевыми и торцовыми фрезами,

Следовательно, с помощью аналитических выражений можно заранее оценить шероховатость поверхности и волнистость деталей, не проводя экспериментальных исследований, тем самым удешевить производство ПКТ.

Библиографические ссылки

1. Калмин Б. И., Корятов М. С. Физико-химические процессы при обработке металлов резанием. Омск : СибАДИ, 2003. 108 с.

2. Влияние вибраций на волнистость обрабатываемой поверхности при фрезеровании [Электронный ресурс]. URL: <https://docplayer.ru/131526353-Vliyanie-vibratsiy-na-volnistost-obrabatyvaemoy-poverhnosti-pri-frezerovanii.html> (дата обращения: 06.09.2020).

3. Влияние вибраций на качество поверхности при фрезеровании [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25345211> (дата обращения: 06.09.2020).

4. Выбор рациональных режимов фрезерования для обработки алюминиевых сплавов [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-ratsionalnyh-rezhimov-frezerovaniya-dlya-obrabotki-alyumnievyh-splavov> (дата обращения: 06.09.2020).

5. Жарков И. Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. 184 с.

References

1. Kalmin B. I., Korytov M. S. Fiziko-khimicheskiye protsessy pri obrabotke metallov rezaniyem. Omsk : SibADI, 2003. 108 p.

2. Vliyanie vibratsiy na volnistost' obrabatyvayemoy poverkhnosti pri frezerovanii [Elektronnyy resurs]. URL: <https://docplayer.ru/131526353-Vliyanie-vibratsiy-na-volnistost-obrabatyvaemoy-poverhnosti-pri-frezerovanii.html> (access: 06.09.2020).

3. Vliyanie vibratsiy na kachestvo poverkhnosti pri frezerovanii [Elektronnyy resurs]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25345211> (access: 06.09.2020).

4. Vybor ratsional'nykh rezhimov frezerovaniya dlya obrabotki alyuminiyevykh splavov [Elektronnyy resurs]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-ratsionalnyh-rezhimov-frezerovaniya-dlya-obrabotki-alyumnievyh-splavov> (access: 06.09.2020).

5. Zharkov I. G. Vibratsii pri obrabotke lezviy-nym instrumentom. L. : Mashinostroyeniye. Leninrr. otd-niye, 1986. 184 p.

© Стахнова М. В., 2020

УДК 621.891

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ МНОГОЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ ВИТКОВ ЧЕРВЯКА ГЛОБОИДНО-ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ

О. А. Суханова, И. О. Якубович, Л. С. Малько

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

Червячные редукторы используются в управлении роторным клапаном ракетного двигателя. Предложены решения по проектированию инструмента для нарезания витков глобоидного червяка, что обеспечивает изготовление глобоидно-цилиндрических редукторов.

Ключевые слова: глобоидно-цилиндрический редуктор, различная твердость, объемный инструмент.

DESIGN AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR THE DESIGN OF A MULTI-BLADE TOOL FOR CUTTING WORM TURNS OF A GLOBOID-CYLINDRICAL TRANSMISSION

O. A. Sukhanova, I. O. Yakubovich, L. S. Mal'ko

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

Worm gearboxes are used in controlling the rotary valve of a rocket engine. Solutions for the design of a tool for cutting globoid worm turns are proposed, which ensures the production of globoid-cylindrical reducers.

Keywords: cone-cylindrical gear reducer, various hardness, bulk tool.

Глобоидные передачи отличаются от передач с цилиндрическим червяком более высокой нагрузочной способностью, особенно при больших межосевых расстояниях [1]. Здесь же отмечено, что эти и другие эксплуатационные свойства стали основной причиной распространения глобоидных передач, главным образом, в силовых механизмах техники оборонного и специального назначения.

В процессе совершенствования производства червячных передач было установлено, что более высокий технический эффект червячной передачи по передаваемому крутящему моменту и КПД может быть достигнут при существенно различной твердости поверхностей витка червяка и зуба колеса [2].

Поэтому дальнейшее совершенствование технологии изготовления глобоидных пар и ее инструментального обеспечения на основе конструкторско-технологических решений является актуальной задачей для машиностроительного производства.

Например, внедрение в производство глобоидно-цилиндрических передач с существенно различной твердостью сопряженных поверхностей витка червяка и профилей зубьев колеса требует проектирования и изготовления объемного многолезвийного инструмента для нарезания витков глобоидного червяка. При этом сопряженное цилиндрическое колесо должно изготавливаться из стали. Такая замена материала для червяка и колеса (традиционно червяк изготавливается из стали, а зубчатый венец сопряженного колеса –

из бронзы) позволяет провести закалку зубьев колеса глобоидной пары с последующим шлифованием зубьев с использованием изготавливаемых в промышленных масштабах зубошлифовальных станков.

Проектируемый инструмент в отличие от используемых в настоящее время разцов с прямолинейной режущей кромкой для нарезания витков червяка обеспечивает обработку вогнутого профиля витка червяка по методу обкатки. Обработка по методу обкатки, как отмечено в работе [3], обеспечивает получение поверхностей сложной формы с высокой точностью и низкой шероховатостью поверхности.

Проектирование дискового многолезвийного инструмента с эвольвентным профилем зубьев выполняются на основе исходного производящего колеса.

Значения коэффициентов параметров зубчатого венца исходного производящего колеса должны быть следующими:

- коэффициент высоты головки зуба $h_a^* = 1,4$;
- коэффициент высоты ножки зуба $h_f^* = 1,25$;
- коэффициент радиуса кривизны переходной кривой $p_f^* = 0,3$.

Следующие параметры: z – число режущих зубьев инструмента; m – модуль, β – угол наклона зубьев; α – угол профиля зуба; должны соответствовать значениям принятых для сопряженного цилиндрического косозубого колеса глобоидно-цилиндрической передачи.

Расчет основных геометрических параметров многолезвийного инструмента выполняют по следующим зависимостям:

$$- \text{делительный диаметр } d_u = \frac{z \cdot m}{\cos \beta};$$

$$- \text{диаметр вершин зубьев } d_{au} = d_u + 2h_a^* \cdot m;$$

$$- \text{диаметр впадин зубьев } d_{fu} = d_u - 2h_f^* \cdot m;$$

$$- \text{постоянная хорда } S_c = 0,5\pi \cdot \cos^2 \alpha \cdot m;$$

$$- \text{высота до постоянной хорды } h_c = 0,5(d_{au} - d_u - S_c \cdot \operatorname{tg} \alpha);$$

- задний угол на вершине зуба принимается равным 6° .

Конструктивные элементы проектируемого многолезвийного инструмента берутся из стандарта предприятия. Стандарт предприятия разрабатывается в порядке выполнения мероприятий по освоению производства глобоидно-цилиндрических редукторов.

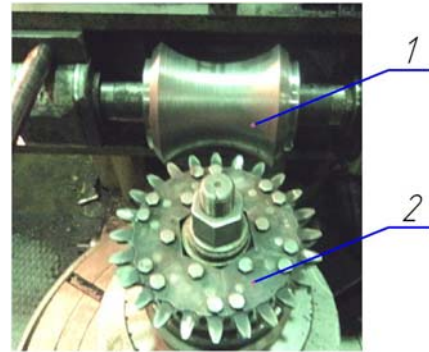
Инструментами данного типа должны проектироваться сборки конструкции. Режущие элементы изготавливаются из быстрорежущей стали марки Р6М5 и др., корпус – из стали 40Х. Центрирование и крепление режущих элементов выполняется с помощью штифтов и винтов соответственно.

Рабочая зона зубофрезерного станка 5К328А с установленными заготовкой глобоидного червяка и опытной конструкцией многолезвийного инструмента. Спроектированного и изготовленного с учетом предложенных конструкторско-технологических решений представлены на рисунке.

Таким образом, использование предлагаемых конструкторско-технологических решений при проектировании многолезвийного инструмента, предназначенного для нарезания витков червяка с вогнутым эвольвентным профилем совместно с применением биметаллической заготовки сталь-бронза для червяка и стальной для сопряженного колеса позволяет без каких-либо технологических трудностей обеспечить возможность изготовления глобоидно-цилиндрических пар при существенно различной твердости их сопряженных поверхностей.

Кроме того рациональность предложенных решений позволяет применить их как при выполнении экспериментальных исследований по данной тематике, так и при отработке конструкторско-техноло-

гических вопросов, возникающих в процессе освоения производства данного вида червячных передач.



Рабочая зона станка 5К328А с установленной заготовкой глобоидного червяка и режущим многолезвийным инструментом:
1 – заготовка глобоидного червяка;
2 – режущий многолезвийный инструмент

Библиографические ссылки

1. Сандлер А. И., Лагутин С. А., Гудов Е. А. Теория и практика производства червячных передач общего вида / под общ. ред. С.А. Лагутина. М. ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2016. 346 с.
2. Парубец В. И. Глобоидные передачи: состояние, тенденции и перспективы развития научно-технических исследований и разработок в России // Редукторы и приводы. 2005. № 4, 5. С. 31–39.
3. Сахаров Г. Н. Обкаточные инструменты. М. : Машиностроение, 1983. 229 с.

References

1. Sandler A. I. *Teoriya i praktika proizvodstva chervyachnykh peredach obshchego vida* [Theory and practice of production of worm gears of general type]. M. ; Vologda : Infra-Inzheneriya, 2016. 346 p.
2. Parubets V. I. *Globoidnye peredachi: sostoyanie, tendentsii i perspektivy razvitiya nauchno-tekhnicheskikh issledovaniy i razrobotok v Rossii* // *Gearboxes and drives*. 2005. № 4, 5. P. 31–39.
3. Sakharov G. N. *Obkatochnye instrument* [Turning tools]. M. : Mashinostroenie, 1983. 229 p.

© Суханова О. А., Якубович И. О.,
Малько Л. С., 2020

УДК 004.942

ПРОБЛЕМАТИКА ОБУЧЕНИЯ КАДРОВ ДЛЯ РАБОТЫ НА СТАНКАХ ТПА

А. М. Терин, А. К. Тутушкин, Д. Э. Панков, И. А. Соломонов, П. А. Снетков

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

Рассматривается проблематика нехватки квалифицированных кадров для работы на станках ТПА.

Ключевые слова: термопластавтоматы, станки, производства полимерных материалов.

PROBLEMS OF TRAINING PERSONNEL TO WORK ON TPA MACHINES

A. M. Terin, A. K. Tutushkin, D. E. Pankov, I. A. Solomonov, P. A. Snetkov

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

The paper deals with the problem of lack of qualified personnel to work on TPA machines.

Keywords: injection molding machines, machine tools, production of polymer materials.

В настоящее время в авиации и космонавтики преобладают детали из металлов и сплавов. Иногда в производстве не целесообразно применять такие дорогостоящие материалы, в таких случаях можно использовать материалы из пластмасс и полимерных материалов.

Если начать использовать данные материалы, встаёт вопрос в подготовке операторов для работы на термопластавтоматах [1–3].

Настоящие САПРы и САД-системы позволяют не только спроектировать изделия, но и провести всевозможные проверки. От проверок на прочность, до анализа проливаемости (рис. 1). Таким изделия из пластмасс могут быть прочнее, дешевле и легче, а также просты и быстры в изготовлении.

На данный момент во многих технических вузах можно встретить направления по подготовке специалистов по металлообработке на станках с ЧПУ. В России металлообработка как направления обучения и производства высоко развиты. Должное внимание не уделяется производством из пластмасс. Около 70 % народно-хозяйственного рынка занимают пластмассы. Они нашли применение от упаковок, до садового инструмента.

Так и в машиностроении немалую долю занимают пластмассы. От клипс и жгутов, дома иные детали интерьера. В космонавтике также присутствуют детали из пластмасс. В настоящее время операторы термопластавтоматов получают знания путём проб и ошибок.

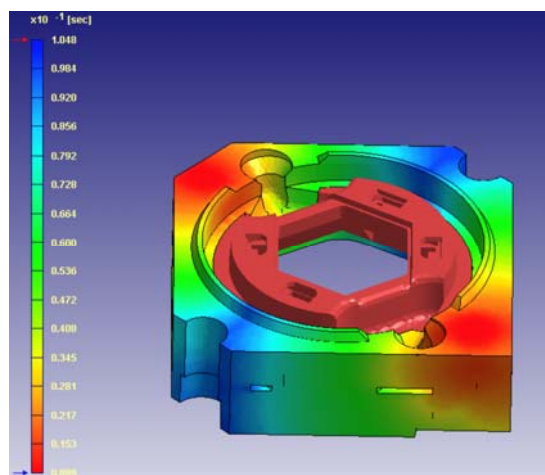


Рис. 1. Анализ проливаемости изделия

У большинства специалистов нет минимальных теоретических знаний, которые позволили бы ускорить процесс производства и снижение количества брака.

Термопластавтоматы имеют достаточно много параметров и режимов работы, от которых зависит: скорость производства, количество брака, качество изделий, скорость наладки пресс формы, а также надёжности работы. В настоящее время на производствах занимающиеся пластиковыми изделиями таких специалистов мало. На производствах могут стоять несколько термопластавтоматов, и множество пресс форм. Оператор – наладчик должен понимать и знать, как работает каждый станок и как проливается каждая пресс форма, а также должен знать свойства полимерных материалов.

Приготовление пресс формы трудоемкий и долгий процесс. Экономически выгодно чтобы каждая пресс форма произвела не менее полутора миллионов изделий. Но часто операторы допускают ошибки при наладке формы, которые приводят поломке или разрушению формы. Неправильно подобранное давление может привести к появлению сколов и трещин в пресс форме.

Пульт управления термопластавтомата (рис. 2) мало чем отличается от пульта на станках по металлообработке. Он также сложен и требует обучения работников.



Рис. 2. Пульт управления ТПА

Таким образом нехватка квалифицированных специалистов в области производства изделий из пластмасс влияет на многие факторы производства. На производствах авиации и космонавтики из-за нехватки операторов, могут происходить поломки оборудования, которые в свою очередь тянут за собой дорогостоящий ремонт и потраченное время. Чтобы избежать таких случаев необходимо в вузах подготавливать специалистов направленных на производства изделий из пластмасс.

Библиографические ссылки

1. Системы автоматизированного проектирования (CAD/CAM/CAE) – НПО «Наука».
2. Каталог продукции Апрель-пласт [Электронный ресурс]. URL: <https://april-plast.ru/gorizontalnyetermoplast-avtomati/oc-16000> (дата обращения: 08.09.2020)
3. Терин А. М., Тутушкин А. К., Сыроева Л. П. Аддитивные технологии в производстве деталей летательных аппаратов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : V Междунар. науч.- практич. конф. Красноярск, 2019.
4. Пол Браун, Крис Каспрзак. «Синхронная технология – революция в проектировании» // САПР и Графика. 2012. № 3. С. 57–59.

References

1. Sistemy avtomatizirovannogo proyektirovaniya (CAD/SAM/CAE) – NPO «Nauka».
2. Katalog produktsii April'-plast [Elektronnyy resurs]. URL: <https://april-plast.ru/gorizontalnyetermoplast-avtomati/oc-16000> (access: 08.09.2020)
3. Terin A. M., Tutushkin A. K., Sysoyeva L. P. Additivnyye tekhnologii v proizvodstve detaley letatel'nykh apparatov // Aktual'nyye problemy aviatsii i kosmonavтики : V Mezhdunar. nauch.- praktich. konf. Krasnoyarsk, 2019.
4. Pol Braun, Kris Kasprzak. «Sinkhronnaya tekhnologiya – revolyutsiya v proyektirovanii» // SAPR i Grafika. 2012. № 3. P. 57–59.

© Терин А. М., Тутушкин А. К., Панков Д. Э., Соломонов И. А., Снетков П. А., 2020

УДК 621.7.4

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОН СТЕНКИ КАНАЛА ТРУБЫ ВОЛНОВОДА НА ОСНОВЕ УЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ ВОЛОЧЕНИЯ

В. И. Трифанов, Е. А. Карелина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: karelina-1996@bk.ru

Рассмотрена модель формирования зон стенки трубы волновода при волочении с учетом использования запаса пластичности, степени деформации, воздействия удельной силы давления и силы протягивания.

Ключевые слова: волочение, пластическая деформация, воздействие удельной силы давления и силы протягивания.

MODEL OF FORMATION OF ZONES OF THE CHANNEL WALL OF THE WAVEGUIDE PIPE BASED ON THE DISTRIBUTION OF PARAMETERS OF PLASTIC DEFORMATION AND THE ACTION OF THE DRAWING FORCE

V. I. Trifanov, E. A. Karelina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: karelina-1996@bk.ru

A model of the formation of zones of the wall of a waveguide pipe during drawing is considered, taking into account the use of the reserve of plasticity, the degree of deformation, the impact of the specific pressure force and the stretching force.

Keywords: drawing, plastic deformation, impact of specific pressure force and tensile force.

Качество труб волноводов, изготавливаемых волочением, зависит от формирования стенки канала. Известно, что при пластической деформации поверхностный слой стенки приобретает волокнистую структуру.

Исходная кристаллическая решетка искажается [1]. За счет воздействия роликов фильеры происходит повышение твердости металла из-за наклепа. Глубина наклепа может колебаться от нескольких десятых долей миллиметра до нескольких миллиметров.

Если нормальное давление P_ϵ в зоне контакта ролика роликовой фильеры и трубной заготовки выше некоторой критической величины, то возникает перенаклеп.

Перенаклеп представляет собой явление, при котором происходит разрушение кристаллической решетки в поверхностном слое трубы волновода. Его проявления являются необратимыми, так как энергетически устойчивые микродефекты, термообработкой невозможно устранить и восстановить качество исходного металла [2].

Степень исчерпания запаса пластичности характеризует накопленную металлом поврежденность и является важнейшей характеристикой механического состояния поверхностного слоя трубы волновода при изготовлении его методом волочения. Условием обра-

зования при пластической деформации микродефектов, устраняемых при последующем отжиге, оценивается по формуле [3]:

$$\Psi = \int_{t_0}^{t_{кр}} \left(\frac{\epsilon_i}{\epsilon_{ip}} \right) dt < \Psi_{кр}, \quad (1)$$

где ϵ_{ip} – предельная степень деформации, ϵ_i – приращение степени деформации элементарного объема металла за промежуток времени dt ; $\Psi_{кр}$ – критическое значение использования запаса пластичности, когда образуются микропоры.

Для изготовления труб волноводов из сплавов с термостабильными параметрами размеров $\Psi_{кр} \leq 0,2$ для исключения образования микродефектов. При промежуточном отжиге металла восстановления запаса пластичности происходит по экспоненциальному закону [4]:

$$\Psi = \Psi_1 \left[\exp f_\Psi(t) \right] \quad (2)$$

где Ψ и Ψ_1 – степень использования запаса пластичности до и после отжига, t – время выдержки при отжиге, f_Ψ – некоторая функция, характеризующая процесс восстановления пластичности металла.

При изготовлении трубы волновода волочением накопленную степень деформации ε_{Σ} можно определить по формуле:

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{F_0 - F_n}{F_0}, \quad (3)$$

где F_0 – площадь поперечного сечения исходной трубчатой заготовки, F_n – площадь поперечного сечения трубной заготовки после деформации.

Накопленная степень деформации изменяет предел текучести металла, который можно оценить по формуле:

$$\sigma_T = \sigma_{T_0} (1 + \varepsilon_{\Sigma}) \quad (4)$$

где σ_{T_0} , σ_T – пределы текучести исходного металла и металла после деформации.

Степень исчерпания запаса пластичности ψ при изготовлении труб прямоугольного сечения с использованием круглых трубных заготовок с учетом угловых деформаций можно определить по формуле:

$$\psi = \left(\frac{F_0 - F_n}{F_0} \right) / \left(\frac{\sigma_T \cdot K_{\delta}}{\sigma_{T_0}} \right) \quad (5)$$

где K_{δ} – коэффициент, учитывающий угловую деформацию круглой трубной заготовки при формообразовании из нее трубы прямоугольного сечения.

Удельная сила давления на трубную заготовку $P_{\varepsilon S}$ роликов фильеры может быть определена по формуле:

$$P_{\varepsilon S} = \frac{\tau_{Tp}}{4f} \quad (6)$$

где τ_{Tp} – контактные касательные напряжения при взаимодействии инструмента–дорна и трубной заготовки в зоне пластической деформации, f – коэффициент трения между инструментом–дорном и трубной заготовки.

В соответствии с законом Амонтона–Кулона контактные касательные напряжения можно рассчитать по формуле:

$$\tau_{Tp} \leq \frac{\gamma \sigma_S}{2}, \quad (7)$$

где σ_S – истинное напряжение при линейном напряженном состоянии; γ – безразмерный коэффициент, $1 \leq \gamma \leq 1,15$.

При расчетах $\sigma_S = \sigma_T$ при заданной степени деформации, которая находится экспериментально. При этом силу протягивания трубчатой заготовки можно рассчитать по формуле:

$$P_b \geq \tau_{Tp} \cdot F, \quad (8)$$

где F – площадь контакта трубной заготовки с инструментом–дорном в зоне очага деформации.

Предложенная модель позволяет оценить влияние технологических параметров и механических свойств обрабатываемого металла на механизм формирования зон стенки трубы волновода при изготовлении ее волочением с применением роликовой фильеры и инструмента–дорна.

Библиографические ссылки

1. Научные основы упрочнения комплексным локальным деформированием : монография / В. А. Голенков, С. Ю. Радченко, Д. О. Дорохов, Г. П. Короткий. М. : Машиностроение ; Орел : Гос. университет–УНПК, 2013. 121 с.
2. Иванов К. М., Нестеров Н. И., Усманов Д. В. Механика процессов обработки давлением : учеб. пособие / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2012. 299 с.
3. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / В. А. Голенков, С. П. Яковлев, С. А. Головин и др. ; под ред. В. А. Голенкова, С. П. Яковлева. М. : Машиностроение, 2009. 442 с.
4. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением : учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Екатеринбург : Изд-во УГТУ–УПИ, 2001. 105 с.

References

1. Golenkov V. A., Radchenko S. Yu., Dorokhov D. O., Korotkiy G. P. *Nauchnyye osnovy uprochneniya kompleksnym lokal'nym deformirovaniyem* [Scientific bases of hardening by complex local deformation] : monograph. M. : Mashinostroenie ; Orel : State University–UNPC, 2013. 121 p.
2. Ivanov K. M., Nesterov N. I., Usmanov D. V. *Mekhanika protsessov obrabotki davleniyem* [Mechanics of processing by pressure] : textbook ; Baltic state technical University. SPb., 2012. 299 p.
3. *Teoriya obrabotki metallov davleniyem* [The theory of processing of metals pressure]: textbook for universities / V. A. Golenkov, S. P. Yakovlev, S. A. Golovin et al. ; edited by V. A. Golenkov, S. P. Yakovlev. M. : Mashinostroenie, 2009. 442 p.
4. Kolmogorov V. L. *Mekhanika obrabotki metallov davleniyem* [Mechanics of metal processing by pressure]. Textbook for universities. 2nd ed., reprint. and additional city of. Yekaterinburg : Publishing house of the Ural state technical University, 2001. 105 c.

© Трифанов В. И., Карелина Е. А., 2020

РАСЧЕТ СИЛЫ ПЛАСТИЧЕСКОГО ПОГРАНИЧНОГО ТРЕНИЯ МЕЖДУ ИНСТРУМЕНТОМ-ДОРНОМ И ПОВЕРХНОСТЬЮ КАНАЛА ТРУБЫ ВОЛНОВОДА ПРИ ВОЛОЧЕНИИ

В. И. Трифанов, О. А. Суханова, И. В. Трифанов

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

Предложена формула для расчета силы пластического пограничного трения между трубчатой заготовкой и инструментом-дорном, а также силы волочения, преодолевающей ее при изготовлении труб волноводов.

Ключевые слова: сила волочения, инструмент-дорн, пластическое пограничное трение.

CALCULATION OF STRENGTH OF PLASTIC EDGE FRICTION BETWEEN THE TOOL MANDREL AND THE SURFACE OF THE CHANNEL PIPE WAVEGUIDE AT DRAWING

V. I. Trifanov, O. A. Sukhanova, I. V. Trifanov

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

A formula is proposed for calculating the force of plastic boundary friction between a tubular billet and a mandrel tool, as well as the drawing force that overcomes it in the manufacture of waveguide pipes.

Keywords: drawing force, tool-mandrel, plastic boundary friction.

Обеспечение качества трубы волновода зависит от силы волочения P_{ug} , преодолевающей силу пластического пограничного трения $P_{тр}$ между трубчатой заготовкой и инструментом-дорном [1, 2].

$$P_{ug} \geq P_{тр} \quad (1)$$

Силу пластического пограничного трения при взаимодействии трубной заготовки с инструментом-дорном $P_{тр}$ с учетом конкретных условий волочения трубы волновода прямоугольного сечения предлагается рассчитать по формуле:

$$P_{тр} = \frac{1,15H_v(P \cdot l) \cdot K_{\sigma T} \cdot K_{тр}}{0,8 - 0,45K_v(R_{an} / R_{aug} - 1)}, \quad (2)$$

где P – периметр прямоугольной поверхности инструмента-дорна; l – длина дуги деформирования, м; H_v – твердость материала трубной заготовки; МПа; $K_{\sigma T}$ – коэффициент повышения σT металла при деформации и волочении трубной заготовки; K_v – коэффициент, учитывающий механизм взаимодействия микронеровностей при скольжении поверхности трубной заготовки по поверхности инструмента-дорна, $K_{тр}$ – коэффициент пластического трения между поверхностью канала и инструментом-дорном.

Известно, что периметр прямоугольной поверхности инструмента P можно определить по формуле:

$$P = 2(a + b), \quad (3)$$

где a и b – ширина и высота канала трубы волновода, мм.

Длина дуги деформирования рассчитывается по формуле [3]:

$$l = \sqrt{\Delta h \cdot r}, \quad (4)$$

где Δh – величина деформирования стенки трубчатой заготовки, мм; r – радиус ролика роликовой фильеры, мм.

Подставив выражение (3) и (4) в формулу (2), получим:

$$P_{тр} = \frac{1,15H_v \cdot 2(a + b) \cdot \sqrt{\Delta h \cdot r} \cdot K_{\sigma T} \cdot K_{тр}}{0,8 - 0,45K_v(R_{an} / R_{aug} - 1)}. \quad (5)$$

Коэффициент K_v рассчитывается по формуле:

$$K_v = \ln \frac{R_{an} - R_{ay}}{R_{aug}}, \quad (6)$$

где R_{an} – исходная шероховатость поверхности канала трубчатой заготовки, мкм; R_{aug} – шероховатость поверхности инструмента-дорна; R_{ay} – установившаяся шероховатость трубы волновода после цикла волочения.

Предложена зависимость для расчета силы пластического пограничного трения между трубчатой заготовкой и инструментом-дорном в зависимости от механических свойств обрабатываемого материала и шероховатости поверхности канала, позволяющая оценить величину силы волочения при изготовлении труб волноводов прямоугольного сечения.

Библиографические ссылки

1. Шаров Г. А. Волноводные устройства сантиметровых и миллиметровых волн. М. : Горячая Линия-Телеком, 2016. 640 с.
2. Трифанов В. И., Карелина Е. А. Методы повышения качества изготовления волноводов КВЧ-диапазона // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки [Электронный ресурс] : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск, 2019. С. 534–537.
3. Трифанов В. И., Карелина Е. А., Трифанов И. В. Расчет силы волочения при изготовлении труб волноводов // Решетневские чтения [Электронный ресурс] : материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. Красноярск, 2019. С. 375–377.

References

1. Sharov G. A. *Volnovodnye ustroystva santimetrovykh i millimetrovykh voln* [Waveguide devices for centimeter and millimeter waves]. M. : Goryachaya Liniya-Telekom, 2016. 640 p.
2. Trifanov V. I., Karelina E. A. Methods for improving the quality of manufacturing EHF waveguides // *Molodye uchenye v reshenii aktual'nykh problem nauki*. P. 534–537.
3. Trifanov V. I., Karelina E. A., Trifanov I. V. Calculation of the drawing force in the manufacture of waveguide pipes // *Reshetnevskie chteniya*. P. 375–377.

© Трифанов В. И., Суханова О. А.,
Трифанов И. В., 2020

УДК 621.7

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРУППОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ УНИВЕРСАЛЬНО-СБОРОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Н. И. Усевич^{1*}, А. С. Бинчуров^{1,2}, Ю. И. Гордеев², М. В. Баландина¹, С. А. Якученис¹

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

²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

*E-mail: iscusnic@mail.ru

В результате анализа конструктивно-технологических признаков и поверхностей получена 3D-модель «комплексной» детали и разработан алгоритм построения группового маршрутно-технологического процесса.

Ключевые слова: групповой технологический процесс, универсально-сборочные приспособления, анализ конструкции, комплексная деталь.

USE OF GROUP TECHNOLOGIES FOR MANUFACTURING PARTS OF UNIVERSAL ASSEMBLY DEVICES

N. I. Usevich^{1*}, A. S. Binchurov^{1,2}, Y. I. Gordeev², M. V. Balandina¹, S. A. Yakuchenis¹

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

²Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

*E-mail: iscusnic@mail.ru

As a result of the analysis of structural and technological features and surfaces, a 3D-model of a “complex” part is obtained and an algorithm for constructing a group route-technological process is developed.

Keywords: group technological process, universal Assembly devices, design analysis, complex part.

В условиях мелко- и среднесерийного производства при изготовлении деталей небольшими партиями (что характерно для предприятий аэрокосмической отрасли), с большой сменяемостью формы и типоразмеров, возникают значительные потери времени, связанные с переналадкой станков при переходе от изготовления одной детали к другой. В этих условиях целесообразно использовать групповой метод обработки [1–4], ключевую позицию в построении в которой, занимает этап конструирования комплексной детали. Отличительной особенностью технологической подготовки изготовления деталей УСП является необходимость одновременного создания маршрутно-операционных технологических процессов. Для разработки групповых технологических процессов выбраны наиболее представительные (по конструктивно-технологическим признакам и применяемости) детали УСП такие как призмы. В ходе анализа технологичности конструкций детали «Призма», были определены основные технические требования по точности исполнительных размеров деталей (полей допусков на размеры установочных поверхностей, П-образных пазов, призматических поверхностей, присоединительных поверхностей, точности взаимного расположения поверхностей по плоскостности, па-

раллельности и перпендикулярности, шероховатости поверхностей от Ra0,32 до Ra0,63). Учитывалась также необходимость дополнительной химико-термической обработки этих деталей – цементации на глубину 0,6–1,2 мм и закалки (твердость HRC 57 ... 63), что предъявляет соответствующие достаточно жесткие требования к технологии их механической обработки после закалки. На рис. 1 представлена модель комплексной детали типа «призма», состоящая из ряда элементарных поверхностей (1–27). Исходя из конструктивных особенностей, основные поверхности комплексной детали могут быть идентифицированы как: исполнительные поверхности – 7, 8; основные конструкторские базы – 1–6; вспомогательные (присоединительные) конструкторские поверхности – 10–45; свободная (технологическая) поверхность – 9 [5].

Формирование структуры переходов при изготовлении отдельных деталей группы в пределах группового технологического процесса иллюстрируется в графическом виде данными приведенными на рис. 2.

По результатам комплекса проведенных конструкторско-технологических работ был разработан вариант группового технологического процесса на комплексную деталь УСП типа «Призма» для механической обработки её основных поверхностей.

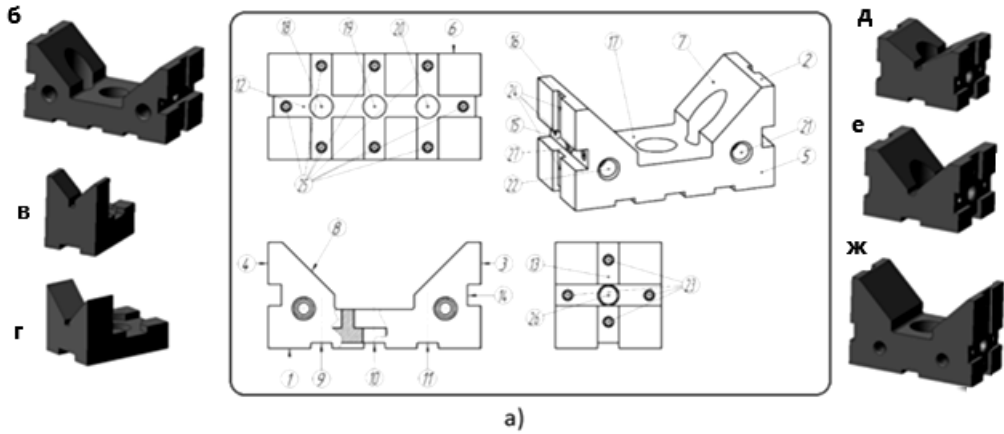


Рис. 1. Модель комплексной детали и типовые детали группы
 а – комплексная деталь с обозначением поверхностей; б–ж – детали группы

Эскизы деталей							Комплексная деталь
Переходы							
Фрезеровать поверхность основания: 1	●	●	●	●	●	●	
Фрезеровать П-образные пазы. Поверхности: 11,13	●	●	●	●	●	●	
10	●	●	●	●	●	●	
12	●	●	●	●	●	●	
Сверление отверстий на основании. Поверхности: 27,28,31,32	●	●	●	●	●	●	
21,26,29,30, 33	●	●	●	●	●	●	
Сверление главных отверстий. Поверхность: 21	●	●	●	●	●	●	
18,22	●	●	●	●	●	●	
Плоско-профилишлифовальная Поверхности: 1	●	●	●	●	●	●	
12	●	●	●	●	●	●	
10	●	●	●	●	●	●	
11,13	●	●	●	●	●	●	
Фрезерно-сверильно-резбонарезная. Поверхности: 2,3,4,5,6,7,8,9,21	●	●	●	●	●	●	
14,15,16,17,24,25,3,4,35,36,37,38,39,40,41	●	●	●	●	●	●	
19,23	●	●	●	●	●	●	
42,43,44,45	●	●	●	●	●	●	
Цементация, термическая(закалка)	●	●	●	●	●	●	
Плоско-профилишлифовальная Поверхности: 2,3,4,5,6	●	●	●	●	●	●	
Термическая(старение)	●	●	●	●	●	●	
Плоско-профилишлифовальная Финишное шлифование. Поверхности: 2,3,4,5,6	●	●	●	●	●	●	

Рис. 2. Структура операций группового технологического процесса

Библиографические ссылки

1. Митрофанов С. П. Групповая технология машиностроительного производства. Т. 2. Организация группового производства. Ленинград, 1993. 407 с.
2. Ogorek M. Workholding in the flexible system // *Manufacturing Engineering*. 1985. Vol. 95, №. 1. P. 28–31.
3. Махаринский Е. И., Махаринский Ю. Е., Беляков Н. В. О теории базирования при механической обработке // *СТИН*. 2005. № 4. С. 29–32.
4. Усевич Н. И., Бинчуров А. С. Последовательность проектирования технологических приспособлений // *Решетневские чтения : материалы XXIII Международ. науч.-практ. конф. ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева*. Красноярск, 2019. С. 723–724.
5. Возможности использования групповых технологий для изготовления деталей универсально-сборных приспособлений / Н. И. Козлова, Ю. И. Гордеев, Н. Е. Анистратенко и др. // *Решетневские чтения : материалы Международ. науч.-практ. конф. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т*. Красноярск, 2017. Т. 1, №. 21. С. 507–508.

References

1. Mitrofanov S. P. Group technology of machine-building production. T. 2. Organization of group production. Leningrad, 1993. 407 c.
2. Ogorek M. Workholding in the flexible system // *Manufacturing Engineering*. 1985. Vol. 95, №. 1. P. 28–31.
3. Makharinsky E. I., Machalinski J. E., Belyakov N. V. On the theory-based machining // *STIN*. 2005. № 4. P. 29–32 (In Russ.).
4. Usevich N. I., Binchurov A. S. [The sequence design of technological devices] // *Reshetnevskie chteniya : materialy XXIII Mezhdunar. nauch. konf. / Reshetnev University*. Krasnoyarsk, 2019. Part. 2. P. 723–724 (In Russ.)
5. The possibilities of using of group technologies for manufacturing the parts of universal-assembled devices / N. I. Kozlova, I. Y. Gordeev, N. E. Anistratenko et al. // *Reshetnevskie chteniya : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. ; Sib. gos. aerokosmich. un-t*. Krasnoyarsk., 2017. Vol. 1, № 21. P. 507–508.

© Усевич Н. И., Бинчуров А. С., Гордеев Ю. И.,
Баландина М. В., Якученис С. А., 2020



Секция
**«МЕХАНИКА СПЕЦИАЛЬНЫХ
СИСТЕМ»**

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ КОМПЛЕКСОВ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

С. П. Ереско^{1*}, Т. Т. Ереско¹, В. С. Ереско², А. Г. Фомин²

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

*E-mail: eresko07@mail.ru

²АО «ЦКБ «Геофизика»

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, ул. Киренского, 89

E-mail: adm@geockb.ru

В данной работе представлены результаты исследования по разработке имитационной математической модели системы охлаждения элементов технологического комплекса индукционного нагрева (КИТ).

Ключевые слова: индукционный нагрев, индуктор, система охлаждения, математическая модель системы водяного охлаждения комплекса индукционного нагрева технологического, температура, коэффициент теплопроводности, коэффициент теплопередачи.

SIMULATION OF WATER COOLING SYSTEMS FOR INDUCTION HEATING COMPLEXES

S. P. Eresko^{1*}, T. T. Eresko¹, W. S. Eresko¹, A. G. Fomin

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: eresko07@mail.ru

²JSC “Central design Bureau “Geofizika”

89, Kirenskogo Str., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

E-mail: adm@geockb.ru

This paper presents the results of research on the development of a simulation mathematical model of the cooling system of elements of the technological complex of induction heating.

Keywords: induction heating, inductor, cooling system, mathematical model of water cooling system of the process induction heating complex, temperature, thermal conductivity coefficient, heat transfer coefficient.

Акционерное общество «ЦКБ «Геофизика» выпускает комплексы технологические индукционного нагрева, применяемые в широком диапазоне температур нагрева металлических материалов, необходимых как для производства поверхностной закалки, пайки и плавнения металлов.

Информация о полном комплекте оборудования, выпускаемого АО «ЦКБ «Геофизика», приведена в специальном буклете, расположенном на официальном сайте [1].

Первым комплексом в буклете указан Комплекс индукционный технологический для пайки трубопроводов в монтажных и стационарных условиях. Комплекс обеспечивает пайку трубопроводов из стали 12ХН10Т, титановых сплавов, ПТ-7М, ОТ4 диаметром 6–50 мм с толщиной стенки 1–2 мм. Время пайки при потреблении не более 10 кВт составляет 35–50 сек. Технологические возможности Процесс пайки может осуществляться в стационарных и монтажных условиях и особенно эффективен там, где принципиально недопустимо применение открытого пламени, например, при монтаже трубопроводов внутри корпусов летательных аппаратов. Комплекс обеспечивает нагрев трубопроводов до заданной температуры (max

1400 °С), последующую выдержку в течение выбранного времени с поддержанием заданной температуры и автоматическое отключение генератора.

Основу всех комплексов составляет универсальный источник высокочастотной энергии трансисторный генератор «Гном-25», позволяющий обеспечить значительную экономию электроэнергии за счет высокого КПД, при высокой производительности, простоте в управлении и обслуживании, обеспечиваемом высокой экологической чистоту рабочего процесса. Комплекс позволяет исключить влияние электромагнитных помех, перепадов и скачков напряжения электросети на стабильность и качество пайки трубопроводов.

Однако, как показали исследования, с привлечением ученых СибГУ в рамках выполнения х/д № 0812 у данного комплекса есть запас повышения качества пайки, при одновременном снижении энергозатрат, путем оптимизации конструкции и принципа управления автономным блоком водяного охлаждения, входящего в состав всех выпускаемых предприятием комплексов индукционного нагрева.

Блок охлаждения предназначен для охлаждения силовых элементов генератора, ВНК, ВНК-НЧ и ин-

дукторов всех технологических устройств. Основные элементы блока охлаждения показаны на рис. 1.

В блоке охлаждения применены следующие основные элементы конструкции системы охлаждения: 1 – верхний расширительный бак; 2 – сетевой выключатель; 3 – электровентильторы 1.25ЭВ-2,8-6-3270У4 – 6 шт.; 4 – радиатор автомобильный «Газель» 3302.1301.010-33 ТУ 23.57.85888.72–98; 5 – соединительные шланги; 6 – разъем питания от сети; 7 – кран шаровой; 8 – манометр; 9 – электронасос; 10 – нижний накопительный бак. Блок охлаждения автономен и обеспечивает нормальный температурный режим генератора ГНОМ-25М2 за счёт принудительной циркуляции воды между нагретыми узлами и охладителем. Охлаждение воды производится в радиаторе блока охлаждения за счет большой его площади теплообмена и принудительного отвода тепла потоком воздуха. Давление воды в системе охлаждения регулируется шаровым краном и определяется по манометру.

На рис. 2. приведена принципиальная схема системы водяного охлаждения генератора.

Циркуляция воды в системе охлаждения осуществляется следующим образом: из верхнего бака блока охлаждения, через нижний штуцер, вода по шлангу поступает в нижний бак, откуда через шланг поступает в насос. Насос перекачивает воду к генератору. Нагреваясь в генераторе, вода поступает в радиатор. Проходя через радиатор вода охлаждается потоком воздуха и поступает в нижний бак блока охлаждения. На выходе водопровода блока охлаждения установлен манометр для контроля давления в системе охлаждения индукционной установки. Регулирование давления в системе охлаждения установки осуществляется шаровым краном, установленным на ответвлении, который регулирует массовый расход воды через сис-

тему охлаждения генератора с выносным контуром и индуктором и сбрасывает излишек воды в верхний (расширительный) бак блока охлаждения. Шаровой кран установлен на лицевой панели блока охлаждения рядом с манометром.

В результате анализа конструкции системы охлаждения и рабочих органов и элементов комплекса индукционного нагрева на основе известных уравнений теории теплопроводности и теплопередачи [2; 3] разработана математическая модель системы водяного охлаждения комплекса индукционного нагрева технологического (КИТ), апробированная в режиме в режиме индукционной плавки, предполагающем максимальное тепловыделение и максимальные тепловые потоки, требующие диссипативного рассеивания блоком системы охлаждения.

При работе индуктора происходит его нагрев за счет прохождения через него тока, а также за счет теплового потока от расплавленных материалов в тигле. Приблизительно тепловые потери через цилиндрические стенки тигля можно определить по уравнению теплопроводности для цилиндрической стенки:

$$P_{\text{тн}} = 7,3 \cdot 10^{-3} \pi \lambda h \frac{T_{\text{вн}} - T_{\text{нар}}}{\ln \frac{D_{\text{н}}}{d_0}}, \quad (1)$$

где $D_{\text{н}}$, d_0 – наружный и внутренний диаметры тигля, м; $T_{\text{вн}}$, $T_{\text{нар}}$ – перепад температур в стенке тигля, °С; λ – коэффициент теплопроводности тигля, Вт/(м·град); h – толщина стенки тигля, м.

Полный тепловой поток в индукторе, который необходимо охлаждать водой, равен сумме тепловых потоков, включающих электрические и тепловые потери:

$$P_{\text{п.ох}} = P_{\text{и}} + P_{\text{т.п.}} \quad (2)$$

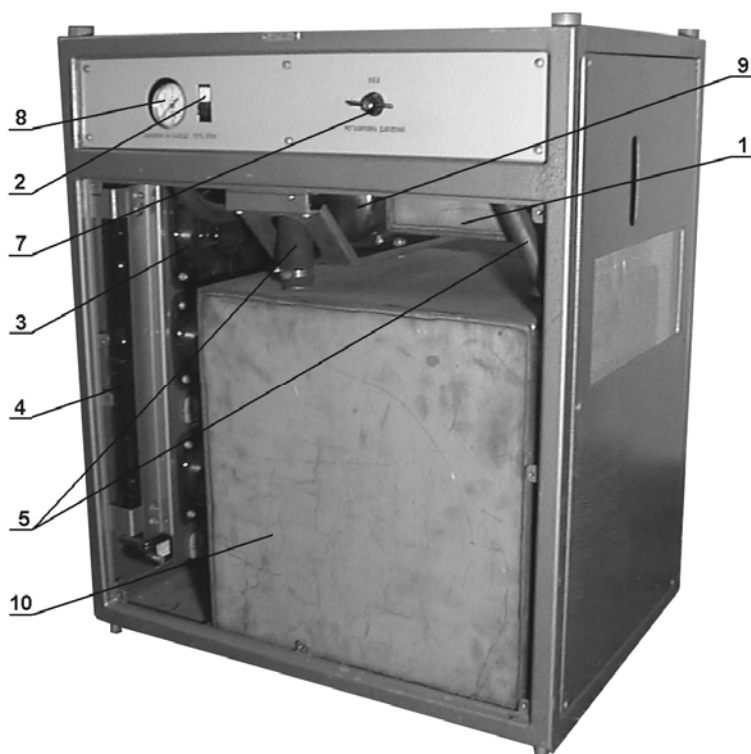


Рис. 1. Основные элементы конструкции блока охлаждения

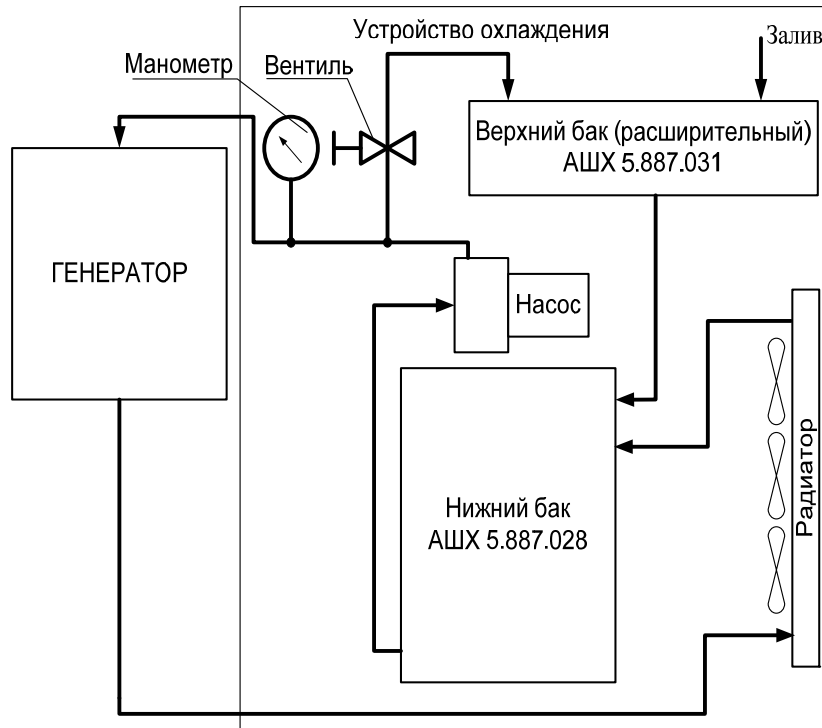


Рис. 2. Схема циркуляции воды в системе охлаждения

Температура охлаждающей воды на выходе из индуктора не должна превышать 35...45 °С, для предотвращения выпадения солей жесткости, а интервал ее изменения при этом составляет 20...30 градусов.

Потребное количество охлаждающей воды может быть определено по выражению:

$$G_{\text{охл}} = 0,859 \cdot \frac{P_{\text{п.ох}}}{T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{вх}}$, $T_{\text{вых}}$ – соответственно температура входящей и выходящей из индуктора охлаждающей воды, °С.

Для различных конфигураций индукторов необходимо проверить условия теплопередачи теплоты от индуктора к охлаждающей среде, рассчитав количество теплоты, отводимое от индуктора:

$$P_{\text{отв}} = \alpha_m F_{\text{охл}} (T_{\text{и}} - T_{\text{в}}), \quad (4)$$

где α_m – коэффициент теплоотдачи, кВт/(м²·°С); $F_{\text{охл}}$ – поверхность теплоотдачи индуктора, м²; $T_{\text{и}}$ – температура трубки индуктора, °С. Обычно принимают $T_{\text{и}} = 50$ °С. $T_{\text{в}}$ – средняя температура охлаждающей воды, °С. Коэффициент теплоотдачи α_m зависит от режима движения охлаждающей воды, который определяется числом Рейнольдса

$$Re = V_{\text{в}} \cdot d_{\text{т.э}} / \nu_{\text{в}}, \quad (5)$$

где $V_{\text{в}}$ – скорость движения охлаждающей воды, м/сек; $d_{\text{т.э}}$ – эквивалентный внутренний диаметр трубки индуктора, м; $\nu_{\text{в}}$ – коэффициент кинематической вязкости воды, м²/сек.

Реализация математической модели, применительно к описанной выше системе водяного охлаждения показала большой запас объема охлаждающей воды и габаритных размеров охлаждающего блока

даже на максимальных режимах работы КИТ при индукционной плавке.

Направление дальнейших исследований связано с оптимизацией конструкции системы охлаждения и введение в нее элементов автоматического регулирования скорости течения охлаждающей жидкости от требуемой стабильной температуры для осуществления функционального назначения используемого индукционного инструмента, соответственно для плавки, пайки или закалки.

Библиографические ссылки

1. Сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://www.geockb.ru/main/pages/products> (дата обращения: 12.05.2020).
2. Михеев М. А., Михеева И. М. Краткий курс теплопередачи. М.-Л. : Госэнергоиздат, 1960. 208 с.
3. Матюхин В. И. Конструкция и расчет индукционных тигельных печей : учеб. пособие. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2003. 61с.

References

1. [Electronic resource]. URL: <https://www.geockb.ru/main/pages/products> (access: 12.05.2020).
2. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. Short course of heat transfer. M.-L. : Gosenergoizdat, 1960. 208 p.
3. Matyukhin, V. I. Design and Calculation of Induction crucible Furnaces : textbook. Ekaterinburg : UGTU-UPI, 2003. 61 p.

© Ереско С. П., Ереско Т. Т., Ереско В. С., Фомин А. Г., 2020

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ АЛЮМИНИЯ МАРКИ А7
И СЛОИСТОГО КОМПОЗИТА АЛЮМИНИЙ/УГЛЕПЛАСТИК**

Ю. Ф. Иванов¹, С. П. Ереско^{2*}, А. А. Клопотов³, А. М. Устинов², Ю. А. Абзаев²

¹Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН
Российская Федерация, 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/3

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

³Томский государственный архитектурно-строительный университет
Российская Федерация, 634002, г. Томск, площадь Соляная, 2

*E-mail: eresko07@mail.ru

Авиакосмической отрасли значительное внимание уделяется исследованиям композитных материалов алюминиевые сплавы/углепластик. В данной работе представлены результаты исследования влияния облучения электронным пучком на механические свойства алюминия марки А7 и слоистого композита алюминий/углепластик при деформации растяжением.

Ключевые слова: алюминий А7, алюминий/ углепластик, облучение электронным пучком, механические свойства, деформация.

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ELECTRON BEAM IRRADIATION
ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF A7 GRADE ALUMINUM
AND A ALUMINUM /CARBON FIBER LAYERED COMPOSITE**

Yu. F. Ivanov¹, S. P. Eresko^{2*}, A. A. Klopotov³, A. M. Ustinov³, Yu. A. Abzaev¹

¹Institute of High Current Electronics (IHCE) of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
2/3 Akademicheskii Av., Tomsk, 634055, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

³Tomsk State University of Architecture and Building
2, Solyanaya Sq., Tomsk, 634002, Russian Federation

*E-mail: eresko07@mail.ru

The aerospace industry pays considerable attention to the research of composite materials aluminum alloys/carbon fiber. This paper presents the results of a study of the effect of electron beam irradiation on the mechanical properties of A7 grade aluminum and a layered aluminum/carbon fiber composite under tensile deformation.

Keywords: aluminum A7, aluminum/carbon fiber, electron beam irradiation, mechanical properties, deformation.

Введение. Современное развитие авиакосмической космической техники связано с активным созданием новых композитных материалов. В этом направлении перспективным является подход, направленный на снижение массы деталей с использованием полимерных композиционных материалов взамен металлических [1; 2].

При разработке корректных расчетных моделей, применяемых при проектировании конструкций из композитных слоистых материалов сплав/углепластик необходимы экспериментальные данные об эволюции распределений деформационных полей на поверхности углепластика при деформационных воздействиях. В настоящее время такие данные можно получить при in situ исследованиях полей перемещений и деформаций с использованием цифровой оптической системы Vic-3D Correlated Solutions [3; 4].

Целью настоящей работы является изучение влияния облучения электронным пучком на механические свойства и на распределение деформационных полей на поверхности алюминия марки А7 и слоистого композита алюминий/ углепластик при деформации растяжением.

Материал и методики исследования. Образцы двухсторонних лопаток с размерами рабочей части 17×9.6×3.8 мм изготовлены из алюминия марки А7. Композитные образцы алюминий/ углепластик были получены в результате приклеивания углеродной однонаправленной ткани FibARM Tare-200/30 на поверхность образцов алюминия марки А7. В качестве связующего был использован двухкомпонентный эпоксидный состав FibARM Resin 530+. Перед приклеиванием углеродной ткани на образцы поверхность алюминиевых пластин облучали с двух сторон

импульсным электронным пучком на установке «СОЛО» (ИСЭ СО РАН) при следующих параметрах: энергия электронов 18 кэВ, длительность импульса пучка электронов 150 мкс, количество импульсов 3, частота следования импульсов $0,3 \text{ с}^{-1}$, плотность энергии пучка электронов 15 и 25 Дж/см² [5].

Деформация образцов проводили на приборе «INSTRON 3386» при скорости растяжения 0,3 мм в минуту. Использование системы VIC-3D позволило получить данные о смещениях точек на поверхности образца в процессе его деформирования и определить относительные деформации (поперечная деформация ε_{xx} – по оси X, продольная деформация ε_{yy} – по оси Y).

Результаты исследования и их обсуждение. На рис. 1 и 2 приведены диаграммы деформирования $\sigma = f(\varepsilon)$ при растяжении исследуемых образцов.

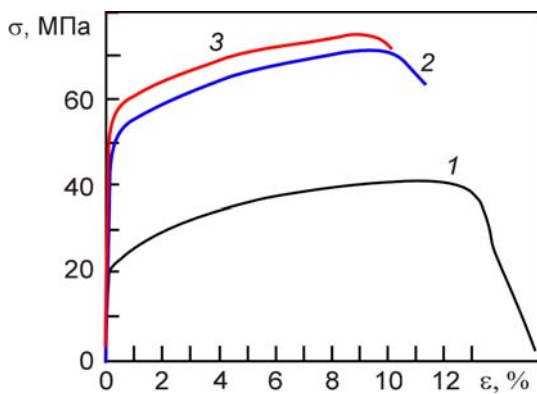


Рис. 1. Деформационные кривые растяжения образцов из алюминия марки А7:

1 – исходный образец; 2, 3 – образцы, подвергнутые облучению электронным пучком энергиями 15 Дж/см² и 25 Дж/см² соответственно

Видно, что облучение существенно меняет прочностные характеристики алюминиевых образцов (рис. 1, кривые 1–3).

Облучение поверхности алюминиевых образцов привело к значительному увеличению предела прочности σ_B от 40 МПа до 70 МПа с сохранением высокой пластичности.

Предел прочности σ_B композиционных материалов алюминий/углепластик почти в два раза выше соответствующих значений для облученных алюминиевых образцов и достигают значений порядка ~130 МПа (рис. 2).

Выявленные изменения механических свойств образцов проявляются в разном характере распределений деформационных полей на поверхности образцов (рис. 3).

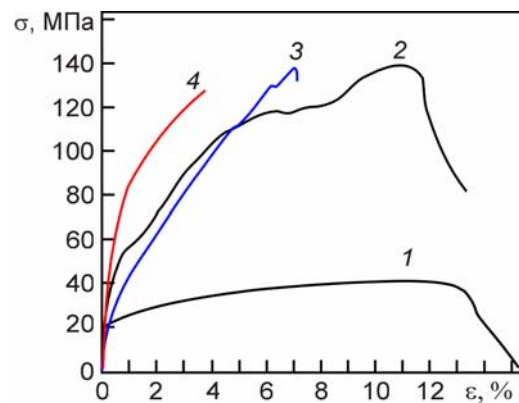


Рис. 2. Деформационные кривые растяжения образцов из алюминия марки А7 и композиционных материалов:

1 – исходный образец; 2 – композитный образец алюминий/углепластик; 3, 4 – композитные образцы с облученными перед изготовлением поверхностями электронными пучками с энергиями 15 Дж/см² и 25 Дж/см² соответственно

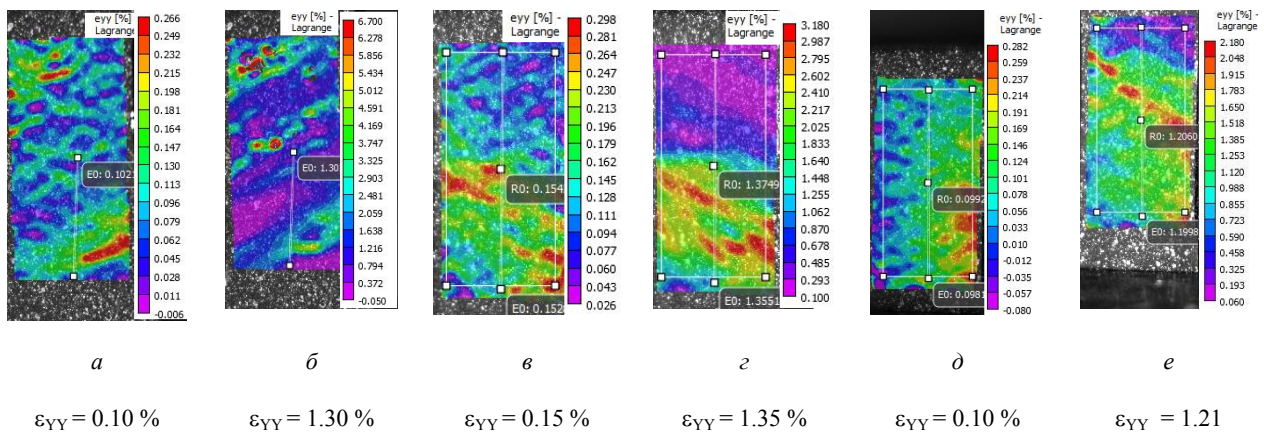


Fig. 3. Картины распределений продольных ε_{yy} относительных деформаций на поверхности исследуемых образцов при разных деформациях:

a, б – не облученный образец алюминия А7; в, г – образец алюминия А7, облученный электронным пучком энергией 25 Дж/см²; д, е – композитный образец алюминий/углепластик с облученной электронным пучком энергией 25 Дж/см² поверхностью алюминия перед приклеиванием углеродной ткани

Наглядно видно на картинах продольных ε_{yy} от-носительных деформаций на поверхности исследуемых образцов при деформации растяжением (см. рис. 3).

Библиографические ссылки

1. Каблов Е. Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. № 3. С. 10–15.

2. Jakubczak P., Bienias J. The collation of impact behaviour of titanium/carbon, aluminum/carbon and conventional carbon fibres laminate // *Thin-Walled Structures*. 2020. Vol. 155. P. 106952.

3. Sutton M. A., Orteu J. J., Schreier H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. University of South Carolina, Columbia, SC, USA, 2009. 364 p.

4. Investigation of deformation distribution in a round steel rod on the basis of mechanical tests using digital image correlation method / A. S. Plyaskin, A. I. Potekaev, A. A. Klopotov et. al. // *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 2051. P. 020238.

5. Enhanced Emission during Submillisecond Low Energy Electron Beam Generation in a Diode with Grid Stabilized Plasma Cathode and Open Anode Plasma Boundary / S. V. Grigor'ev, V. N. Devyatkov, N. N. Koval et. al. // *Techn. Phys. Lett.* 2010. № 2(36). P. 158–161.

References

1. Kablov E. N. [Modern materials – the basis of innovative modernization in Russia] // *Metals of Eurasia*. 2012. № 3. P. 1015.

2. Jakubczak P., Bienias J. The collation of impact behaviour of titanium/carbon, aluminum/carbon and conventional carbon fibres laminate // *Thin-Walled Structures*. 2020. Vol. 155. P. 106952.

3. Sutton M. A., Orteu J. J., Schreier H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. University of South Carolina, Columbia, SC, USA, 2009. 364 p.

4. Investigation of deformation distribution in a round steel rod on the basis of mechanical tests using digital image correlation method / A. S. Plyaskin, A. I. Potekaev, A. A. Klopotov et. al. // *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 2051. P. 020238.

5. Enhanced Emission during Submillisecond Low Energy Electron Beam Generation in a Diode with Grid Stabilized Plasma Cathode and Open Anode Plasma Boundary / S. V. Grigor'ev, V. N. Devyatkov, N. N. Koval et. al. // *Techn. Phys. Lett.* 2010. № 2(36). P. 158–161.

© Иванов Ю. Ф., Ереско С. П., Клопотов А. А., Устинов А. М., Абзаев Ю. А., 2020

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАРДАННОЙ ПЕРЕДАЧИ
ДЛЯ РАСЧЕТА СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ**

Е. В. Кукушкин

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

Представлена математическая модель карданной передачи, необходимая для расчета частот собственных колебаний, найдены частоты собственных колебаний карданной передачи для углов перекоса валов с 0 до 20 градусов, необходимые для определения нерезонансных условий работы карданной передачи.

Ключевые слова: математическая модель, карданная передача, собственные частоты колебаний.

**MATHEMATICAL MODEL OF THE TRANSFER CARDAN TRANSMISSION
FOR CALCULATION OF THE OWN FREQUENCIES OF VIBRATIONS**

E. V. Kukushkin

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

The paper presents a mathematical model of the cardan transmission, which is necessary for calculating the frequencies of natural vibrations, the frequencies of natural oscillations of the cardan transmission for the angles of misalignment of the shafts from 0 to 20 degrees are found, which are necessary to determine the non-resonant operating conditions of the cardan transmission.

Keywords: mathematical model, cardan transmission, natural vibration frequencies.

Для определения динамических параметров стенда для испытания карданных передач [1–3] необходимо определить частоты собственных колебаний всех агрегатов, входящих в механическую систему испытательного стенда [4–5]

Рассмотрим динамическую схему карданной передачи с двумя карданными шарнирами, как трехмассовую систему (рис. 1), где I_i – моменты инерции; c_i – жесткости соответствующих участков.

Система уравнений, описывающих свободные колебания будет иметь вид:

$$\begin{cases} I_1 \ddot{\varphi}_1 - c_1 (\varphi_1 - \varphi_2) = 0, \\ I_2 \ddot{\varphi}_2 + c_1 (\varphi_1 - \varphi_2) - c_2 (\varphi_2 - \varphi_3) = 0, \\ I_3 \ddot{\varphi}_3 + c_2 (\varphi_2 - \varphi_3) = 0. \end{cases}$$

Для определения собственных частот колебаний p подставим значения углов φ и их вторых производных:

$$\ddot{\varphi} = -a_i \cdot p^2 \cdot \cos(pt + \gamma)$$

получаем

$$\begin{cases} I_1 p^2 a_1 - c_1 (a_1 - a_2) = 0, \\ I_2 p^2 a_2 + c_1 (a_1 - a_2) - c_2 (a_2 - a_3) = 0, \\ I_3 p^2 a_3 + c_2 (a_2 - a_3) = 0. \end{cases}$$

Так как между φ_2 и φ_3 имеется кинематическое соотношение:

$$\omega_2 = S(\gamma, \varphi_1) \cdot \omega_1;$$

$$\omega_3 = S(\gamma, \varphi_2) \cdot \omega_2,$$

где

$$S(\gamma, \varphi_1) = \frac{\cos^2 \gamma \cdot (1 + \tan^2 \varphi_1)}{\cos^4 \gamma + \tan^2 \varphi_1};$$

$$S(\gamma, \varphi_2) = \frac{\cos^2 \gamma \cdot (1 + \tan^2 \varphi_2)}{\cos^4 \gamma + \tan^2 \varphi_2},$$

тогда получим соотношение:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{c_1 \cdot F(\gamma, \varphi_1)}{c_1 \cdot F(\gamma, \varphi_1) - I_1 p^2}$$

и

$$\frac{a_3}{a_2} = \frac{c_2 \cdot F(\gamma, \varphi_2)}{c_2 \cdot F(\gamma, \varphi_2) - I_3 p^2}$$

где

$$F(\gamma, \varphi_1) = \arctg(\tan \varphi_1 + \cos^2 \gamma),$$

$$F(\gamma, \varphi_2) = \arctg(\tan \varphi_2 + \cos^2 \gamma).$$

Найдем отношение амплитуд из первого и второго уравнений, получим уравнения четвертой степени для определения собственных частот:

$$p^4 - \left(\frac{c_1}{I_1} + \frac{c_2}{I_2} + \frac{c_1}{I_2} + \frac{c_2}{I_3} \right) p^2 + c_1 c_2 \left(\frac{1}{I_2 I_3} + \frac{1}{I_1 I_2} \right) = 0$$

с учетом кинематического соотношения получим:

$$p^4 - \left(\frac{c_1 \cdot \arctg(\tan \varphi_1 + \cos^2 \gamma)}{I_1} + \frac{c_2 \cdot \arctg(\tan \varphi_2 + \cos^2 \gamma)}{I_2} + \frac{c_1 \cdot \arctg(\tan \varphi_1 + \cos^2 \gamma)}{I_2} + \frac{c_2 \cdot \arctg(\tan \varphi_2 + \cos^2 \gamma)}{I_3} \right) p^2 + c_1 c_2 \left(\frac{1}{I_2 I_3} + \frac{1}{I_1 I_2} \right) = 0$$

$$\times p^2 + c_1 \cdot \arctg(\tan \varphi_1 + \cos^2 \gamma) c_2 \times \arctg(\tan \varphi_2 + \cos^2 \gamma) \left(\frac{1}{I_2 I_3} + \frac{1}{I_1 I_2} \right)$$

Подставляя значения, получаем графики зависимости углов перекоса валов карданной передачи от частоты собственных колебаний карданной передачи с двумя карданными шарнирами (см. рис. 2).

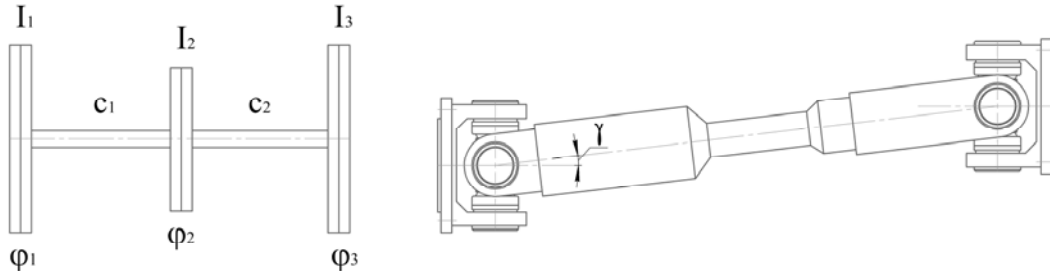
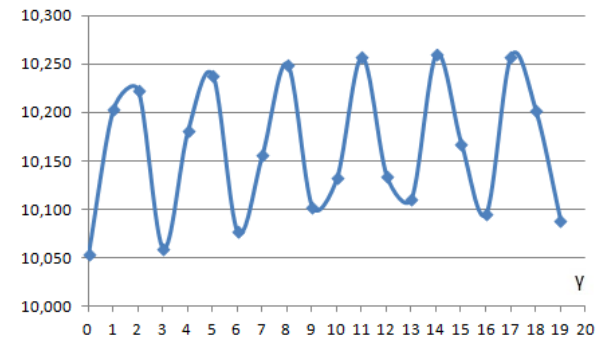
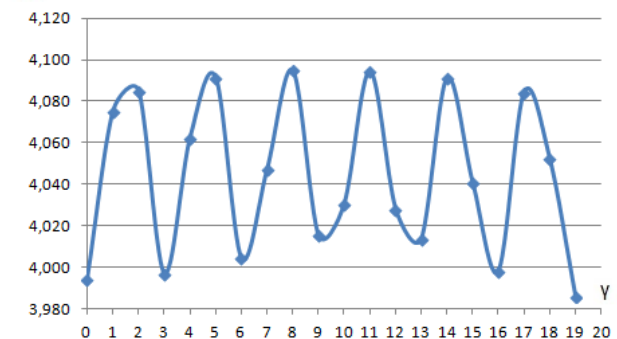


Рис. 1. Расчетная динамическая схема карданной передачи

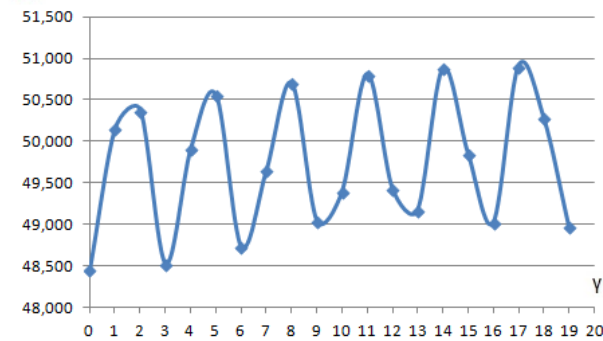
1 форма собственных колебаний



2 форма собственных колебаний



3 форма собственных колебаний



4 форма собственных колебаний

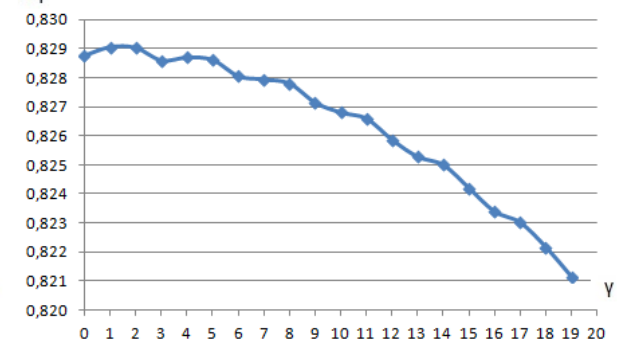


Рис. 2. Графики зависимости углов перекоса валов карданной передачи от частоты собственных колебаний карданной передачи с двумя карданными шарнирами

Зная собственные частоты колебаний и сравнивая их с вынужденными частотами колебаний системы, исключив их совпадения, получаем нерезонансные условия работы карданного шарнира, в том числе и для расчета нового типоразмерного ряда карданных шарниров [6].

Библиографические ссылки

1. Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А., Ереско Т. Т. Конструкция стенда для проведения испытаний карданных шарниров на игольчатых подшипниках / Решетневские чтения : материалы XIX Междунар. науч. конф. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2015. С. 337–339.
2. Пат. 162876 Российская Федерация, МПК7 G01M 13/02 (2006.01). Стенд для испытаний карданных передач / Ереско С. П., Ереско А. С., Ереско Т. Т., Ереско В. С., Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А., Стручков А. В. Хоменко И. И. № 2015157365 ; заяв. 30.12.2015 ; опубл. 27.06.2016. Бюл. № 18. 2 с.
3. 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.
4. Вульфсон И. И. Краткий курс теории механических колебаний. М. : ВНТР, 2017. 241 с.
5. Ванин В. А., Колодин А. Н., Однолько В. Г. Расчёт и исследование динамических характеристик приводов металлорежущих станков. Тамбов : ТГТУ. 2012. 120 с.
6. Кукушкин Е. В. Создание унифицированного параметрического ряда типоразмеров карданных шарниров неравных угловых скоростей // Транспорт.

Транспортные сооружения. Экология. 2019. № 4 С. 36–42.

References

1. Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A., Eresko T. T. [Booth design for testing universal joints with needle bearings] // *Reshetnevskie chteniya : materialy XIX mezhdunar. nauchnoy konf.* [Materials XV Intern. Scientific. Conf “Reshetnev reading”] ; Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2015. P. 337–339 (In Russ.).
2. Patent RF, no. 162876. *Stend dlya ispytaniya kardannykh peredach.* [The test stand driveline] / Eresko S. P., Eresko A. S., Eresko T. T., Eresko V. S., Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A., Struchkov A. V., Khomenko I. I. № 2015157365 ; zayav. 30.12.2015 ; opubl. 27.06.2016. Byul. № 18. 2 p.
3. Comparative analysis of structures test apparatus for universal joint] / S. P. Eresko, T. T. Eresko, E. V. Kukushkin et al. // *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologiy.* 2017. Vol. 18, № 4. P. 902–909 (In Russ.).
4. Vul'fson I. I. *Kratkiy kurs teorii mekhanicheskikh kolebaniy* [A short course in the theory of mechanical vibrations]. M. : VNTR Publ., 2017. 241 p.
5. Vanin V. A., Kolodin A. N., Odnol'ko V. G. *Raschet i issledovanie dinamicheskikh kharakteristik privodov metallovezhushchikh stankov* [Calculation and study of the dynamic characteristics of drives of metal-cutting machines]. Tambov : TGTU Publ., 2012. 120 p.
6. Kukushkin E. V. [Creation of a unified parametric series of standard sizes of cardan joints of unequal angular velocities] // *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya.* 2019. № 4. P. 36–42 (In Russ.).

© Кукушкин Е. В., 2020

УДК 621.22

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАРДАННОГО ШАРНИРА ДЛЯ РАСЧЕТА СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ

Е. В. Кукушкин

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

В работе представлена математическая модель карданного шарнира, необходимая для расчета частот собственных колебаний, найдены частоты собственных колебаний карданного шарнира для углов перекоса валов с 0 до 20 градусов, необходимые для определения нерезонансных условий работы карданного шарнира.

Ключевые слова: математическая модель, карданный шарнир, собственные частоты колебаний.

MATHEMATICAL MODEL OF THE TRANSFER CARDAN JOINT FOR CALCULATION OF THE OWN FREQUENCIES OF VIBRATIONS

E. V. Kukushkin

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

The paper presents a mathematical model of the universal joint, which is necessary for calculating the frequencies of natural vibrations, the frequencies of natural vibrations of the universal joint are found for the angles of misalignment of the shafts from 0 to 20 degrees, which are necessary to determine the non-resonant operating conditions of the universal joint.

Keywords: mathematical model, universal joint, natural vibration frequencies.

Для определения динамических параметров стэнда для испытания карданных передач [1–3] необходимо определить частоты собственных колебаний всех агрегатов, входящих в механическую систему испытательного стэнда [4–5]

Рассмотрим динамическую схему карданной передачи с одним карданным шарниром, как трехмассовую систему (рис. 1), где I_i – моменты инерции; c_i – жесткости соответствующих участков.

Система уравнений, описывающих свободные колебания будет иметь вид:

$$\begin{cases} I_1 \ddot{\varphi}_1 - c_1 (\varphi_1 - \varphi_2) = 0, \\ I_2 \ddot{\varphi}_2 + c_1 (\varphi_1 - \varphi_2) - c_2 (\varphi_2 - \varphi_3) = 0, \\ I_3 \ddot{\varphi}_3 + c_2 (\varphi_2 - \varphi_3) = 0. \end{cases}$$

Для определения собственных частот колебаний p подставим значения углов φ и их вторых производных:

$$\ddot{\varphi} = -a_i \cdot p^2 \cdot \cos(pt + \gamma)$$

получаем

$$\begin{cases} I_1 p^2 a_1 - c_1 (a_1 - a_2) = 0, \\ I_2 p^2 a_2 + c_1 (a_1 - a_2) - c_2 (a_2 - a_3) = 0, \\ I_3 p^2 a_3 + c_2 (a_2 - a_3) = 0. \end{cases}$$

Так как между φ_2 и φ_3 имеется кинематическое соотношение:

$$\omega_{\varphi_3} = S(\gamma, \varphi_2) \cdot \omega_{\varphi_2},$$

где

$$S(\gamma, \alpha) = \frac{\cos^2 \gamma \cdot (1 + \tan^2 \alpha)}{\cos^4 \gamma + \tan^2 \alpha}$$

тогда получим соотношение:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{c_1}{c_1 - I_1 p^2}$$

и

$$\frac{a_3}{a_2} = \frac{c_2 \cdot F(\gamma, \varphi_2)}{c_2 \cdot F(\gamma, \varphi_2) - I_3 p^2},$$

где

$$F(\gamma, \varphi_2) = \arctg(\tan \varphi_2 + \cos^2 \gamma).$$

Найдем отношение амплитуд из первого и второго уравнений, получим уравнения четвертой степени для определения собственных частот:

$$p^4 - \left(\frac{c_1}{I_1} + \frac{c_2}{I_2} + \frac{c_1}{I_2} + \frac{c_2}{I_3} \right) p^2 + c_1 c_2 \left(\frac{1}{I_2 I_3} + \frac{1}{I_1 I_2} \right) = 0$$

с учетом кинематического соотношения получим:

$$p^4 - \left[\frac{c_1}{I_1} + \frac{c_2 \cdot \arctg(\tan \varphi_2 + \cos^2 \gamma)}{I_2} + \frac{c_1}{I_2} + \frac{c_2 \cdot \arctg(\tan \varphi_2 + \cos^2 \gamma)}{I_3} \right] p^2 + c_1 c_2 \cdot \arctg(\tan \varphi_2 + \cos^2 \gamma) \left(\frac{1}{I_2 I_3} + \frac{1}{I_1 I_2} \right) = 0.$$

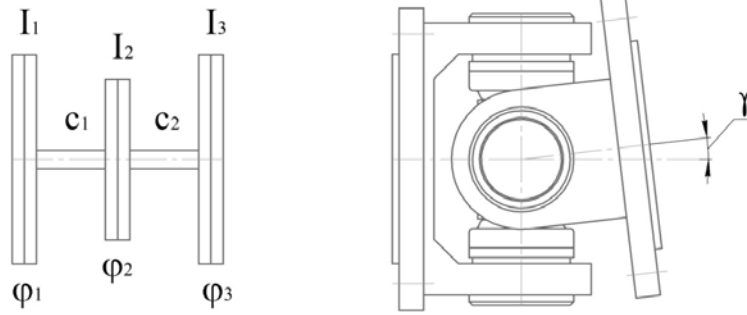


Рис. 1. Расчетная динамическая схема карданного шарнира

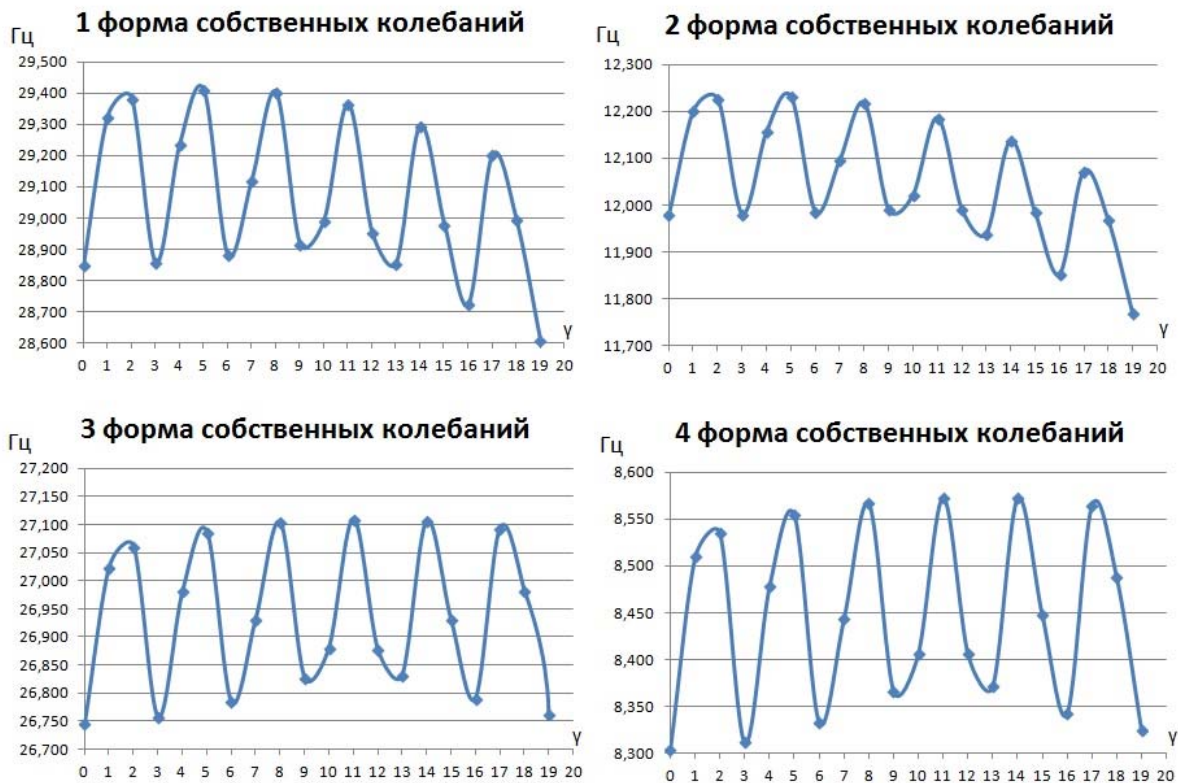


Рис. 2. Графики зависимости углов перекоса валов карданной передачи от частоты собственных колебаний карданной передачи с одним карданным шарниром

Подставляя значения, получаем графики зависимости углов перекоса валов карданной передачи от частоты собственных колебаний карданной передачи с одним карданным шарниром (рис. 2).

Зная собственные частоты колебаний и сравнивая их с вынужденными частотами колебаний системы, исключив их совпадения, получаем нерезонансные условия работы карданного шарнира, в том числе и для расчета нового типоразмерного ряда карданных шарниров [6].

Библиографические ссылки

1. Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А., Ереско Т. Т. Конструкция стенда для проведения испытаний карданных шарниров на игольчатых подшипниках / Решетневские чтения : материалы XIX Междунар.

науч. конф.; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2015. С. 337–339

2. Пат. 162876 Российская Федерация, МПК7 G01M 13/02 (2006.01). Стенд для испытаний карданных передач / Ереско С. П., Ереско А. С., Ереско Т. Т., Ереско В. С., Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А., Стручков А. В. Хоменко И. И. № 2015157365; заяв. 30.12.2015 ; Опубл. 27.06.2016. Бюл. № 18. 2 с

3. 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

4. Вульфсон И. И. Краткий курс теории механических колебаний. М. : ВНТР, 2017. 241 с.

5. Ванин В. А., Колодин А. Н., Однолько В. Г. Расчёт и исследование динамических характеристик приводов металлорежущих станков. Тамбов : ТГТУ. 2012. 120 с

6. Кукушкин Е. В. Создание унифицированного параметрического ряда типоразмеров карданных шарниров неравных угловых скоростей // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2019. № 4. С. 36–42.

References

1. Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A., Eresko T. T. [Booth design for testing universal joints with needle bearings] // *Reshetnevskie chteniya : materialy XIX mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Materials XV Intern. Scientific. Conf “Reshetnev reading”] / Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2015, P. 337–339 (In Russ.)

2. Eresko S. P., Eresko A. S., Eresko T. T., Eresko V. S., Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A., Struchkov A. V., Khomenko I. I. *Stend dlya ispytaniya kardannykh*

peredach. [The test stand driveline]. *Patent RF*, № 162876, 2016.

3. Comparative analysis of structures test apparatus for universal joint / S. P. Eresko, T. T. Eresko, E. V. Kukushkin et al. // *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii*. 2017. Vol. 18, № 4. P. 902–909. (In Russ.)

4. Vul'fson I. I. *Kratkiy kurs teorii mekhanicheskikh kolebaniy* [A short course in the theory of mechanical vibrations]. M. : VNTR Publ., 2017. 241 p.

5. Vanin V. A., Kolodin A. N., Odnol'ko V. G. *Raschet i issledovanie dinamicheskikh kharakteristik privodov metallovezhushchikh stankov* [Calculation and study of the dynamic characteristics of drives of metal-cutting machines] Tambov : TGTU Publ., 2012. 120 p.

6. Kukushkin E. V. [Creation of a unified parametric series of standard sizes of cardan joints of unequal angular velocities] // *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2019. № 4. P. 36–42. (In Russ.)

© Кукушкин Е. В., 2020

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАМЕТРА ПАРОВОГО ПУЗЫРЯ ПРИ РЕКТИФИКАЦИИ

А. В. Кустов*, В. М. Корнев, В. Г. Межов, А. А. Бальцер, Д. Ф. Фиц

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

Рассматривается вопрос определения диаметра парового пузыря, образующегося на вихревой ректификационной ступени при переработке растительного сырья.

Ключевые слова: ректификация, газосодержание, удельная межфазная поверхность.

STUDY OF INFLUENCE OF FORCES IN THE DIAMETER STEAM BUBBLES ON VORTEX STAGE AT RECTIFICATION

A. V. Kustov, V. M. Kornev, V. G. Mezhov, A. A. Baltser, D. F. Fits

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

This article is deals with the question of determining the diameter of the steam bubble formed on Vortex distillation stages. The famous formula is determining the diameter of bubbles taken into account influence of inertial forces generated by the work of rectifying column by spinning the gas-liquid contact layer on the stage.

Keywords: rectifying, gas content, specific surface.

Введение. Анализ возможных путей интенсификации массообмена в системе газ-жидкость показывает, что использование для проведения этих процессов конструкций барботажных аппаратов не обеспечивает существенного повышения производительности и эффективности. В связи с этим, применение центробежного ускорения является наиболее простым способом интенсификации массообмена. Вращение потока способствует дроблению пузырьков пара на ступени и предотвращает капельный унос, за счет действия инерции.

В виду вышесказанного для определения диаметра пузыря был использован известный процесс диспергирования, который рассматривают также с позиций гидродинамической неустойчивости, исходя из которой получено [1; 2]

$$d_n = 3,48 \cdot \left(\frac{\sigma^3}{c_T^3 \cdot \rho^3 \cdot \varepsilon_0} \right)^{1/5}, \quad (1)$$

где ε_0 – диссипация энергии в единице массы сплошной среды, Вт/кг; ρ – плотность жидкости, кг/м³; c_T – коэффициент сопротивления.

Диссипация энергии, входящая в уравнение (1), рассчитывалась по формуле $\varepsilon = E_{вн}/m$.

В предположении, что диссипация энергии происходит за счет внешнего трения о стенки и дно ступени ($E_{внеш}$) и внутреннего трения слоев жидкости и пузырьков газа ($E_{вн}$), можно записать [1; 4]

$$E_{вн} = Q_{г} \rho_{г} \frac{u_{г}^2}{2} + Q_{ж} \rho_{ж} H_{ж} g - Q_{г-ж} \rho_{г-ж} H_{г-ж} g - J \frac{w^2}{2} - \tau_{г-ж} f R w, \quad (2)$$

где $Q_{г}$, $Q_{ж}$, $Q_{г-ж}$ – расходы газа (пара), жидкости и газо-жидкостной смеси, соответственно, м³/с; $\rho_{г}$, $\rho_{ж}$, $\rho_{г-ж}$ – плотность газа (пара), жидкости и газо-жидкостной смеси, соответственно, кг/м³; $u_{г}$ – скорость газа, м/с; H_0 – высота столба жидкости, м; H – высота газо-жидкостного столба, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; w – угловая скорость вращения газо-жидкостной смеси, с⁻¹; $\tau_{г-ж}$ – касательные напряжения на границе контакта жидкости и газа, Па; f – площадь контакта, м²; R_s – радиус завихрителя, м.

Сравнение экспериментальных и расчетных значений диаметра газового пузыря представлено на рис. 1, 2. Сплошная линия на рисунке – значение диаметра пузыря с учетом мощности, создаваемой силой инерции.

Расчетные значения диаметра пузырьков газа, проведенные по изложенной методике, имеют большую величину (рис. 1, пунктирная линия) в сравнении с опытными. Это позволяет предположить, что дробление пузырьков газа на ступени обеспечивается не только силами внутреннего трения между вращающимися газо-жидкостными слоями, но и за счет давления, вызванного силами инерции. Исходя из общей зависимости для мощности:

$$N = F \cdot v, \quad (3)$$

где F – действующая сила, Н; v – скорость, м/с.

Можно определить величину энергии, создаваемой силой инерции:

$$N = m \cdot \omega^3 \cdot R^2, \quad (4)$$

где m – масса жидкости на контактной ступени, кг; R – радиус завихрителя, м; ω – угловая скорость газожидкостного слоя, с^{-1} .

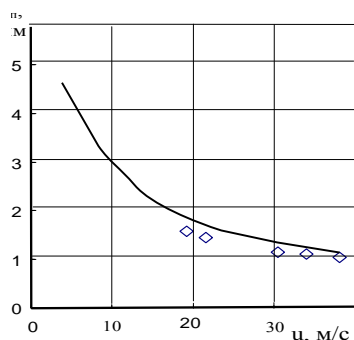


Рис. 1. Зависимость среднеповерхностного диаметра пузыря от скорости газа в каналах тангенциального завихрителя. Экспериментальные точки: $D = 330$ мм, $\delta_0 = 15$ мм, $l = 15$ мм, $n = 8$ шт, $V = 2$ л. Сплошная линия – расчет по уравнению (2)

Как видно, учет мощности, создаваемой силой инерции (зависимость (4)) в выражении (2) позволяет приблизить расчетные значения диаметра пузыря к экспериментальным.

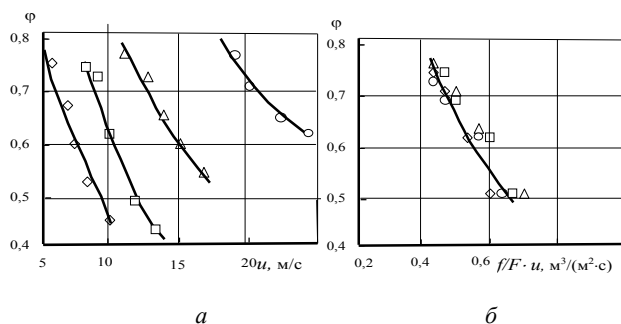


Рис. 2. Зависимости газосодержания от скорости газа в каналах (а) и параметра f/F (б) при $R_3 = 44$ мм, $D_c = 110$ мм, $V = 200$ мл на системе этиловый спирт-вода: $\diamond - f/F = 0,089$; $\square - 0,04$; $\Delta - 0,032$; $\circ - 0,022$.

Заключение. Полученная зависимость для определения диаметра парового пузыря, предложенная

в данной статье, позволяет приблизить расчетные значения к экспериментальным. Это, в свою очередь, дает возможность более точно подходить к расчету ректификационных колонн, применяемых при получении и очистки этапола, получаемого на основе гидролизата растительного сырья.

Библиографические ссылки

1. Войнов Н. А., Кустов А. В., Николаев Н. А. Получение безводного этанола при ректификации под вакуумом // Хвойные boreальной зоны. 2012. № 3–4. С. 373–378.
2. Войнов Н. А., Николаев Н. А., Кустов А. В. Гидродинамика и массообмен в вихревой ректификационной колонне // Химическая промышленность. 2008. Т. 85, № 8. С. 413–419.
3. Кустов А. В. Гидродинамика и массообмен на вихревых ректификационных ступенях при переработке растительного сырья : автореф. дис. ... канд. техн. наук ; 05.21.03. Красноярск : СибГТУ, 2010.
4. Voinov N. A., Nikolaev N. A., Kustov A. V. Hydrodynamics and mass exchange in vortex rectifying column // Russian Journal of Applied Chemistry. 2009. T. 82, № 4. С. 730–735.

References

1. Voinov N. A. Kustov A. V., Nikalaev N. A. Poluchenie bezvodnogo etanola pri rektifikacii pod vakuumom [Preparation of anhydrous ethanol under vacuum distillation] // Hvoynye borealnoy zony. 2012. № 3–4. P. 373–378.
2. Voinov N. A., Nikolaev N. A., Kustov A. V. Gidrodinamika i massoobmen v vihrevoj rektifikacionnoy kollone [Hydrodynamics and mass transfer in a vortex distillation column] // Chemical industry. 2008. Vol. 85, № 8. P.413–419.
3. Kustov A. V. Gidrodinamika i massoobmen na vihrevuh rektifikacionnyh stupenyah pri pererabotke rastitelnogo surya [Hydrodynamics and mass transfer in the vortex of distillation steps in the processing of vegetable raw materials] : Abstract of thesis of Candidate of Science ; 05.21.03. Krasnoyarsk : SibGTU, 2010. 22 pp.
4. Voinov N. A., Nikolaev N. A., Kustov A. V. Hydrodynamics and mass exchange in vortex rectifying column // Russian Journal of Applied Chemistry. 2009. Vol. 82, № 4. P. 730–735.

© Кустов А. В., Корнев В. М., Межов В. Г., Бальцер А., Фиц Д. Ф., 2020

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ УЗЛОВ

С. И. Пономарев, С. П. Ереско

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

Приведены результаты разработки методов информационного обеспечения управления технологическими процессами, включая разработку алгоритма для проведения анализа данных информационного массива и создание базы данных существующих режимов диффузионной сварки разнородных материалов с керамикой и между собой.

Ключевые слова: алгоритм для проведения анализа данных, компьютерное проектирование технологическими процессами.

AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR MANUFACTURING CERAMIC UNITS

S. I. Ponomarev, S. P. Eresko

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

The article presents the results of the development of methods for information support of technological processes control, including the development of an algorithm for analyzing the data of the information array and the creation of a database of existing modes of diffusion welding of dissimilar materials with ceramics and among themselves.

Keywords: algorithm for data analysis, computer design by technological processes.

При создании аэрокосмической техники большую значимость приобретает использование информационных технологий при решении проблем повышения качества изготовления деталей машин и приборов, сокращения сроков и издержек аэрокосмического производства. Задачи сокращения трудоемкости и сроков проектирования, уменьшения себестоимости изготовления деталей и узлов, объема проектной документации и повышения качества производства позволяют решить современные подходы в области информационного обеспечения создания автоматизированных технологических процессов.

В Сибирском государственном университете науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева проводятся исследования по получению соединения жаропрочных материалов с высокотемпературной керамикой применительно к ротору турбины турбонасосного агрегата и разработка методов эффективной организации и ведения специализированного информационного обеспечения автоматизированных систем управления технологическими процессами включая базы данных и методы их оптимизации. При создании системы автоматического проектирования технологии изготовления металлокерамических узлов был разработан алгоритм для проведения анализа данных информационного массива и проведения поиска параметров в созданном массиве.

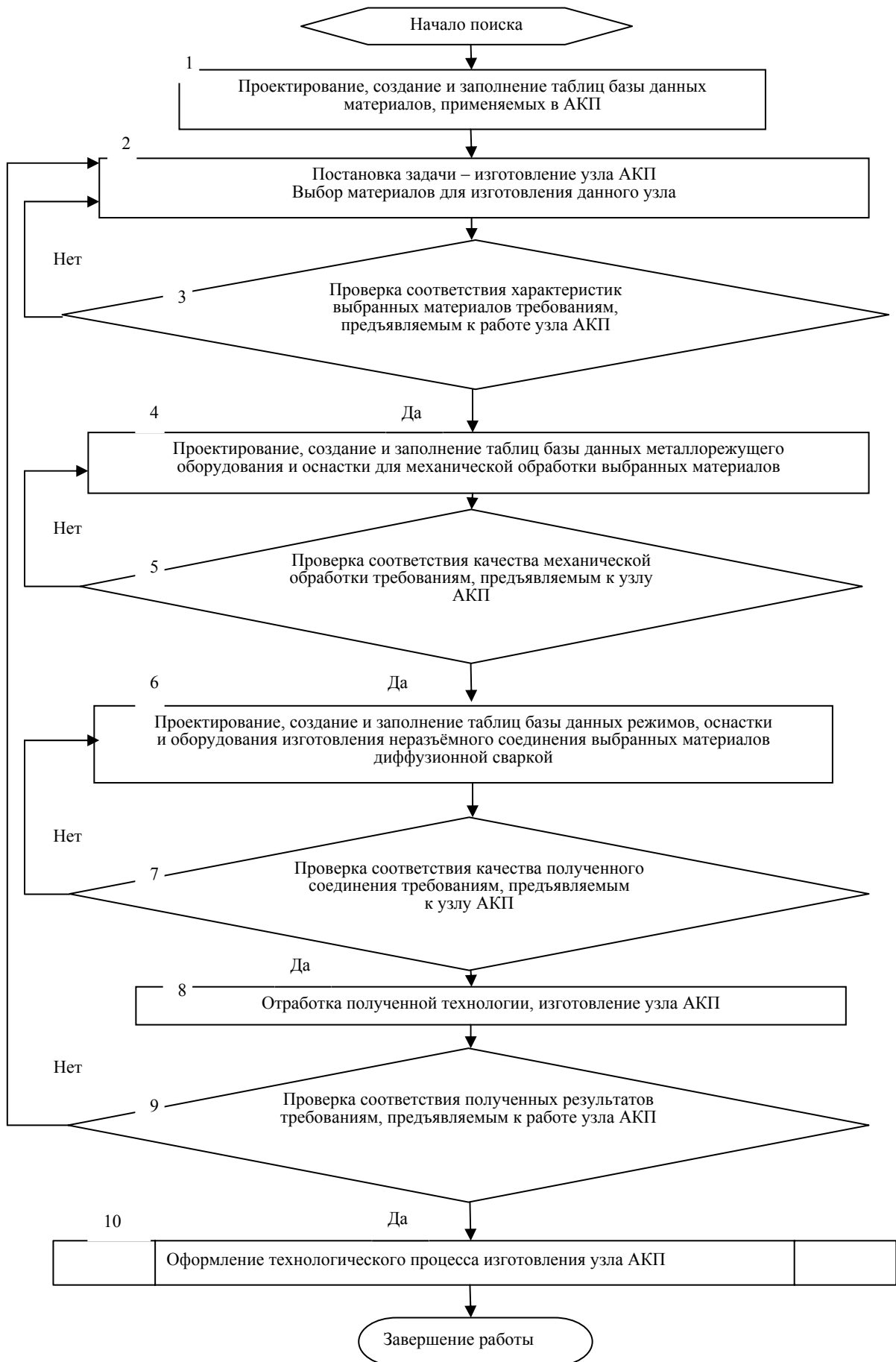
Для реализации этого были решены следующие задачи:

- разработана структура таблиц базы данных;
- произведено наполнение таблиц базы данных;
- разработан алгоритм реализации поиска и вывода результатов по запросам пользователя (см. рисунок).

Проведён обзор материалов, применяемых для изготовления деталей и узлов аэрокосмического производства ведущими российскими и зарубежными предприятиями. По результатам обзора была создана база данных материалов, в том числе и керамических, применяемых для изготовления деталей аэрокосмического производства [1].

Создана база данных технологического оборудования, инструмента и приспособлений для механической обработки деталей аэрокосмического производства [2].

При проектировании технологических процессов для создания системы поддержки принятия решений созданы база данных существующих режимов диффузионной сварки разнородных материалов с керамикой и между собой [1] и база данных существующего технологического оборудования [2]. Разработанная методика системы автоматизированного проектирования технологических процессов изготовления деталей и узлов отработана на разработке технологии изготовления металлокерамического узла – ротора турбины турбонасосного агрегата.



При проведении исследований:

- отработана технология получения неразъёмных соединений на образцах-имитаторах;
- спроектирована установка для отработки технологии изготовления металлокерамического соединения на образцах-имитаторах;
- проведена оптимизация технологии методом математического моделирования;
- составлено уравнение регрессии, показывающее влияние параметров сварки на качество соединения;
- исследована структура зоны контакта поверхностей полученного соединения;
- спроектированы приспособления для изготовления металлокерамического узла – ротора турбины.

Полученные результаты исследований зафиксированы в патентах [3; 4].

В настоящее время в Сибирском государственном университете науки и технологий проводятся исследования по получению металлокерамических узлов, применяемых в аэрокосмическом производстве.

Библиографические ссылки

1. Пономарев С. И., Ереско С. П., Ереско Т. Т. Атрибутивная база данных для создания технологических процессов получения деталей аэрокосмического производства диффузионной сваркой : свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2013621572 ; опубл. 20.01.2014. Бюл. № 1.
2. Пономарёв С. И., Ручкин Л. В., Ручкина Н. Л., Атрибутивная база данных технологического оборудования, инструмента и приспособлений для механической обработки деталей аэрокосмического производства : свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620691 ; опубл. 20.06.2014. Бюл. № 6.
3. Пат. России № 93722. Установка для получения металлокерамических изделий / Пономарев С. И., Ереско С. П., Ереско Т. Т. Опубл. 10.05.2010. Бюл. № 13.
4. Пат. России № 2433026. Способ соединения жаропрочного сплава на кобальтовой основе с керамикой на основе нитрида кремния / Пономарев С. И., Прокопьев С. В., Ереско С. П., Ереско Т. Т. Опубл. 10.11.2011. Бюл. № 31.

References

1. Ponomarev S. I., Eresko S. P., Eresko T. T. Atributivnaya baza dannykh dlya sozdaniya tekhnologicheskikh protsessov polucheniya detaley aerokosmicheskogo proizvodstva diffuzionnoy svarkoy : svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 2013621572. Opubl. 20.01.2014. Byul. № 1.
2. Ponomarev S. I., Ruchkin L. V., Ruchkina N. L. Atributivnaya baza dannykh tekhnologicheskogo oborudovaniya, instrumenta i prispособleniy dlya mekhanicheskoy obrabotki detaley aerokosmicheskogo proizvodstva : svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dan-nykh № 2014620691. Opubl. 20.06.2014. Byul. № 6.
3. Pat. Rossii № 93722. Ustanovka dlya polucheniya metallokeramiche-skikh izdeliy / Ponomarev S. I., Eresko S. P., Eresko T. T. Opubl. 10.05.2010. Byul. № 13.
4. Pat. Rossii № 2433026. Sposob soedineniya zharo-prochnogo splava na kopal'tovoy osnove s keramikoy na osnove nitrida kremniya / Ponomarev S. I., Prokop'ev S. V., Eresko S. P., Eresko T. T. Opubl. 10.11.2011. Byul. № 31.

© Пономарев С. И., Ереско С. П., 2020

УДК 629.36

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ТРАНСМИССИЙ БУЛЬДОЗЕРА ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

А. В. Стручков, А. А. Климов

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

Приведены методика и анализ результатов экспериментальных исследований проведенных на промышленном тракторе с энергонасыщенностью 14,8 кВт/т с механической и гидромеханической трансмиссиями с целью получения количественной оценки динамической нагруженности трансмиссии при экстремальных режимах работы. Показаны графические зависимости полученных в результате экспериментальных исследований коэффициентов динамичности в зависимости от уровня энергонасыщенности для механической и гидромеханической трансмиссий и от рабочих скоростей бульдозирования для механической и гидромеханической трансмиссий.

Ключевые слова: динамическая нагруженность, коэффициент динамичности, энергонасыщенность, механическая и гидромеханическая трансмиссии, бульдозирование.

STUDY OF TRANSMISSION LOADING OF EXPERIMENTAL TRACTOR IN PROCESS OF EXTREME OPERATING MODES

A. V. Struchkov, A. A. Klimov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: str-alex-v@mail.ru

The article presents the methodology and analysis of the results of experimental studies carried out on an industrial tractor with an energy saturation of 14.8 kW/t with mechanical and hydromechanical transmissions in order to obtain a quantitative assessment of the dynamic load of the tractor transmission in extreme operating modes. Graphical dependencies of dynamic coefficients obtained as a result of experimental studies are shown depending on the level of energy saturation for mechanical and hydromechanical transmissions and on working speeds of bulldozing for mechanical and hydromechanical transmissions.

Keywords: dynamic loading, dynamic coefficient, energy saturation, mechanical and hydromechanical transmission, bulldozing.

Эффективность бульдозерно-рыхлительного агрегата в значительной степени определяется тягово-динамическими показателями базового трактора. Научный и практический интерес представляет изучение тяговой динамики агрегатов не только при характерных режимах эксплуатации и принятой в практике технологии работ, но и при экстремальных режимах работы [1; 2; 3; 4].

В процессе экспериментальных исследований бульдозерного агрегата решался большой комплекс задач по тяговой динамике трактора и динамической нагруженности трансмиссии [5]. В результате были получены осциллограммы силовых параметров нагруженности трансмиссий – крюковых усилий и крутящих моментов двигателя (МТ) и турбины ГТР (ГМТ) на режимах резания и транспортирования грунтов на третьей передаче, обеспечивающей максимальную производительность, а так же, в режиме разгона и при резком внедрении отвала. Полученные осциллограммы обработаны с использованием аппарата математической статистики двумя методами – ординатным методом и методом экстремумов.

Для оценки динамической нагруженности в условиях экстремальных отклонений в режиме работы (разгон под нагрузкой, резкое внедрение отвала бульдозера в грунт) использовался коэффициент динамичности:

$$K_{\text{дин}} = A_{\text{max}} / A_{\text{ср}},$$

где A_{max} – максимальное значение крутящего момента в трансмиссии; $A_{\text{ср}}$ – среднестатистическое значение амплитуды регулярных колебаний.

Анализ полученных данных показал, что по всем передачам и уровням энергонасыщенности коэффициенты динамичности в механической трансмиссии от 4 % до 44 % выше, чем в гидромеханической трансмиссии, что определено значительно меньшим моментом инерции на переднем конце трансмиссионного валопровода и более плавного изменения момента сопротивления в процессе бульдозирования.

Наиболее оптимальным является уровень энергонасыщенности равный 11,5 кВт/т (рис. 1). При меньшей энергонасыщенности недостаток мощности двигателя приводит к частым перегрузкам трактора и, как, следствие нарушениям технологических режимов

бульдозирования – остановкам, разгонам с призмой грунта, излишних врезаниях при наборе грунта и т. д. При большей энергонасыщенности снижается управляемость, и как следствие повышается динамичность.

С повышением рабочих скоростей динамические нагрузки от самопроизвольных внедрений отвала

бульдозера в грунт пропорционально увеличению скоростей снижаются за счет увеличения инерционных сил движения агрегата, которые обеспечивают лучшее преодоление сил сопротивления, с одной стороны и повышение скорости движения ограничивает время врезания с другой стороны (рис. 2).

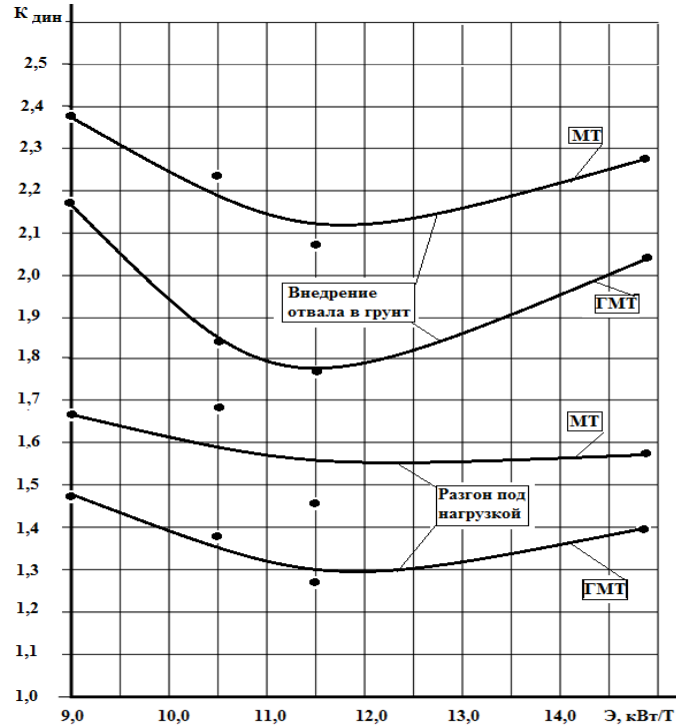


Рис. 1. Графики изменения средних по передачам коэффициентов динамичности в зависимости от уровня энергонасыщенности для механической и гидромеханической трансмиссий

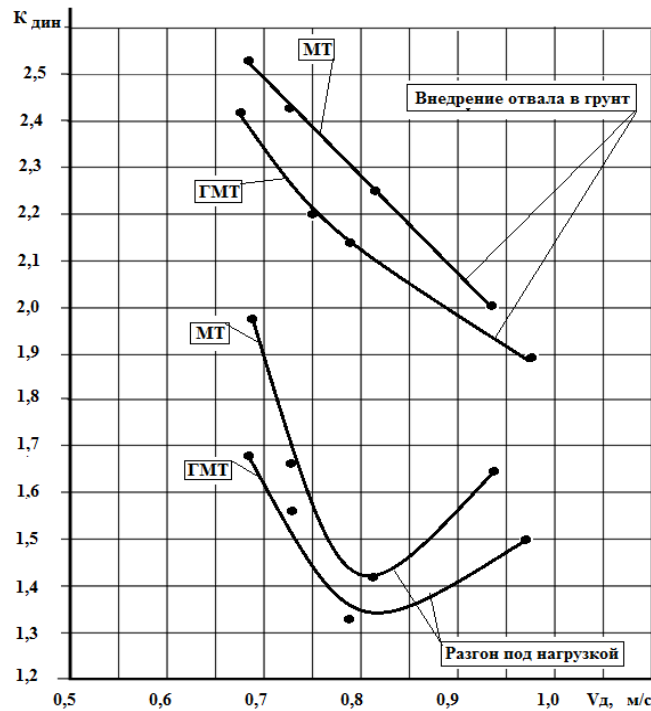


Рис. 2. Графики изменения коэффициентов динамичности в зависимости от рабочих скоростей бульдозирования для механической и гидромеханической трансмиссий

Графики изменения коэффициентов динамичности от разгона под нагрузкой однозначно показывают, что рабочие скорости имеют технологический предел, составляющий около 8 м/с, превышение которого приводит к нарушению управляемости бульдозером.

По результатам исследования экстремальных нагрузочных режимов можно сделать следующие выводы:

1. Коэффициенты динамичности при экстремальных режимах работы могут достигать величины 2,54.

2. Коэффициенты динамичности при экстремальных режимах работы в механической трансмиссии на 4–44 % выше, чем в гидромеханической трансмиссии за счет значительно большего момента инерции на переднем конце трансмиссионного валопровода и более жесткого приложения момента сопротивления на заднем конце валопровода.

3. Оптимальный уровень энергонасыщенности с точки зрения развития максимальных амплитуд в трансмиссии составил 11,5 кВт/т.

Библиографические ссылки

1. Сафронов В. П., Сафронов В. В., Сидорков А. А. Способ повышения производительности бульдозерно-рыхлительного агрегата // Известия ТулГУ. Науки о земле. Вып. 1. Тула. 2012. С. 127–135.

2. Шеховцов В. В., Ляшенко М. В. Оптимизация динамической нагруженности силовой передачи трактора ВТ-100 // Справочник. Инженерный журнал. 2008. № 7. С. 28–33.

3. Шеховцов В. В. Анализ и синтез динамических характеристик автотракторных силовых передач

и средств для их испытания. Волгоград : Политехник, 2004. 224 с.

4. Shalfer P. M., Winter I. A. Hydraulic torque converter, its. Effect on the power train // SAE, Transactions. 1983. Vol. 61.

5. Стручков А. В. Исследование и совершенствование элементов гидромеханической трансмиссии гусеничного бульдозера : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.02., 05.05.04. Красноярск, 2009. 179 с.

References

1. Safronov V. P., Safronov V. V., Sidorkov A. A. Method for increasing the productivity of a bulldozer-ripper // Izvestia TulSU. Earth science. Issue. 1. Tula. 2012. P. 127–135.

2. Shekhovtsov V. V., Lyashenko M. V. Optimization of the dynamic loading of the power transmission of the tractor ВТ-100 // Handbook. Engineering Journal. 2008. No. 7. P. 28–33.

3. Shekhovtsov V. V. Analysis and synthesis of the dynamic characteristics of autotractor power transmissions and means for their testing. Volgograd : Polytechnic, 2004. 224 p.

4. Shalfer P. M., Winter I. A. Hydraulic torque converter, its. Effect on the power train // SAE, Transactions. 1983. Vol. 61.

5. Struchkov A. V. Research and improvement of the elements of the hydromechanical transmission of the caterpillar bulldozer : dis. ... edging. techn. sciences : 05.02.02., 05.05.04. Krasnoyarsk, 2009. 179 p.

© Стручков А. В., Климов А. А., 2020

СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РЕФЛЕКТОРА ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

М. А. Дремухин¹, В. Н. Наговицин^{1,2}

¹Политехнический институт «Сибирский федеральный университет»
Межинститутская базовая кафедра «Прикладная физика и космические технологии»
Российская Федерация, 662971, г. Железногорск Красноярского края, ул. Кирова, 12а

²Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: d-max_70@mail.ru

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

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

METHOD FOR PRODUCING REFLECTOR ELEMENTS FROM POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS

M. A. Dremukhin¹, V. N. Nagovitsin^{1,2}

¹Polytechnic Institute "Siberian Federal University"
The interinstitutional base Department "Applied Physics and Space Technologies"
12a, Kirov Str., Krasnoyarsk region, Zheleznogorsk, 662971, Russian Federation

²Joint-Stock Company "Academician M. F. Reshetnev" Information Satellite Systems"
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
E-mail: d-max_70@mail.ru

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

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

Спутниковая связь является быстро развивающимся направлением науки и техники. Несмотря на внедрение оптоволоконных линий, спутниковые системы связи продолжают играть важную роль в качестве существенного дополнения к наземным первичным сетям связи, особенно в трудно доступных районах планеты, используемые для приёма или передачи радиосигналов между наземными станциями и искусственными спутниками Земли. Наиболее сложным элементом спутниковой антенны является рефлектор, от качества выполнения которого, напрямую зависит работа всей антенной системы. Требования, предъявляемые к наземным антенным системам, вынуждают прибегать к использованию самых современных конструкций, технологий и материалов. Для четкой передачи радиосигналов без помех и увеличения пропускной способности антенны при работе в сантиметровом диапазоне, необходимо увеличивать диаметр антенн, что непосредственно ведет к увеличению массы рефлектора.

На данный момент в космической промышленности широкое распространение получили полимерные композиционные материалы (ПКМ), состоящие из армирующих волокон и полимерных матриц. Это

обусловлено тем, что ПКМ обладают такими свойствами, как коррозионная стойкость, высокая прочность и легкость, стабильность размеров, минимальное поглощение влаги, возможность подбора оптимальных соотношений связующего компонента и матрицы, выбора оптимального режима отверждения, и возможность изготовления изделий сложной формы [1].

Таким образом, одной из актуальных задач в настоящее время становится разработка рациональной конструкции и внедрение технологического процесса изготовления рефлектора из ПКМ (см. рисунок).

При изготовлении конструкции из композиционного материала совершенство технологии определяется техническим уровнем используемого оборудования и оснастки, наличием надежных методов неразрушающего контроля, конструкции и полуфабрикатов для ее производства. Как правило, матрицей для армированных углепластиков являются термореактивные связующие на эпоксидной основе. Эти связующие обладают низкой химической усадкой и гарантируют получение полимерных композитов с наиболее высокими упруго-прочностными свойствами, методом вакуумного формования с использованием технологического приспособления.



Рефлектор из полимерных композиционных материалов

Данный метод позволяет выполнить полимеризацию изделия за один технологический цикл – это выкладка всех материалов в сыром виде на оснастку и отверждение связующего компонента при высоких температурах в вакууме, что позволяет на их основе изготавливать размеростабильные элементы, разных геометрических форм и размеров [2]. Необходимые условия для полимеризации изделия в вакууме можно создать с помощью специального оборудования, в автоклаве или термокамере.

В общем виде, способ изготовления изделий из ПКМ включает следующие этапы:

1. Подготовили и обезжирили рабочую поверхность оснастки, нанесли на нее разделительный слой.

2. Произвели точный раскрой заготовок по программе, при помощи специализированного режущего станка.

3. Выполнили нагрев поверхности оснастки, при температуре от 40°C до 80°C, в зависимости от применяемого связующего компонента.

4. Произвели послойную выкладку заготовок (препрегов) зеркальной обшивки на поверхность подогретой оснастки, строго определенным образом, чередуя слои относительно друг друга.

5. Нанесли клеевой слой на поверхность заготовки.

6. Установили сотовый наполнитель по заданной схеме.

7. Нанесли клеевой слой на поверхность сотового наполнителя.

8. Произвели послойную выкладку заготовок (препрегов) тыльной обшивки на поверхность клеевого слоя по заданным углам ориентации.

9. Выполнили монтаж вакуумного чехла над тыльной обшивкой и закрепили на базовой поверхности оснастки, после чего всю конструкцию установили в печь термокамеры или автоклава.

10. Произвели ступенчатый нагрев сборки до заданной температуры и выдержали ее при этой температуре в течение 4–6 ч. в зависимости от связующего компонента, при вакуумметрическом давлении в полости под вакуумным чехлом.

11. После этого охладили полимеризованное изделие с оснасткой и чехлом.

12. Произвели демонтаж вакуумного чехла и съем изделия с оснастки.

После завершения процесса полимеризации изделия из ПКМ, связующее вещество и клей твердеет, образуя жесткую полимерную матрицу. В процессе такого метода изготовления, положительный эффект достигается более равномерным распределением силы давления вакуумного чехла при полимеризации изделий за счет отсутствия на поверхности оснастки областей с резкими изменениями формы и, соответственно, повышается точность рабочей поверхности изделия. Выкладка связующего компонента на подготовленную оснастку позволила увеличить качество получаемой зеркальной поверхности рефлектора, изготавливаемого методом вакуумного формования [3–4].

В процессе изготовления изделий из ПКМ методом вакуумного формования температура в термокамере набирается постепенно, как правило, включает в себя пошаговый набор температур с целью последовательного прохождения всех стадий полимеризации. Каждая стадия полимеризации на всех точках поверхности изделия достигается одновременно. Для этого в термокамере и на оснастке установлены датчики температур, помимо датчиков, в камере так же установлены нагревательные элементы и вентиляторы, сигналы с датчиков поступают на панель системы управления, с помощью которой происходит управление и контроль температуры внутри всей термокамеры. Основной вентилятор, расположенный в центре камеры всасывает воздух из камеры и далее направляет его через четыре нагревательных блока по каналам обратно в камеру, таким образом, происходит циркуляция потоков горячего воздуха, которые обтекают нагреваемую оснастку с изделием со всех сторон. Система управления осуществляет непрерывный контроль за процессом нагрева по датчикам на оснастке и, регулируя температуру по каналам, позволяет добиваться равномерного распределения температуры на всей поверхности изделия. Это позволяет снять ограничения на геометрию изделия, расположения его внутри термокамеры для нагрева. В результате сочетания интенсивности и равномерности нагрева за счет распределения тепловых потоков внутри камеры, достигается прецизионный равномерный нагрев изделия

по всей его площади с заданными технологическими параметрами и с возможностью пошагового набора температур [5].

Таким образом, данный способ изготовления рефлекторов из ПКМ с применением специальной технологической оснастки и оборудования позволяет создавать изделия разных геометрических форм и размеров, простой и сложной конструкции, с обеспечением заданных технологических параметров. В процессе полимеризации материал становится легким, прочным, жестким и, по многим физическим и технологическим свойствам превосходит металл. Выбор связующего компонента и подбор схемы армирования при изготовлении изделия позволяет обеспечить равномерность толщины полученной отражающей обшивки и отсутствие внутри нее пузырьков воздуха обеспечивает получение высоких радиоотражающих характеристик рефлектора.

Библиографические ссылки

1. Батаев А. А., Батаев В. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002. 384 с.
2. Гаврюсов В. И. Размерная стабильность материалов и элементов конструкций. Л. : ЦНИИ «Румб», 1990. 113 с.
3. Пат. 2563198 Рос. Федерация: № 2013155354/08. Способ изготовления рефлектора. Заявл. 12.12.2013 ; опубл. 20.09.2015, Бюл. № 26. 6 с.

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

5. Пат. 2535957 Рос. Федерация: № 2012126206/06. Термокамера и способ ее работы. Заявл. 22.06.2012 ; опубл. 20.12.2014, Бюл. № 35.

References

1. Bataev A. A., Bataev V. A. Kompozitsionnye Kompozicionnye materialy: stroenie, poluchenie, primeneniye. [Composite materials: structure, production, application]. Novosibirsk : publisher NGTU, 2002. 384 p.
2. Gavryusev V. I. Razmernaya stabil'nost' materialov i elementov konstruktsiy. L. : TSNII «Rumb», 1990. 113 p.
3. Sposob izgotovleniya reflektora: pat. 2563198 Ros. Federacija: № 2013155354/08, zajavl. 12.12.2013 ; opubl. 20.09.2015, Bjul. № 26. 6 p.
4. Ivanovskaya O. V., Shevcova M. A. Proizvodstvo izdelij iz polimernyh kompozicionnyh Uchebnoe posobie po laboratornomu praktikumu materialov [Production of products from polymeric composite materials The manual on a laboratory practical work]. Har'kov : HAI, 2005. 84 p.
5. Termokamera i sposob yeye raboty : pat. 2535957 Ros. Federatsiya: №2012126206/06 ; zayavl. 22.06.2012 ; opubl. 20.12.2014, Vyul. № 35.

© Дремухин М. А., Наговицин В. Н., 2020



Секция

**«НАНОМАТЕРИАЛЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ
И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ»**

**ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ МОДЫ В АНИЗОТРОПНЫХ
ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОСТРУКТУРАХ***

В. С. Герасимов^{1,2,4}, А. Е. Ершов^{1,2}, Р. Г. Бикбаев^{2,3*}, С. В. Карпов^{2,3,4}

¹Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок 50, стр. 44

²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

³Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН
Российская Федерация, 660036, Красноярск, Академгородок, 50, стр. 38

⁴Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: bikbaev@iph.krasn.ru

Исследованы спектральные свойства дефектных мод в одномерных фотокристаллических структурах с внедренной в дефектный слой анизотропной периодической решеткой золотых нанодисков.

Ключевые слова: фотонный кристалл, аномалия Рэлея, связанные моды, плазмоника, наночастицы.

**POLARIZATION-SENSITIVE MODES IN ANISOTROPIC PHOTONIC
CRYSTAL NANOSTRUCTURES**

V. S. Gerasimov^{1,2,5}, A. E. Ershov^{1,2}, R. G. Bikbaev^{2,3*}, S. V. Karpov^{2,3,4}

¹Institute of computational modeling SB RAS
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

²Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

³Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS
50/38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

⁴Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

E-mail: *bikbaev@iph.krasn.ru

The spectral properties of defective modes in one-dimensional photonic crystal structures with an anisotropic periodic array of gold nanodiscs embedded in the defective layer are investigated.

Keywords: photonic crystal, Rayleigh anomaly, mode coupling, plasmonics, nanoparticle.

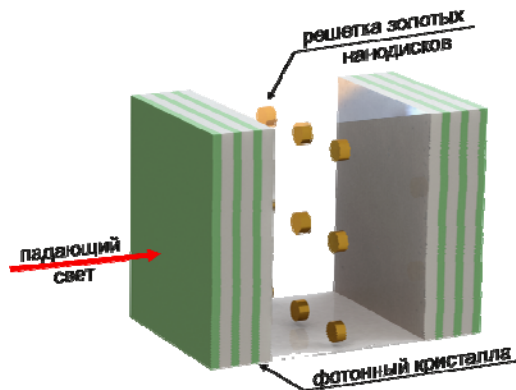
Периодические массивы плазмонных наночастиц в последние годы вызывают большой интерес. Это связано с возникновением коллективных мод вследствие сильной связи между локализованным поверхностным плазмонным резонансом (ЛППР) и аномалиями Вуда-Рэлея [1], что приводит к появлению узкополосных поверхностных решетчатых резонансов (ПРР) [2]. Добротность таких резонансов значительно превосходит добротность других типов локализованных состояний, реализуемых в плазмонных средах. В данной работе исследованы спектральные свойства одномерного фотонного кристалла (ФК) с внедренной в дефектный слой периодической анизотропной решеткой золотых нанодисков. Схематичное изображение структуры представлено на рисунке, *a*. Такие

структуры могут быть использованы в качестве оптических сенсоров, наноантенн и в других актуальных приложениях, перспективных для применения в системах управления космических аппаратов.

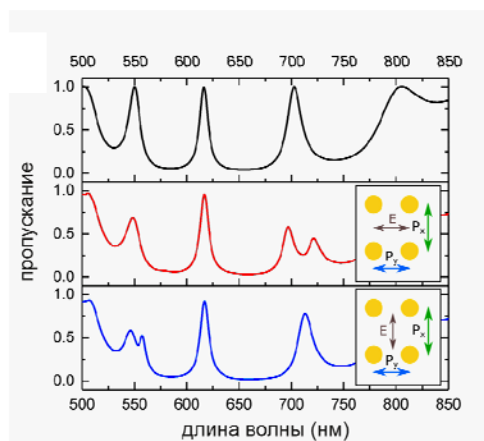
Элементарная ячейка ФК сформирована из двуокиси кремния (SiO₂) и двуокиси циркония (ZrO₂). Толщины и диэлектрические проницаемостями слоев соответственно равны $d_a = 120$ нм, $\epsilon_a = 2,1$ и $d_b = 70$ нм и $\epsilon_b = 4,16$. Количество периодов ФК $N = 6$. Диэлектрическая проницаемость дефектного слоя $\epsilon_{def} = 1,5$, а его толщина $L = 1230$ нм.

Массив золотых нанодисков с радиусом $R = 40$ нм и высотой $H = 50$ нм имеет период $p_x = 470$ нм и $p_y = 380$ нм. Диэлектрическая проницаемость золота была взята из работы [3].

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18-42-240013. А. Ершов благодарит грант президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (соглашение 075-15-2019-676).



а



б

Схематическое изображение исследуемой структуры (а) и спектры пропускания исходного ФК (б) с дефектом решетки (верхний рисунок) и спектры пропускания ФК с внедренной в дефектный слой золотой решеткой нанодисков для различной поляризации падающего на структуру излучения (средний и нижний рисунки)

Далее будем считать, что диэлектрическая проницаемость среды, в которую помещена ФК-структура, равна $\epsilon_{\text{int}} = 1.5$. Спектры пропускания структуры (см. рисунок, б) были рассчитаны методом конечных разностей во временной области (FDTD).

Из рисунка, б видно, что запрещенная зона находится в интервале от 500 до 820 нм, внутри которой формируются 3 дефектные моды на длинах волн 551, 617 и 703 нм.

Внедрение анизотропной решетки золотых нанодисков в дефектный слой ФК приводит к значительному изменению спектров пропускания структуры. Совмещение длины волны ППР с длиной волны дефектной моды приводит к её расщеплению и формированию четырех максимумов пропускания внутри запрещенной зоны ФК. При этом эффективным способом управления спектрами пропускания структуры является изменение поляризации падающего излучения. Так для света, вектор электрического поля которого лежит вдоль оси y , наблюдается расщепление дефектной моды с длиной волны 551 нм, в то время как для ортогональной поляризации расщепляется дефектная мода с длиной волны 703 нм. Интересным является тот факт, что дефектная мода с длиной волны 603 нм не взаимодействует с ППР. Это объясняется тем, что эта мода является четной и на этой длине волны частица находится в узле электромагнитного поля [4].

Предложенные в работе структуры могут стать элементной базой для фотонных устройств, которые в свою очередь могут быть использованы в таких крупных и высокотехнологических предприятиях как НПО ИСС и АО «Красмаш».

References

1. Rayleigh, L. On the Dynamical Theory of Gratings // Proceedings of the Royal Society A: mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1907. Vol. 79, № 532. P. 399–416.
2. Markel V. A. Divergence of dipole sums and the nature of non-Lorentzian exponentially narrow resonances in onedimensional periodic arrays of nanospheres // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical physics. 2005. Vol. 38, № 7. P. L115–L121.
3. Johnson P. B., Christy R. W.. Optical constants of the noble metals // Phys. Rev. B 6, 4370–4379, 1972.
4. Engineering mode hybridization in regular arrays of plasmonic nanoparticles embedded in 1D photonic crystal / A. E. Ershov, V. S. Gerasimov, R. G. Bikbaev, S. P. Polyutov, S. V. Karpov // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2019. T. 224. C. 303–308.

© Герасимов В. С., Ершов А. Е., Бикбаев П. Г.,
Карпов С. В., 2020

ОПТИЧЕСКИЙ КЕРКЕР-ЭФФЕКТ В ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ НАНОЧАСТИЦ*

А. Е. Ершов^{1,2}, В. С. Герасимов^{1,2,3}, С. П. Полюттов², С. В. Карпов^{2,3,4}, П. Н. Семина², Р. Г. Бикбаев^{2,4}

¹Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44

²Сибирский федеральный университет

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

³Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31

⁴Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 38

E-mail: valkrsk@gmail.com

Впервые демонстрируется возникновение решетчатого эффекта Керкера в регулярных плазмонных Al-наноструктурах. Полученные результаты могут быть положены в основу технологий изготовления наноантенн с широким рабочим диапазоном, высокоточных сенсоров и датчиков, технологических покрытий с заданными свойствами для авиационных и космических приложений.

Ключевые слова: периодические структуры, алюминий, Керкер-эффект, наночастицы, рассеяние света, теория Ми, наноантенны.

OPTICAL KERKER EFFECT IN PERIODIC STRUCTURES OF ALUMINUM NANOPARTICLES

A. E. Ershov^{1,2}, V. S. Gerasimov^{1,2,3}, S. P. Polyutov², S. V. Karpov^{2,3,4}, P. N. Semina², R. G. Bikbaev^{2,4}

¹Institute of computer modeling, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

²Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

³Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

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

⁴L. V. Kirensky Institute of physics, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences
50/38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

E-mail: valkrsk@gmail.com

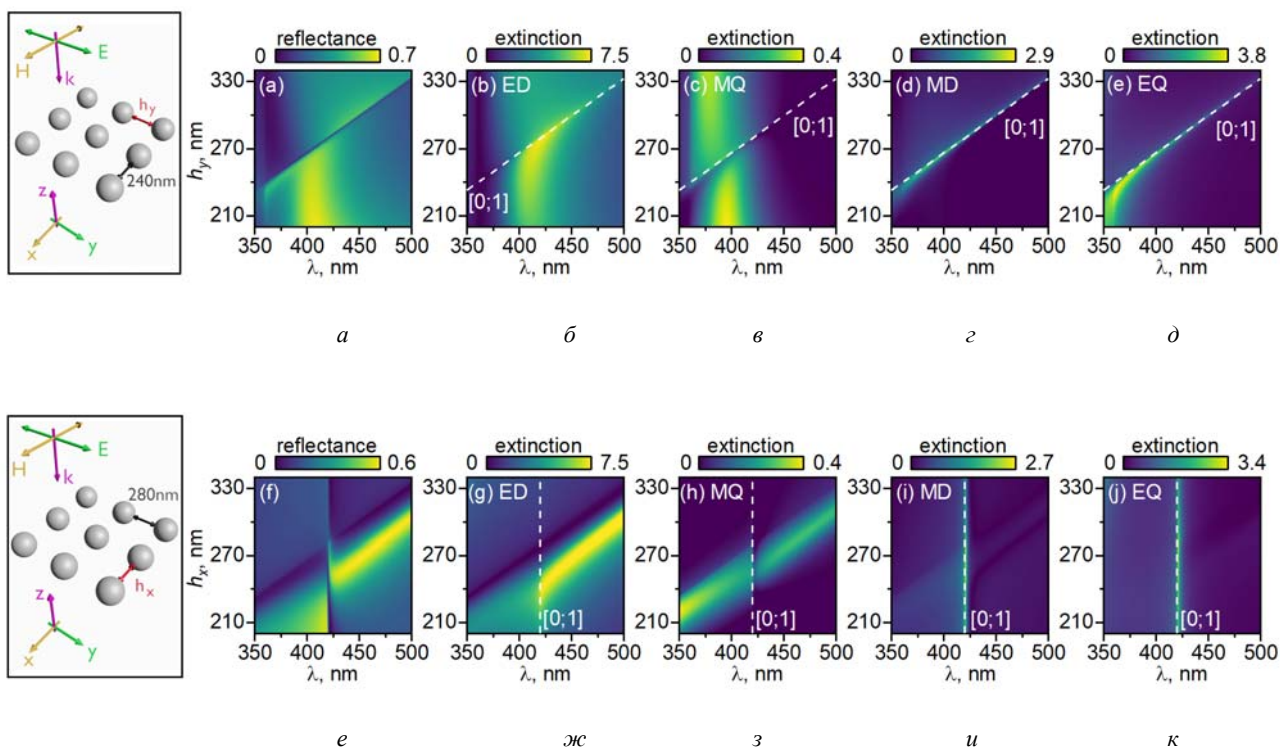
We demonstrated for the first time the Kerker lattice effect in regular plasmon Al-nanostructures. The results are in great interest as the basis for technologies for nanoantennas, high-precision sensors and detectors, and technological coatings with specified properties for aviation and space needs.

Keywords: periodic structures, aluminum, Kerker effect, nanoparticles, light scattering, Mie theory, nanoantennas.

Концепция подавления обратного рассеяния света на примере одиночной сферической частицы была предложена более трех десятилетий назад Керкером и др. [1]. Эта многообещающая идея в прошлом не была удостоена должного внимания, потому что природных материалов с такими свойствами невозможно найти. Однако, ситуация кардинально изменилась с появлением нанофотоники и исследованием диэлектрических материалов и композитов на их основе [2], а также материалов с оптически индуцированными магнитными свойствами [3]. Существенным недостатком традиционных плазмонных материалов (золото, серебро) является низкий магнитный отклик и

значительные тепловые потери, что делает их непригодными для проявления Керкер-эффекта. Экспериментальное доказательство проявления Керкер-эффекта было продемонстрировано на примере наночастиц (НЧ) Si [4] или GaAs [5]. В массивах НЧ эффект Керкера может быть реализован посредством конструктивной или деструктивной интерференции высокочастотных мод коллективных резонансов решетки [6; 7]. Такие моды в решеточной структуре возникают вследствие взаимодействия аномалии Рэлея (РА) и Ми-резонансов, наблюдаемых как в периодических структурах плазмонных [8], так и диэлектрических НЧ [9].

*Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых (соглашение 075-15-2019-676).



Спектры отражения a , e и $(b-d)$, $(ж-к)$ мультипольное (ED, MQ, MD, EQ) разложение эффективности экстинкции для двумерного массива НЧ алюминия с фиксированным шагом решетки $h_x = 240$ нм и варьируемым шагом h_y (верхний ряд), а также фиксируемым $h_y = 280$ нм и варьируемым h_x (нижний ряд). Для расчетов использован коммерческий пакет Lumerical FDTD

Наблюдение эффекта Керкера в таких объектах возможно при изменении конфигурации массива и геометрии самих НЧ.

В нашей работе [10] мы показали, что в массивах НЧ алюминия проявляются магнитные дипольные и квадрупольные моды подобно периодическим диэлектрическим структурам. Впервые нами был продемонстрирован (см. рисунок) решеточный Керкер-эффект на примере метаповерхности НЧ алюминия с варьируемым шагом h_x и h_y решетки.

Рассмотрим плоскую электромагнитную волну с частотой ω и волновым вектором k , нормально падающую на бесконечный двумерный периодический массив НЧ алюминия в среде с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_h = 2,25$. Электрическое поле отраженной от метаповерхности волны включает дипольную электрическую и магнитную моду (ED, MD), и, соответственно, квадрупольные (EQ, MQ) моды. Из рисунка $(b-d)$, $(ж-к)$ видно, что на спектральные свойства двумерных массивов влияет изменение одного из периодов решетки h_x или h_y при сохранении другого постоянным. В частности, вариация h_x при неизменном h_y дает в направлении $[1;0]$ РА и регулирует положения мод ED и MQ. Вариация же h_y при неизменном h_x обнаруживает РА в направлении $[1;0]$ и устанавливает положения мод MD и EQ. Примечательно, что перекрестное взаимодействие между различными модами приводит к появлению дополнительных минимумов и максимумов на рисунке $(b-d)$, $(ж-к)$ полное подавление отражения происходит тогда, когда спектральное положение резонансов, соответствующее

различным аномалиям, совпадает друг с другом и суммарный вклад мод MD и EQ равен вкладу мод ED и MQ.

Таким образом, показано, что подавление обратного рассеяния происходит из-за взаимодействия локализованных поверхностных плазмонов и коллективных колебаний решетки электрического и магнитного диполя, а также электрического и магнитного квадруполья. Изменение геометрических параметров A -матриц позволяет управлять эффектом Керкера во всем УФ-и видимом диапазонах, чего трудно достичь при использовании других плазмонных или диэлектрических материалов.

Полученные результаты могут быть применены для технологий изготовления высокочастотных сенсоров и датчиков, наноантенн и устройств приема и обработки информации, а также покрытий для авиационной и космической отраслей.

References

1. Kerker M., Wang D.-S., Giles C. L. Electromagnetic scattering by magnetic spheres // J. Opt. Soc. Am. 1983. Vol. 73. P. 765–767.
2. Staude I., Pertsch T., Kivshar Y. S. All-dielectric resonant meta-optics lightens up // ACS Photonics. 2019. Vol. 6. P. 802–814.
3. Evlyukhin A. B., Novikov S. M., Zywiets U., Eriksen R. L., Reinhardt C., Bozhevolnyi S. I., Chichkov B. N. Demonstration of magnetic dipole resonances of dielectric nanospheres in the visible region // Nano Letters. 2012. Vol. 12. P. 3749–3755.

4. Fu Y. H., Kuznetsov A. I., Miroshnichenko A. E., Ye Feng Yu, Luk'yanchuk B. S. Directional visible light scattering by silicon nanoparticles // *Nature Communications*. 2013. 4(1527).
5. Person S., Jain M., Lapin Z., Sáenz J. J., Wicks G., Novotny L. Demonstration of zero optical backscattering from single nanoparticles // *Nano Letters*. 2013. Vol. 13. P. 1806–1809.
6. Ross M. B., Mirkin C. A., Schatz G. C. Optical properties of one-, two-, and three-dimensional arrays of plasmonic nanostructures // *Journal of Physical Chemistry C*. 2016. Vol. 120. P. 816–830.
7. Kravets V. G., Kabashin A. V., Barnes W. L., Grigorenko A. N. Plasmonic surface lattice resonances: a review of properties and applications // *Chemical Reviews*. 2018. Vol. 118. P. 5912–5951.
8. 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 Physics B*. 2005. Vol. 38. P. L115–L121.
9. Evlyukhin A.B., Reinhardt C., Seidel A., Luk'yanchuk B. S., Chichkov B. N. Optical response features of Si-nanoparticle arrays // *Physical Review B*. 2010. Vol. 82. P. 045404.
10. Ershov A. E., Gerasimov V. S., Bikbaev R. G., Polyutov S. P., Karpov S. V. Mode coupling in arrays of Al nanoparticles // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2020. Vol. 248. P.106961.

© Ершов А. Е., Герасимов В. С., Полютков С. П.,
Карпов С. В., Семина П. Н., Бикбаев Р. Г., 2020

УДК 539.3

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ СТРЕЛЫ ПРОГИБА: СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Д. М. Зуев*, К. Г. Охоткин

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

*E-mail: ZuevDmitriy93@yandex.ru

В работе проведено сравнение литературных экспериментальных данных с аналитическим приближенным решением для стрелы прогиба тонкого упругого консольного стержня в случаях поперечной и распределенной нагрузки. Рассматривается геометрически нелинейный изгиб.

Ключевые слова: геометрическая нелинейность, большие деформации, консоль, эластика Эйлера.

MODIFIED FORMULAS FOR MAXIMUM DEFLECTION: COMPARISON WITH EXPERIMENTAL DATA

D. M. Zuev*, K. G. Okhotkin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: ZuevDmitriy93@yandex.ru

The paper contains results of maximum deflection comparison with experimental data taken from literature and an analytic approximate solution in cases of a thin elastic cantilever rod subjected with a transversal load, a distributed (gravitational) load.

Keywords: geometrical nonlinearity, large deflections, cantilever, Euler elastic.

В современной ракетно-космической технике часто используются устройства и конструкции, построенные с использованием тонких упругих стержней, которые подвержены большим деформациям. К таким устройствам можно отнести развертываемые антенные и другие конструкции, «податливые механизмы».

Для определения величин и формы изгибов на этапе эскизного проектирования требуется иметь аналитические методы. На данный момент обычно используются точные решения, выраженные в эллиптических интегралах и функциях. Данный подход является сложным в практическом инженерном применении, так как требует значительной математической подготовки. Поэтому поиск приближенных решений, обладающих значительной точностью и простотой применения, имеет высокую актуальность.

Кроме того, развитие методов определения величин прогиба стержня, подверженного большим деформациям, актуально для проектирования различных микроэлектромеханических систем (MEMS) и кантилеверов атомных силовых микроскопов.

В прошлых работах [1] был предложен метод модификации формул линейной теории сопротивления материалов для стрелы прогиба тонкой упругой консоли. Данный метод позволяет достичь точности сравнимой с точными решениями в эллиптических интегралах и функциях, а также значительно расширить интервал нагрузок, при которых линейная теория может быть применена.

Метод заключается в отслеживании абсциссы конца стержня ξ_k , в которой измеряется максимальный

прогиб. Таким образом, стрела прогиба находится из следующего выражения:

$$f = \eta(\xi_k, \mu),$$

где f – безразмерный прогиб; $\eta = \eta(\zeta, \mu)$ – форма изгиба; ζ, η – безразмерные координаты (абсцисса и ордината); μ – безразмерный параметр нагрузки.

Параметр ξ_k вычисляется при решении уравнения, полученного из равенства единице (общей длине стержня в безразмерных координатах) интеграла криволинейной длины в пределах интегрирования от параметра ξ_k до точки заделки стержня:

$$\int_{\xi_k}^1 \sqrt{1 + \left(\frac{d\eta(z, \mu)}{dz}\right)^2} dz = 1.$$

В работе [1] было проведено сравнение результатов данного метода с экспериментальными данными, представленными в [2], для случая комбинированной нагрузки (поперечной нагрузки на свободном конце консоли и равномерно распределенной нагрузки гравитационного типа).

В данной работе проводится сравнение результатов метода с литературными экспериментальными данными для случаев поперечной нагрузки [3], для равномерно распределенной нагрузки [4]. Экспериментальные данные были извлечены с графиков в рассматриваемых статьях с помощью программного обеспечения Graph2Digit, затем приведены к безразмерным координатам и безразмерному параметру нагрузки $\mu = 2PL/EJ$, где P – действующая сила; L – длина стержня; EJ – изгибная жесткость.

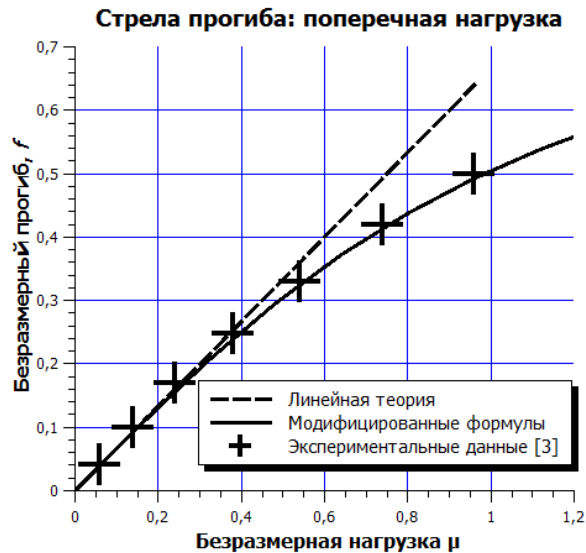


Рис. 1. Стрелы прогиба в случае поперечной нагрузки

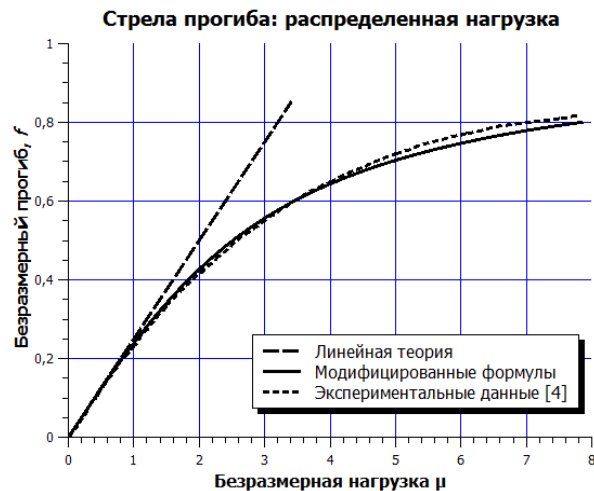


Рис. 2. Стрелы прогиба в случае поперечной нагрузки

Теоретические стрелы прогиба, полученные с помощью модифицированных формул, в сравнении с экспериментальными данными представлены на рис. 1 (в случае поперечной сосредоточенной нагрузки), на рис. 2 (в случае распределенной нагрузки гравитационного типа).

На рис. 1 и 2 видно, что экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются с результатами, полученными с помощью модифицированных формул. В литературных данных не приводятся значения погрешности эксперимента, что делает актуальным проведение эксперимента с учетом погрешности измерений.

В данной работе проведено сравнение стрел прогиба, полученных с помощью модифицированных линейных формул, с экспериментальными литературными данными в случаях поперечной и распределенной нагрузки. Сравнение выявило хорошую степень согласованности теоретических стрел прогиба с экспериментальными данными.

References

1. Zuev D.M., Okhotkin K.G. Modified formulas for maximum deflection of a cantilever under transverse loading. *Spacecrafts Technol.*, 2020, Vol. 4, No. 1. P. 28–35 (In Russ.).
2. Beléndez T., Neipp C., Beléndez A. Numerical and Experimental Analysis of a Cantilever Beam: A Laboratory Project to Introduce Geometric Nonlinearity in Mechanics of Materials/ *Int. J. Eng. Educ.*, 2003m Vol. 19, No. 6. P. 885–892.
3. Gaurav K., Bhaduri S., Kumar A. Prediction of Deflection of Cantilever Beam of Any Arbitrary Length Using Soft Computation. *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, 2016, Vol. 4, Issue III. P. 448–454.
4. Lee H.C., Durelli A.J., Parks V.J. Stresses in largely deflected cantilever beams subjected to gravity. *J. Appl. Mech. Trans. ASME*, 1964, Vol. 36, No. 2. P. 323–325.

© Зуев Д. М., Охоткин К. Г., 2020

УДК 621.3

ПОВЫШЕНИЕ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ РЕКУПЕРАТОРОВ ЭНЕРГИИ ПУЧКОВ ЭЛЕКТРОНОВ

С. И. Козлов, Т. А. Пчелкина, И. В. Трифанов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
 Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
 E-mail: tat0401@yandex.ru

Проведен анализ построения многослойной структуры с гибридным композитным покрытием на основе графена и углеродных нанотрубок многоколлекторных электродов рекуператоров энергии пучков электронов. Даны рекомендации по совершенствованию рабочих параметров рекуператоров энергии электронов.

Ключевые слова: рекуператор энергии, гибридное композиционное покрытие, нанокompозиты.

IMPROVING THE OPERATING PARAMETERS OF ELECTRON BEAM ENERGY RECUPERATORS

S. I. Kozlov, T. A. Pchelkina, I. V. Trifonov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
 31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
 E-mail: tat0401@yandex.ru

An analysis of the construction of a multilayer structure by a hybrid composite coating based on graphene and carbon nanotubes of multicollector electrodes of electron energy recuperators is performed. Recommendations for improving the operating parameters of electron energy recuperators are given.

Keywords: energy recuperator, hybrid composite coating, nanocomposites.

Повышение рабочих параметров рекуператоров энергии пучков электронов в электроэнергии постоянного тока во многом связана со структурой и построением многоколлекторных электродов [1]. Многоколлекторные электроды представляют собой многослойную структуру с гибридным композитным покрытием, толщиной порядка 320 мкм, которая может быть выполнена на основе плёнки графена, выращенной на металлическом основании, сформированном в виде пленки толщиной 100 мкм. На полученной металлополимерной пленке может быть затем выращен массив нанотрубок, модифицированных наночастицами, повышающими поглощение электронов [2]. На таких углеродных композитных покрытиях могут развиваться сложные механизмы поглощения энергии электронов, которые сопровождаются переносом заряда к электродам суперконденсатора рекуператора энергии, накапливающего его электрическую мощность в виде электростатического заряда.

Глубину проникновения H в электродную матрицу можно оценить по формуле [3]:

$$H = 0,276 A E_0^{1,67} / (z^{0,88} \cdot \rho), \quad (1)$$

где A , z – атомный вес и номер химического элемента, E_0 – энергия первичных электронов, $E_0 = eU$, где e – заряд электрона, U – напряжение электрического поля, ρ – электронная плотность.

Наибольшая величина проникновения внутрь углеродной матрицы составляет чуть более 1 мкм [2].

Углеродные нанотрубки с диаметром $d = 50 - 80$ Нм и до 20–30 Нм исследовались в СВЧ диапазоне 12,6–40 ГГц. Была установлена важная роль величины скин-слоя на поглощение заряженных частиц, которая согласно расчётам, может составлять 2,5–4,5 мм.

Величину скин-слоя Δ можно рассчитать по формуле:

$$\Delta = c(\varepsilon_0) / (\pi f K \delta), \quad (2)$$

где f – частота электромагнитного излучения; $K = \mu_0 \cdot \mu$ – магнитная проницаемость углеродного материала; μ_0 – магнитная постоянная; c – скорость света; ε_0 – электрическая постоянная; δ – электропроводимость.

В целом, на поглощение электронов углеродным материалом существенное влияние оказывает степень упорядоченности углеродной матрицы нанокompозита, что характерно для композиционных материалов, обладающих пористостью с параметрами ($\varepsilon = \mu \approx 1$).

Таким образом, эффективность работы рекуператоров энергии электронов можно повысить за счет выбора покрытия в виде рациональной многослойной структуры с гибридным композиционным слоем, сформированным на основе графена и наномодифицированных углеродных нанотрубок, который наносится на многоколлекторные электроды. Параметры взаимодействующего гибридного слоя с потоком электронов должны выбираться в зависимости от энергии первичных электронов E_0 , напряжённости электрического поля U и частоты электромагнитного

излучения f . При воздействии пучков электронов с разной частотой электромагнитного излучения и первичной энергией электронов могут применяться многоступенчатые рекуператоры энергии заряженных частиц с различной структурой многоколлекторных электродов [4; 5].

Проведен анализ влияния многослойной структуры с гибридным композитным покрытием многоколлекторных электродов на эффективность работы рекуператоров энергии пучков электронов.

Даны рекомендации по методам совершенствования работы рекуператоров энергии пучков электронов.

Библиографические ссылки

1. Пат. RU2625325 Рекуператор энергии пучка заряженных частиц / Трифанов И. В., Трифанов В. И., Оборина Л. И. ; 13.07.2017 ; опубл. 07.02.2017. Бюл. № 20.
2. Пат. RU 2548989 Способ получения гибрида графена и углеродных нанотрубок / Матвеев В. И., Короненко О. В., Левашов В. И. и др. ; опубл. 06.04.2015.
3. Родионов В. В. Механизм взаимодействия СВЧ-излучения с наноструктурированными углеродосодержащими материалами : дис. ... канд. физ-мат наук / Юго-западный гос. ун-т. Курск, 2015.
4. Пат. RU 2700583 Способ создания многоступенчатой рекуперации энергии заряженных частиц и устройство для его реализации / Трифанов И. В. ; опубл. 18.09.2019. Бюл. № 26.
5. Преобразование энергии пучков электронов в электрическую мощность / И. В. Трифанов, Л. И.

Оборина, О. А. Суханова и др. // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 423–432.

References

1. Trifonov I. V., Trifonov V. I., Oborina L. I. *Rekuperator energii puchkazaryazhennyh chastic* [The heat exchanger-energy beam of charged particles]. Patent RF No 2625325, 2017.
2. Matveev V. I., Kononenko O. V., Levashov V. I. *Sposob polucheniya gibrida grafena iuglerodnyh nanotrubok* [Method for producing a hybrid of graphene and carbon nanotubes]. Patent RF No 2548989, 2015.
3. Rodionov V. V. *Mekhanizm vzaimodejstviya SVCH-izlucheniya s nanostrukturirovannymi uglerodosoderzhashchimi materialami : dissertaciya ... kandidata fizma tnauk* [Mechanism of interaction of microwave radiation with nanostructured carbon-containing materials. The dissertation on competition of a scientific degree of candidate of physico-mathematical Sciences] / Southwestern State University. Kursk, 2015.
4. Trifonov I. V. *Sposob sozdaniya mnogostupenchatoj rekuperacii energii zaryazhennyh chastec i ustrojstvo dlya ego realizacii* [Method for creating multi-stage energy recovery of charged particles and device for its implementation]. Patent RF No 2700583, 2019.
5. Conversion of electron beam energy into electrical power / I. V. Trifanov, L. I. Oborina, O. A. Suhanova et al. // *Sibirskij zhurnal nauki i tekhnologij*. 2017. № 2. (In Russ.)

© Козлов С. И., Пчелкина Т. А., Трифанов И. В., 2020

УДК 537.634, 57.043

МЕХАНИЗМЫ НЕОБРАТИМОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ КЛЕТОК ФЕРРОМАГНИТНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ В ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ*

А. С. Костюков^{1*}, А. Б. Ключанцев², А. Е. Ершов^{1,3,4}, В. С. Герасимов^{1,3,4}, С. В. Карпов^{2,4}

¹Сибирский федеральный университет

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

²Институт физики СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/38

³Институт вычислительного моделирования СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44

⁴Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

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

*E-mail: Kostukov-a@yandex.ru

Исследованы факторы, влияющих на эффективность магнитной терапии злокачественных клеток. Проведен анализ механических деформаций и возникающих в клеточной мембране сил при движении магнитной наночастицы в переменном магнитном поле.

Ключевые слова: наночастицы, наноболочки, магнитная терапия.

MECHANISMS OF IRREVERSIBLE DAMAGE TO MALIGNANT CELLS BY FERROMAGNETIC NANOPARTICLES IN AN ALTERNATING MAGNETIC FIELD

A. S. Kostyukov^{1*}, A. B. Klyuchantsev², A. E. Ershov^{1,3,4}, V. S. Gerasimov^{1,3,4}, S. V. Karpov^{2,4}

¹Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

²Kirensky institute of physics SB RAS

50/38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

³Institute of computational modeling SB RAS

50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

⁴Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

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

*E-mail: Kostukov-a@yandex.ru

We have studied the factors influencing the effectiveness of magnetic therapy for malignant cells. We have analyzed mechanical deformations and forces arising in the cell membrane when a magnetic nanoparticle moves in an alternating magnetic field.

Keywords: nanoparticles, nanoshells, magnetic therapy.

Магнитные поля (МП) имеют большей спектр применений в нанотераностике [1]. Высокочастотные МП высокой интенсивности могут быть использованы для селективного нагрева злокачественных тканей. Однако, для того, чтобы избежать возможных побочных эффектов, связанных с перегревом здоровых тканей, можно использовать негреющие переменные МП, характеристики которых определяются соотношением между напряженностью H и частотой f магнитного поля $Hf < 4.85 \cdot 10^8 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Гц}$ [2].

Различные исследования [1; 3] указывают на то, что избирательной гибели злокачественных клеток в негреющих МП можно добиться воздействием на специфические белковые рецепторы, находящиеся в клеточных мембранах злокачественных клеток.

В отличие от фототермальной терапии, терапия с применением негреющих МП действует простейшие источники, индуцирующие переменное поле (например кольца Гельмгольца), без необходимости использовать сложное тяжеловесное оборудование, что открывает возможности по проведению терапии в труднодоступных регионах или, например, при длительных космических перелетах.

Для этой цели используют магнитные наночастицы (МНЧ) различных форм и размеров с адсорбированными на их поверхностях ДНК-аптамерами, которые представляют собой макромолекулы размером порядка 3 нм, способные селективно связываться с заранее определенным типом клеток, обеспечивая закрепление МНЧ на поверхности исключительно злокачественных клеток.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект FSRZ-2020-008).

Гибель клетки происходит при механическом воздействии на белок-рецептор клетки со стороны связанной с ним через аптамер МНЧ. Критерием гибели клетки является преодоление пороговой силы $f_{crit} = 30\text{--}50$ пН [1; 4].

Наиболее часто в биомедицине применяются МНЧ с внешней золотой оболочкой, так как инертность золота повышает биосовместимость частиц, и обеспечивает связывание ДНК-аптамеров с поверхностью частицы. Так, исследуемые нами МНЧ представляют собой магнетитовое сферическое ядро, покрытое золотой оболочкой некоторой толщины.

Изначально мы оценили максимально возможную силу воздействия на белок-рецептор со стороны системы «МНЧ+аптамер» в постоянном (или медленно меняющемся) магнитном поле. Результаты моделирования приведены на рис. 1.

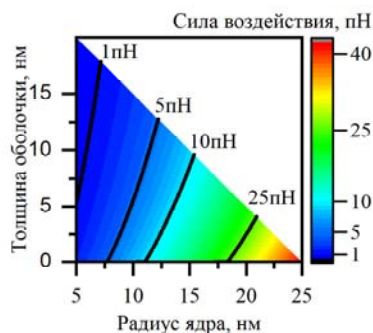


Рис. 1. Максимальная возможная проекция силы на ось, перпендикулярную плоскости мембраны, действующая на белок со стороны прикрепленной к нему МНЧ с ДНК-аптамером. $H = 10^4$ А·м⁻¹

Как видно из рис. 1 для достижения требуемых сил магнетитовое ядро должно иметь значительный размер, а даже небольшой слой немагнитной золотой оболочки сильно снижает максимально возможную силу воздействия. Однако в достаточно быстро меняющемся МП возникают силы, связанные с быстрым ускорением, движением и торможением МНЧ. При некоторых параметрах поля частица при движении может ударяться о мембрану клетки, вызывая её деформацию. Моделирование движения частицы и деформации мембраны выполнялось с помощью программного пакета ANSYS. Результаты моделирования приведены на рис. 2. Свойства клеточной мембраны взяты из [5].

Большие пики силы на рис. 2 соответствуют моментам упругого отскока частицы при ударе о мембрану. В момент удара сила воздействия на белок значительно превышает ту же силу при статическом воздействии.

Таким образом, установлено, что основную роль в гибели клеток играет упругое отражение частицы от мембраны клетки при её движении в переменном МП. Возникающая сила кратковременно превышает критическую f_{crit} даже для малых частиц. При этом частота МП должна определяться отдельно, поскольку при высоких частотах МП частица не будет успевать достигнуть мембраны клетки и будет совершать колебательные движения около положения равновесия. Оп-

ределение оптимальной частоты МП является темой дальнейших исследований.

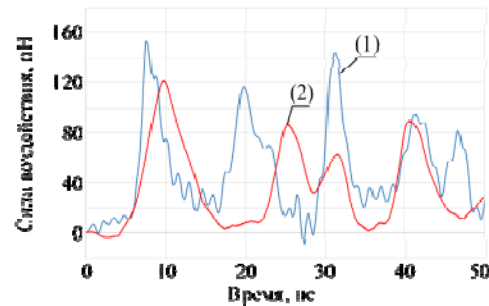


Рис. 2. Та же сила, в момент упругого взаимодействия частицы и мембраны. Кривая (1) моделирует жесткое закрепление мембраны на цитоскелете, (2) – свободную мембрану. Радиус магнетитового ядра $R = 15$ нм, частота $f = 1$ кГц

Библиографические ссылки

1. Новые подходы к нанотераностике / Ю. И. Голловин, Н. Л. Клячко, А. Г. Мажуга и др. // Российские нанотехнологии. 2018. Т. 13. № 5–6.
2. Brezovich I. A. Low frequency hyperthermia: capacitive and ferromagnetic thermoseed methods. In: biological, physical and clinical aspects of hyperthermia (Eds B. R. Paliwal, F. W. Hetzel, and M. W. Dewhirst) // Med. Phys. Monogr. 1988. Vol. 16. P. 82–111.
3. Zamay G. S., Aptamers Selected to Postoperative Lung Adenocarcinoma Detect Circulating Tumor Cells in Human Blood // Molecular Therapy. 2015. Vol. 23. P. 1486–1496.
4. Lee Chih-Kung. Atomic force microscopy: Determination of unbinding force, off rate and energy barrier for protein–ligand interaction // Micron. 2007. Vol. 38, № 5. P. 446–461.
5. Schmid-Schonbein G. W., Frontiers in Biomechanics / G. W. Schmid-Schonbein, S. L-Y. Woo, B. W. Zweifach // Springer. New York, 1986. P. 397.

References

1. *New approaches to nanoteranostics* / Ju. I. Golovinn, N. L. Klyachko, A. G. Mazhug et al. // Rossijskie nanotehnologii. 2018. Vol. 13, № 5–6. (In Russ.).
2. Brezovich I. A. *Low frequency hyperthermia: capacitive and ferromagnetic thermoseed methods*. In: *biological, physical and clinical aspects of hyperthermia* (Eds B. R. Paliwal, F. W. Hetzel, and M. W. Dewhirst) // Med. Phys. Monogr. 1988. Vol. 16. P. 82–111.
3. Zamay G. S., *Aptamers Selected to Postoperative Lung Adenocarcinoma Detect Circulating Tumor Cells in Human Blood* // Molecular Therapy. 2015. Vol. 23. P. 1486–1496.
4. Lee Chih-Kung. *Atomic force microscopy: Determination of unbinding force, off rate and energy barrier for protein–ligand interaction* // Micron. 2007. Vol. 38, № 5. P. 446–461.
5. Schmid-Schonbein G. W., Woo S. L-Y., Zweifach B. W. *Frontiers in Biomechanics* // Springer. New York, 1986. P. 397.

© Костюков А. С., Ключанцев А. Б., Ершов А. Е., Герасимов В. С., Карпов С. В., 2020

APPLICATION OF CARBON NANOTUBES IN MISSILE COMPLEXES

N. S. Pisarev, E. A. Achkasova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: nike0996@mail.ru

War industry always went side by side with science. The newest developments of scientists actively took root during creation of new military equipment, and when modifying old. Rapid development of the defensive equipment nullifies use of missile tactical systems as at detection of the rocket, she is instantly liquidated. In this regard, there is a need of modification of tactical missile systems, by means of reduction of probability of detection of the launched missile. In this work, the prospect of use of the material "Vantablack" discovered in 2014 by the British scientists will be considered.

Keywords: missile defense, tactical missile system, vantablack, thermal camouflage.

ПРИМЕНЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК В РАКЕТНЫХ КОМПЛЕКСАХ

Н. С. Писарев, Е. А. Ачкасова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: nike0996@mail.ru

Военная промышленность всегда шла бок о бок с наукой. Новейшие разработки ученых активно внедрялись при создании новой военной техники, а также при модифицировании старой. Стремительное развитие оборонительной техники сводит на нет использование ракетных тактических комплексов, поскольку при обнаружении ракеты, ее моментально ликвидируют. В связи с этим возникает необходимость модификации тактических ракетных комплексов, посредством уменьшения вероятности обнаружения запущенной ракеты. Рассмотрена перспектива применения материала «Вантаблэк», открытого в 2014 году британскими учеными.

Ключевые слова: противоракетная оборона, тактический ракетный комплекс, вантаблэк, тепловой камуфляж.

The Vantablack material, opened in 2014, is a vertically oriented array of nanotubes made of carbon. It is currently the blackest substance ever created by man.

A distinctive feature of this material is that it can almost be called a completely black body, that is, it absorbs 99.965 % of the radiation incident on it (sm. figure):

– Visible light;

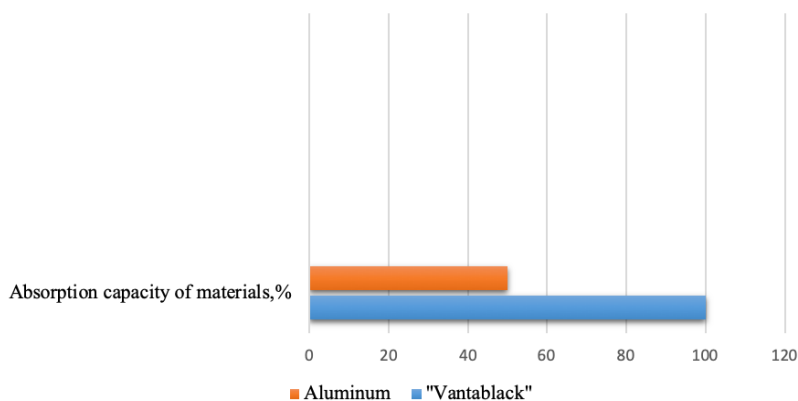
– Microwaves;

– Radio waves.

The above types of radiation, and in particular radio waves, are used by missile defense systems to detect the location of a flying missile in order to further neutralize it.

Radar methods are one of the main methods for detecting missiles used in missile defense systems [1–2].

Absorbency Comparison



Comparison of the absorption capacity of materials

In this regard, the present paper proposes the use of such a material by coating the surface of a rocket with a liquid substance. Thanks to this, it will be possible to achieve the absorption of radar signals emitted by anti-ballistic systems [3]. The use of this is not limited to surface coating alone. It is also possible to use miniature units and elements of various microelectromechanical devices as coatings. All this together can create temperature camouflage, which can significantly reduce the likelihood of detecting a launched missile.

In addition to the use of absorbing material in the military industry, it is also possible to introduce such technology in the aerospace industry by creating lightweight and durable coatings that protect humans and spaceships from strong radiation. It can also be used to increase the absorption of heat in materials used in technologies for the concentration of solar energy [4–5].

Since Vantablack can be used in many areas of industry, it makes sense to organize the production of the Russian analogue on the territory of the Russian Federation. This will make the use of absorbent material more cost-effective.

From the foregoing, it can be concluded that the use of absorbing materials is potentially possible for the modernization of tactical missile systems, as well as to find this material for use in civilian fields, such as the aerospace industry and solar energy.

References

1. Absolyutno chernoe telo // Bol'shoy entsiklopedicheskiy politekhnicheskiy slovar'. 2004.
2. Pervov M. Otechestvennoe raketnoe oruzhie 1946–2000. M. : AKS-Konversalt, 1999. P. 52–53.
3. Shirokorad A. B. Entsiklopediya otechestvennogo raketnogo oruzhiya 1918–2002.
4. Leonov A. I. Radiolokatsiya v protivoraketnoy oborone. M. : Voenizdat, 1967. 136 p.
5. Bakulev P. A. Radiolokatsionnye sistemy. M. : Radiotekhnika, 2004. 320 p.

Библиографические ссылки

1. Абсолютно чёрное тело // Большой энциклопедический политехнический словарь. 2004.
2. Первов М. Отечественное ракетное оружие 1946–2000. М. : АКС-Конверсалт, 1999. С. 52–53.
3. Широкоград А. Б. Энциклопедия отечественного ракетного оружия 1918–2002.
4. Леонов А. И. Радиолокация в противоракетной обороне. М. : Воениздат, 1967. 136 с.
5. Бакулев П. А. Радиолокационные системы. М. : Радиотехника, 2004. 320 с.

© Писарев Н. С., Ачкасова Е. А., 2020

УДК 66.081.6

УПРАВЛЯЕМЫЙ ПЕРЕНОС ИОНОВ В НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МЕМБРАНАХ С ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ*

И. И. Рыжков^{1,2*}, А. А. Борцова¹, М. О. Мишнев², С. А. Новикова³, С. В. Хартов⁴

¹Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50/44

²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

³Институт химии и химической технологии СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50/24

⁴Федеральный исследовательский центр КНЦ СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50

*E-mail: rii@icm.krasn.ru

Экспериментально и теоретически исследована управляемая ионная селективность в мембранах C-Nafen из нановолокон оксида алюминия и мембранах из пористого анодного оксида алюминия с проводящим углеродным покрытием.

Ключевые слова: нановолокна, углеродное покрытие, мембрана, ионная селективность, математическое моделирование.

SWITCHABLE ION TRANSPORT IN NANOSTRUCTURED MEMBRANES WITH ELECTRICALLY CONDUCTIVE SURFACE

I. I. Ryzhkov^{1*}, A. A. Bortsova², M. O. Mishnev², S. A. Novikova³, S. V. Khartov⁴

¹Institute of Computational Modelling SB RAS
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

²Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

³Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS
50/24, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

⁴Federal Research Center KSC SB RAS
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 60036, Russian Federation

*E-mail: rii@icm.krasn.ru

We have performed an experimental and theoretical study of switchable ionic selectivity in C-Nafen membranes prepared from alumina nanofibers and Porous anodic alumina membranes with conductive carbon coating.

Keywords: nanofibers, carbon coating, membrane, ionic selectivity, mathematical modelling.

Введение. Мембранные технологии играют важную роль в химической, топливно-энергетической, фармацевтической и пищевой отраслях промышленности [1]. Они применяются для разделения смесей и получения чистых веществ, в том числе для очистки и опреснения воды.

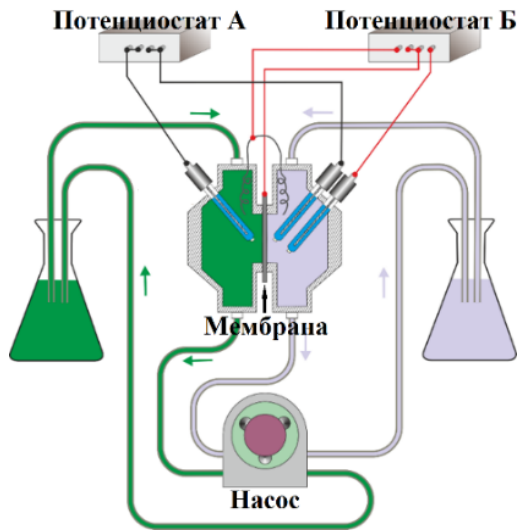
Одним из современных направлений в области мембранной науки является разработка и изучение мембран, способных менять селективность и проницаемость в зависимости от внешнего воздействия. В случае заряженных компонентов (в том числе ионов) в качестве такого воздействия может выступать электрическое поле. Если размер пор при этом сравним с длиной Дебая (порядка нескольких нанометров), то при переносе ионного раствора через мембрану в ее порах существенно возрастает концентра-

ция ионов противоположного знака по отношению к заряду стенки. В случае мембраны с проводящей поверхностью ее зарядом, и, соответственно, транспортом ионов, можно управлять путем приложения заданного потенциала к поверхности [2].

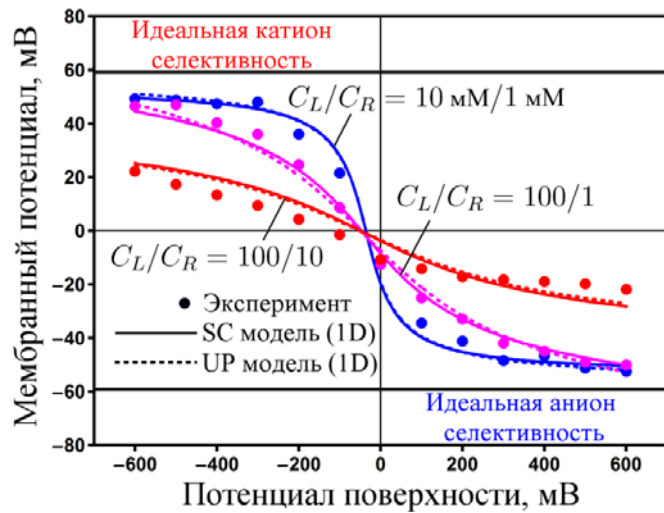
Целью работы является экспериментальное и теоретическое исследование управляемого транспорта ионов в мембранах из нановолокон Nafen, покрытых проводящим углеродным слоем, а также в мембранах из пористого анодного оксида алюминия с углеродным покрытием (ПАОА).

Экспериментальная часть. Синтез C-Nafen мембран осуществляется методом вакуумной фильтрации коллоидного раствора нановолокон оксида алюминия (диаметром 10–15 нм) через макропористую подложку с последующей сушкой при 80 °С [3; 4].

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-38-20046 мол_а_вед.



а



б

Схема экспериментальной установки (а); зависимость мембранного потенциала от потенциала поверхности мембраны для C-Nafen мембран (б)

Мембраны ПАОА были получены путем двухстадийного анодирования алюминиевой фольги (99,999 %) при температуре 5 °С и напряжении 25 В в 0,3 М растворе серной кислоты с последующим травлением алюминия и контролируемым снятием барьерного оксида (открытием пор) [5]. Углеродное покрытие на мембраны наносилось методом CVD при температуре 750 °С для ПАОА мембран и 900 °С для Nafen мембран в потоке аргона (200 мл/мин) и паров этанола (расход от 0,08 до 0,5 мл/мин в жидкой фазе). Толщина C-Nafen и ПАОА мембран составляет 400 мкм и 70 мкм, соответственно, а средний размер пор 25 нм (для обоих типов мембран).

Экспериментальное исследование ионной селективности проводилось путем измерения мембранного потенциала при нулевом токе, который возникает между резервуарами с различными концентрациями соли (C_L и C_R), разделяемыми мембраной. Мембранный потенциал возникает за счет потенциалов Доннана на границе мембрана / раствор, обусловленных равновесием электро-миграционных и диффузионных сил. Величина и знак мембранного потенциала определяют селективные свойства мембраны. Схема экспериментальной установки показана на рисунке, а. Измерение мембранного потенциала проводилось с помощью потенциостата А (Пи-50Pro, Элинс, Россия) и электродов 4,2М Ag/AgCl. На мембрану подавался потенциал с целью изменения её заряда и, соответственно, селективных свойств с помощью потенциостата Б (P-20X, Элинс, Россия) относительно электрода сравнения 4,2М Ag/AgCl. В качестве вспомогательного электрода использовались платиновая проволока или титановая фольга.

Теоретическая часть. Для теоретического описания переноса ионов через мембрану последняя представляется в виде массива круглых цилиндрических

пор (что полностью соответствует геометрии ПАОА мембраны, однако является идеализацией в случае C-Nafen мембраны). Таким образом, транспорт рассчитывается для одной поры, соединяющей два резервуара с заданной разностью концентраций и одинаковыми давлениями, которые принимаются равными нулю. Потенциал в левом резервуаре также считается равным нулю. Внутренность поры состоит из слоя Стерна вблизи стенки, который содержит только ориентированные электрическим полем молекулы воды, и диффузного слоя, в котором находятся ионы и молекулы воды. Потенциал в слое Стерна удовлетворяет уравнению Пуассона. Распределения потенциала, концентрации ионов и давления в диффузном слое описываются уравнениями Навье–Стокса, Нернста-Планка и Пуассона. На основе этих уравнений разработаны две модели – двумерная модель пространственного заряда (SC) и одномерная модель однородного потенциала (UP). В рамках последней модели предполагается, что размер поры меньше или сравним с длиной Дебая, поэтому неоднородностью всех величин в радиальном направлении можно пренебречь.

Результаты и обсуждение. Зависимость мембранного потенциала от потенциала, приложенного к поверхности мембраны, показана на рисунке, б для различных значений концентраций в резервуарах. Рассмотрим случай $C_L = 10$ мМ, $C_R = 1$ мМ. Экспериментальные данные показывают, что изменение поверхностного потенциала от +600 мВ до –600 мВ приводит к непрерывному изменению селективности от аниона к катиону. При больших величинах потенциала мембранный потенциал приближается к значениям, соответствующим идеальной катион или анион селективности. При увеличении концентрации (случай $C_L = 100$ мМ, $C_R = 10$ мМ) диапазон изменения мембранного потенциала уменьшается, что свиде-

тельству о снижении селективности. Это происходит из-за уменьшения длины Дебая, которая определяет толщину слоя противоионов вблизи стенки. Расчетные данные на основе 1D и 2D моделей хорошо согласуются с экспериментом. В качестве подгоночных параметров использовалась толщина концентрационного пограничного слоя вблизи мембраны и плотность химического заряда на внутренней плоскости Гельмгольца в слое Стерна.

Полученные результаты могут быть использованы для управляемого разделения ионных растворов, а также в области электрохимических сенсоров и нанофлюидных устройств.

References

1. Prospects of membrane science development / P. Yu. Apel, O. V. Bobreshova, A. V. Volkov et al. // *Membranes and membrane technologies*. 2019. Vol. 1. P. 45–63.
2. Controlling ion transport selectivity in gold nanotubule membranes / C. R. Martin, M. Nishizawa, K. Jirage et al. // *Advanced Materials*. 2001. Vol. 13. P. 1351–1362.
3. Effect of electric field on ion transport in nanoporous membranes with conductive surface / D. V. Lebedev, V. S. Solodovnichenko, M. M. Simunin, I. I. Ryzhkov // *Petroleum chemistry*. 2018. Vol. 58. P. 474–481.
4. Ryzhkov I. I., Vyatkin A. S., Mikhлина E. V. Modelling of conductive nanoporous membranes with switchable ionic selectivity // *Membranes and Membrane Technologies*. 2020. Vol. 2. P. 10–19.
5. Lee W., Park S. J. Porous anodic aluminum oxide: anodization and templated synthesis of functional nanomaterials // *Chemical Reviews*. 2014. Vol. 114. P. 7487–7556.

© Рыжков И. И., Борцова А. А., Мишнев М. О., Новикова С. А., Хартов С. В., 2020

УДК 537

КОМПОЗИТЫ ИЗ МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ДЛЯ СВЧ-УСТРОЙСТВ

А. С. Рысева

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)
Российская Федерация, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4
E-mail: anastasia_ryseva@mail.ru

Рассматривается обзор структуры, а также анализ свойств композитных материалов на основе многостенных углеродных нанотрубок для СВЧ-устройств. Обладая рядом преимуществ углеродные нанотрубки являются перспективными материалами для развития ракетно-космической отрасли.

Ключевые слова: СВЧ-устройства, композитные материалы, углеродные нанотрубки, радиопоглощающие материалы.

MULTI-WALLED CARBON NANOTUBE COMPOSITES FOR UHF-DEVICES

A. S. Ryseva

Moscow Aviation Institute (National Research University)
4, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russian Federation
E-mail: anastasia_ryseva@mail.ru

A review of the structure and analysis of the properties of composite materials based on multiwalled carbon nanotubes for microwave devices are considered. With a number of advantages, carbon nanotubes are promising materials for the development of the rocket and space industry.

Keywords: Microwave devices, composite materials, carbon nanotubes, radio-absorbing materials.

Композиты на полимерной основе с наноразмерными наполнителями в настоящее время являются предметом интенсивных исследований во многих научных лабораториях. В частности, углеродные нанотрубки, которые используются в качестве модифицирующих добавок для углеродных наполнителей, представляют особый интерес, поскольку они обладают уникальными физико-химическими свойствами.

Многослойные нанотрубки отличаются от однослойных гораздо большим разнообразием форм и конфигураций. Разнообразие структур проявляется как в продольном, так и в поперечном направлениях [1].

Структура многослойных нанотрубок состоит из набора цилиндрических трубок, коаксиально вложенных друг в друга. Другой вариант этой конструкции – набор коаксиальных призм, аналогично вложенных друг в друга. Все структуры характеризуются значением расстояния между соседними слоями графита, близким к 0,34 нм, которое присуще расстоянию между соседними слоями кристаллического графита, а наименьший диаметр углеродных нанотрубок составляет примерно 0,7 нм [1].

Природа проводимости нанотрубок зависит от их хиральности, то есть от группы симметрии, к которой принадлежит конкретная нанотрубка, и следует простому правилу: если индексы нанотрубки равны или их разность делится на три, нанотрубка находится в во всех остальных случаях свойства полуметаллического полупроводника [1]. Полупроводниковые модификации углеродных нанотрубок представляют

собой прямозонные полупроводники. Это означает, что может происходить прямая рекомбинация электронно-дырочных пар, приводящая к испусканию фотона. Прямозонность автоматически включает углеродные нанотрубки в число материалов, используемые в оптоэлектронике.

При изгибании углеродных нанотрубок проявляют исключительную эластичность, образуют своеобразные узлы, которые способны распрямляться. Это свойство отличает нанотрубок от большинства других материалов, имеющих сопоставимую прочность, но являющихся весьма хрупкими [2].

Углеродные нанотрубки проявляют необычайную эластичность при изгибе и имеют своеобразные узлы, которые могут распрямляться. Это свойство отличает нанотрубки от большинства других материалов сравнимой прочности, но являющихся весьма хрупких [2].

Особое значение имеет тот факт, что углеродные нанотрубки характеризуются низкой плотностью: 1,4 г/см³. С точки зрения удельной прочности и плотности нанотрубки явно превосходят все другие материалы. Ожидается, что использование композитных материалов с нанотрубками уменьшит вдвое массу космических аппаратов при сохранении их прочности [2].

Теплопроводность многослойных углеродных нанотрубок очень высока. Расчетное значение коэффициента теплопроводности однослойных нанотрубок является максимальным при 100 К и достигает 37 кВт / (м · К), что близко к абсолютному максимуму для алмаза и составляет 41 кВт / (м · К) при 104 К.

Кроме того, введение углеродных нанотрубок в полимеры значительно увеличивает их теплопроводность и теплостойкость. В настоящее время получены композиционные материалы, содержащие углеродные нанотрубки и имеющие теплопроводность более $1000 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ [3].

Углеродные нанотрубки могут иметь как металлическую, так и полупроводниковую проводимость. Необычные электрические свойства нанотрубок сделали их одним из основных материалов для нанoeлектроники. На их основе изготавливают гетероструктуры сложных полупроводников, т. е. структуры типа металл / полупроводник или соединение двух разных полупроводников [4].

Использование многослойных углеродных нанотрубок в качестве наполнителя для полимера является шагом к созданию материалов следующего поколения с улучшенными эксплуатационными свойствами. Помимо электрических свойств, полимерные материалы с углеродными нанотрубками представляют интерес с точки зрения их физико-механических свойств, адгезионной прочности, антистатических свойств, теплопроводности, термостойкости, износостойкости, устойчивости к среде, агрессивная работа и температурный диапазон материала.

Существует два принципиально различных способа получения полимерных композиций, содержащих наночастицы: формирование наночастиц внутри полимерной матрицы, играющих роль нанореакторов; введение готовых наночастиц в полимерную матрицу. Очевидно, что композиты с участием углеродных нанотрубок могут формироваться только по второму способу. В этом случае возможны оба варианта с образованием ковалентных связей между углеродными нанотрубками и полимерной матрицей и физической связи между трубками и макромолекулами [5].

Первым необходимым условием получения полимерных нанокомпозитов является равномерное распределение углеродных нанотрубок в матрице. Второе – межфазное взаимодействие, которое обеспечивает эффективную передачу механических напряжений от полимера к трубкам. Для получения композиционных материалов с определенными функциональными свойствами необходимо знать свойства углеродных нанотрубок, которые влияют на тип адгезионного взаимодействия между компонентами [5]. Первые работы в основном касались изучения взаимодействия трубок разной длины с полимерами разного типа и практически не учитывали влияние хиральности трубок на это взаимодействие [5].

Необходимым условием успешного сочетания нанотрубок и полимеров является максимально равномерное распределение частиц наполнителя в матрице. Однако тенденция углеродных нанотрубок к агрегированию из-за их высокой поверхностной энергии и большого отношения длина / диаметр предотвращает образование стабильных дисперсий углеродных нанотрубок в воде и органических средах, включая полимеры [5]. Поэтому интенсивно ведется поиск эффективных методов модификации, облегчающих

разделение. Эти методы включают химическую модификацию углеродных нанотрубок низкомолекулярными соединениями и полимерами с образованием ковалентных связей между молекулами модификатора и нанотрубкой, а также нековалентную модификацию поверхностно-активными веществами, оба из которых являются низкомолекулярными и полимерными по своей природе [5].

Углеродные нанотрубки играют важную роль в инновационных технологиях. Многие эксперты прогнозируют рост этой отрасли в ближайшие годы. Производственные мощности будут значительно увеличены, что приведет к снижению себестоимости продукции. По мере падения цен трубы будут пользоваться повышенным спросом и станут незаменимым материалом для многих устройств и оборудования.

Библиографические ссылки

1. Диэлектрические свойства композитов, модифицированных углеродными нанотрубками, в микроволновом диапазоне / В. Е. Мурадян, Е. А. Соколов, С. Д. Бабенко, А. П. Моравский // Журнал технической физики. 2010. Т. 80, № 2. С. 83–87.
2. Елецкий А. В. Углеродные нанотрубки // Успехи физических наук. 1997. № 167. С. 945–972.
3. Микроволновые характеристики композиционных радиоматериалов на основе полимера и углеродных структур / О. А. Доценко, В. И. Суслиев, В. Л. Кузнецов, И. Н. Мазов, О. А. Кочеткова // Доклады ТУСУРа. 2011. № 2. С. 36–40.
4. Королев Е. В. Проблемы и перспективы нанотехнологии в строительстве // Известия КазГАСУ, Строительные материалы и изделия. 2011. № 2. С. 200–209.
5. Алексеев А. Г., Корнев А. Е. Магнитные эластомеры // Химия. 1987. С. 152–170.

References

1. Dielektricheskie svoystva kompozitov, modifitsirovannykh uglerodnymi nanotrubkami, v mikrovolnovom diapazone / V. E. Muradyan, E. A. Sokolov, S. D. Babenko, A. P. Moravskiy // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. 2010. T. 80, № 2. P. 83–87.
2. Eletskiy A. V. Uglerodnye nanotrubki // Uspekhi fizicheskikh nauk. 1997. № 167. P. 945–972.
3. Mikrovolnovye kharakteristiki kompozitsionnykh radiomaterialov na osnove polimera i uglerodnykh struktur / O. A. Dotsenko, V. I. Suslyayev, V. L. Kuznetsov, I. N. Mazov, O. A. Kochetkova // Doklady TUSURa. 2011. № 2. P. 36–40.
4. Korolev E. V. Problemy i perspektivy nanotekhnologii v stroitel'stve // Izvestiya KazGASU, Stroitel'nye materialy i izdeliya. 2011. № 2. P. 200–209.
5. Alekseev A. G., Kornev A. E. Magnitnye elastomery // Khimiya. 1987. P. 152–170.

© Рысева А. С., 2020

УДК 537.213

**ПОЛУЧЕНИЕ КАРТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА
НА ПЛЕНКАХ СЕЛЕНИДА ИНДИЯ РАЗНОЙ ТОЛЩИНЫ***

О. В. Сакович^{1*}, О. П. Вайтузин¹, Д. И. Рогило²

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

²Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
Российская Федерация, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 30

*E-mail: ol.sakovitch@yandex.ru

В данной работе получены карты распределения электростатического потенциала в пленках селенида индия разной толщины, осажденных на кремниевую подложку. Селенид индия применяется для изготовления солнечных панелей на космических станциях.

Ключевые слова: полупроводники, карта распределения электростатического потенциала, метод зонда Кельвина, литографические структуры, работа выхода веществ.

**OBTAINING ELECTROSTATIC POTENTIAL DISTRIBUTION MAPS
ON INDIUM SELENIDE FILMS OF DIFFERENT THICKNESS**

O. V. Sakovich^{1*}, O. P. Vaituzin¹, D. I. Rogilo²

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

²Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB of RAS
30, Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

*E-mail: ol.sakovitch@yandex.ru

In this work, the electrostatic potential distribution maps on indium selenide films of different thicknesses deposited on a silicon substrate were obtained. Indium selenide is used for the manufacture of solar panels in space stations.

Keywords: semiconductors, electrostatic potential distribution map, Kelvin probe method, lithographic structures, work functions of materials.

Основная задача нанотехнологий сегодня – создать полупроводниковые структуры с новыми физическими и оптическими свойствами, с целью расширения областей применения полупроводников. Наибольшее развитие получило направление создаваемых структур до размеров, где изменяются их электронные свойства. Широкое применение в космической промышленности получил кремний. На сегодняшний день актуальна проблема создания структур монослоев халькогенидов на подложке кремния (111) [1; 2]

Под действием механического напряжения, возникающего из-за несоответствия значений постоянной решетки кремния и растущего слоя селенида индия, происходит изменение структуры халькогенида [3].

Для получения карты распределения поверхностного потенциала в тонких пленках полупроводников используется Кельвин-зондовая силовая микроскопия. Метод зонда Кельвина – это двухпроходная методика исследования образца. Во время первого прохода в

режиме PeakForce формируется изображения рельефа поверхности образца. Во время второго прохода зонд находится на некоторой высоте и измеряет силу взаимодействия зонда с поверхностью для дальнейшего определения поверхностного электрического потенциала [4].

На поверхности кремниевой подложки с нанесенной тонкой пленкой селенида индия, равной 10 нм, с помощью литографии сформирована структура, имеющая области с удаленным слоем селенида индия. На рис. 1, а представлена карта распределения поверхностного потенциала образца относительно алмазного зонда. На рис. 1, б изображен график изменения поверхностного потенциала при переходе от селенида индия к кремниевой подложке, из которого видно, что значение поверхностного потенциала алмазного зонда мало отличается от потенциала тонкой пленки селенида индия, в отличие от потенциала кремниевой подложки.

*Работа проводилась при финансовой поддержке РФФ (грант № 18-72-10063) с использованием оборудования ЦКП «Наноструктуры» (г. Новосибирск).

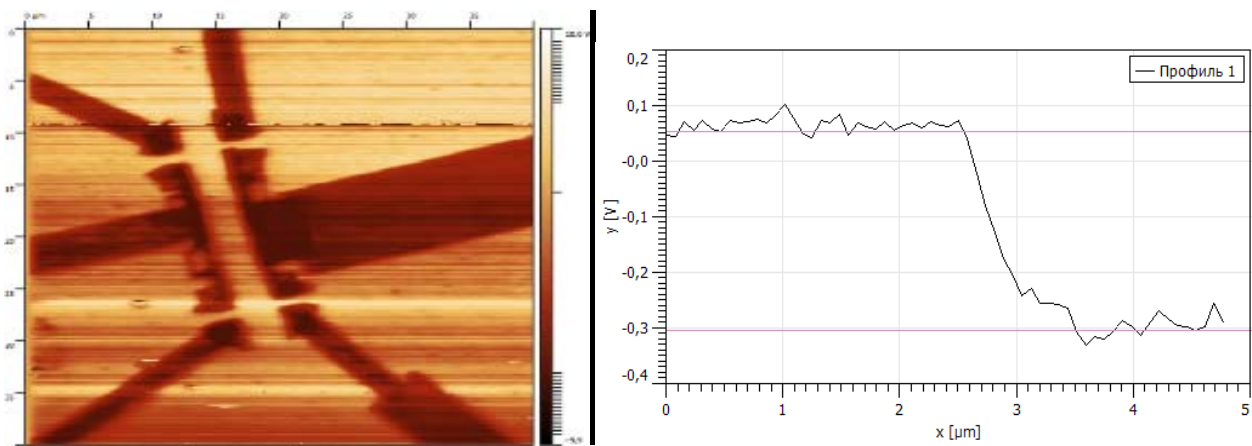


Рис. 1. Изображение участка кремниевой подложки с толщиной слоя селенида индия, равного 10 нм: а – карта распределения поверхностного потенциала; б – график изменения поверхностного потенциала при переходе от пленки селенида индия к кремниевой подложке

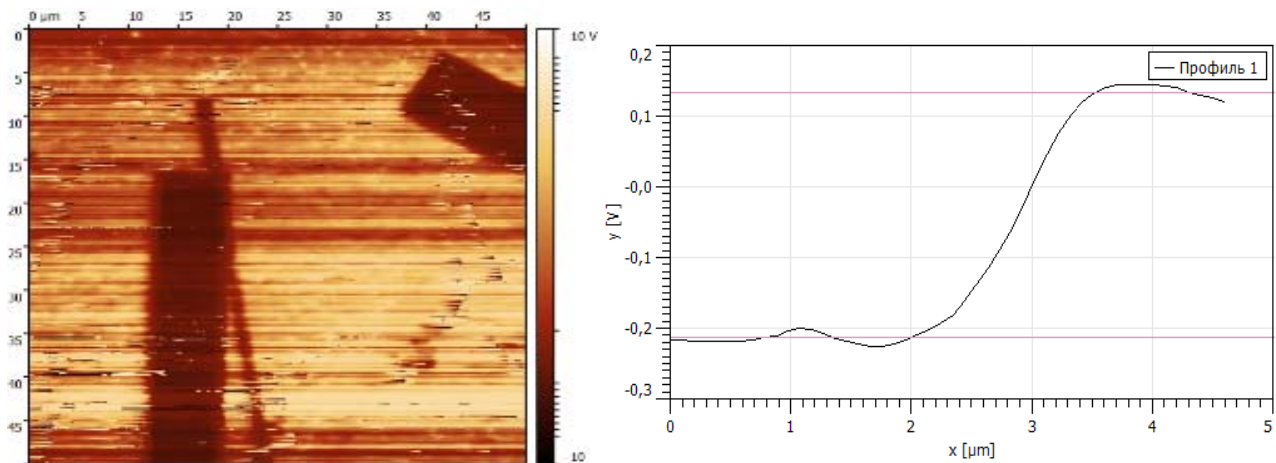


Рис. 2. Изображение участка кремниевой подложки с толщиной слоя селенида индия, равного 3 нм: а – карта распределения поверхностного потенциала; б – график изменения поверхностного потенциала при переходе от пленки селенида индия к кремниевой подложке

Из рисунка и графика видно, что значения поверхностного потенциала осажденной пленки селенида индия, равной 10 нм, и кремниевой подложки отличаются на 0,36 эВ.

Такие же измерения были проделаны для образца, где толщина пленки селенида индия равна 3 нм. Результаты представлена на рис. 2.

В данном случае значения поверхностного потенциала осажденной пленки селенида индия, равной 3 нм, и кремниевой подложки также отличаются на 0,36 эВ.

При соприкосновении двух полупроводников с разными работами выхода в приконтактной области появляются электрические заряды, а между их свободными концами возникает разность потенциалов. Значения внешней контактной разности потенциалов равно разности работ выхода, отнесенных к заряду электрона. Измерения электростатического потенциала поверхности или термодинамической работы выхода позволяет получить ценную информацию о состоянии поверхности [5].

Во время получения карты распределения поверхностного потенциала методом зонда Кельвина вычислена разность электростатических потенциалов, которая численно равна разнице работ выхода веществ до приведения в контакт.

Таким образом, сравнивая значения, полученные из рис. 1 и рис. 2, разность работ выхода веществ остается постоянной и не зависит от толщины осажденного слоя селенида индия на кремниевую подложку.

Библиографические ссылки

1. Панченко В. Я., Новодворский О. А., Голубев В. С. Технология лазерно-плазменного напыления пленок нанометровых толщин // Наука и технологии в промышленности. 2006. № 4. С. 39 – 51.
2. Ichikawa M., Doi T. Observation of Si(111) surface topography changes during Si molecular beam epitaxial growth using microprobe reflection high-energy electron diffraction // Appl. Phys. Lett. 1987. Vol. 50, Iss. 17. P. 1141–1143.

3. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. М. : Наука, 1977. 672 с.

4. Зондовая НаноЛаборатория ИНТЕГРА АУРА. Руководство пользователя. Ч. 3. Атомно-силовая микроскопия. 133 с.

5. Горшков А. П., Тихов С. В. Физика Поверхности полупроводников : учеб. пособие. Нижний Новгород : Нижегородский госуниверситет, 2013. 101 с.

References

1. Panchenko V. Ya., Novodvorskiy OA, Golubev VS Technology of laser-plasma spraying of films of nanometer thicknesses // Science and technology in industry. 2006. № 4. P. 39–51.

2. Ichikawa M., Doi T. Observation of Si(111) surface topography changes during Si molecular beam epitaxial growth using microprobe reflection high-energy electron diffraction // Appl. Phys. Lett. 1987. Vol. 50, Iss. 17. P. 1141–1143.

3. Bonch-Bruevich V. L., Kalashnikov S. G. Physics of semiconductors. M. : Nauka, 1977. 672 p.

4. Probe NanoLaboratory NTEGRA AURA. User's manual. Part 3. Atomic force microscopy. 133 p.

5. Gorshkov A. P., Tikhov S. V. surface physics of semiconductors : textbook. Nizhny Novgorod : Nizhny Novgorod State University, 2013 . 101 p.

© Сакович О. В., Вайтузин О. П.,
Рогило Д. И., 2020

УДК 538.911

СИНТЕЗ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ZnO/ОУНТ ПЛЕНОК*

И. А. Тамбасов^{1*}, А. С. Воронин², А. Н. Масыгин³, Е. В. Тамбасова³, М. О. Горнаков¹

¹Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/38

²Красноярский научный центр СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50

³Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: tambasov_igor@mail.ru

Тонкие нанокomпозитные ZnO/SWCNTs пленки были синтезированы с помощью вакуумной фильтрации и атомно-слоевого осаждения. Были измерены вольт-амперные характеристики образцов пленок. На основе вольт-амперных характеристик было рассчитано электрическое сопротивление для нанокomпозитных ZnO/ОУНТ пленок.

Ключевые слова: нанокomпозитные пленки, вакуумная фильтрация, атомно-слоевое осаждение, ZnO/SWCNTs, электрические свойства.

SYNTHESIS AND ELECTRICAL PROPERTIES OF THIN NANOCOMPOSITE ZnO/SWCNTs FILMS

I. A. Tambasov^{1*}, A. S. Voronin², A. N. Masyugin³, E. V. Tambasova³, M. O. Gornakov¹

¹Kirensky Institute of Physics SB RAS FRC KSC SB RAS
50/38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

²Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS, FRC KSC SB RAS
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

³Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: tambasov_igor@mail.ru

Thin nanocomposite ZnO / SWCNTs films were synthesized using vacuum filtration and atomic layer deposition. The current-voltage characteristics of the film samples were measured. Based on the current-voltage characteristics, the electrical resistance was calculated for nanocomposite ZnO / SWCNTs films.

Keywords: nanocomposite films, vacuum filtration, ZnO/SWCNTs atomic layer deposition, electrical properties.

Огромная часть неиспользованной тепловой энергии от промышленных производств и других областей жизнедеятельности людей рассеивается в окружающую среду. Часть этой тепловой энергии можно перевести в электрическую энергию с помощью термоэлектрических преобразователей. Значительная часть неиспользованной тепловой энергии находится в диапазоне температур до 200 °С [1].

В настоящее время необходимы материалы с высокими термоэлектрическими свойствами для эффективного преобразования тепловой энергии в электрическую необходимы.

Основными свойствами являются наличие высокой дырочной или электронной проводимости, наличие высокого коэффициента Зеебека, а также наи-

меньшего коэффициента теплопроводности в таких материалах [2]. Обобщённой характеристикой термоэлектрических материалов является термоэлектрическая добротность.

Современные исследования [3–4] показали, что материалы с высокими термоэлектрическими свойствами должны быть наноструктурированными. Это связано с тем, что за счет структурных особенностей можно изменять термоэлектрическую добротность. Структурные особенности могут выступать как центры рассеяния тепловых фононов и тем самым может снижаться коэффициент теплопроводности. В конечном счете, за счет снижения коэффициента теплопроводности увеличивается термоэлектрическая добротность.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке стипендии Президента Российской Федерации (СП-2235.2019.1).

В данной работе были синтезированы тонкие нанокompозитные ZnO/ОУНТ пленки с помощью вакуумной фильтрации и атомно-слоевого осаждения. Такие пленки синтезировались для исследования их термоэлектрических свойств. Сначала были сформированы тонкие ОУНТ пленки на стеклянных подложках с помощью вакуумной фильтрации. Толщина ОУНТ пленок была в диапазоне от ~ 5 до ~ 16 нм. После этого, на ОУНТ пленки был осажден ZnO нанослой с помощью атомно-слоевого осаждения. Толщина ZnO нанослоя была порядка ~ 140 нм. Температура подложки во время роста оксида цинка была 200 °С.

Впервые были измерены вольт-амперные характеристики для тонких нанокompозитных ZnO/ОУНТ пленок при комнатной температуре. Исследования показали, что электрическое сопротивление уменьшается при увеличении толщины ОУНТ. Модель параллельно подключенных резисторов достаточно хорошо описывала электрическое сопротивление образцов тонких нанокompозитных ZnO/ОУНТ пленок.

References

1. Toshima N. Recent progress of organic and hybrid thermoelectric materials // *Synthetic Metals*. 2017. Vol. 225. P. 3–21.
2. Snyder G. J., Toberer E. S. Complex thermoelectric materials // *Nature Materials*. 2008. Vol. 7. P. 105–114.
3. He J., Tritt T. M. Advances in thermoelectric materials research: looking back and moving forward // *Science*. 2017. Vol. 357. P. 1369.
4. Extraordinary thermoelectric performance realized in n-type PbTe through multiphase nanostructure engineering / J. Zhang, D. Wu, D. S. He et al. // *Advanced Materials*. 2017. Vol. 29. 170314
5. Thermite synthesis, structural and magnetic properties of Co-Al₂O₃ nanocomposite films / V. G. Myagkov, L. E. Bykova, V. S. Zhigalov et. al. // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 724. P. 820–826.

© Тамбасов И. А., Воронин А. С., Масюгин А. Н., Тамбасова Е. В., Горнаков М. О., 2020

УДК 535.015

КОЛЛЕКТИВНЫЕ РЕШЕТОЧНЫЕ РЕЗОНАНСЫ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАНОСТРУКТУРАХ ПРИ НАКЛОННОМ ПАДЕНИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ*А. Д. Утюшев^{1,2,3}, А. Е. Ершов^{1,2,3}, В. С. Герасимов^{2,3}, В. И. Закомирный^{2,3}, С. В. Карпов^{1,4*}¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79³Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/44⁴Институт физики имени Л. В. Киренского СО РАН
Российская Федерация, 660036, Красноярск, Академгородок 50/38

*E-mail: ad.utyushev@gmail.com

В рамках модели связанных диполей исследованы коллективные решеточные резонансы (КРР), возникающие при наклонном падении оптического излучения в двумерных массивах кремниевых наносфер конечных размеров.

Ключевые слова: периодические структуры из наночастиц, рассеяние света.

COLLECTIVE LATTICE RESONANCES IN DIELECTRIC NANOSTRUCTURES AT DIFFERENT ANGLES OF INCIDENCE RADIATIONA. D. Utyushev^{1,2,3}, A. E. Ershov^{1,2,3}, V. S. Gerasimov^{2,3}, V. I. Zakomirnyi^{2,3}, S. V. Karpov^{1,4*}¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation²Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation³Institute of Computational Modeling SB RAS
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation⁴L. V. Kirensky Institute of Physics SB RAS
50/38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

*E-mail: ad.utyushev@gmail.com

Collective lattice resonances (CLRs) emerging under oblique incidence in 2D finite-size arrays of Si nanospheres have been studied with the coupled dipole approximation.

Keywords: periodic structures of nanoparticles, light scattering.

Коллективные решеточные резонансы (КРР), возникающие при наклонном падении в двумерных решетках конечного размера, состоящих из наносфер Si, были изучены с помощью модели связанных диполей. Показано, что гибридизация между резонансами Ми, локализованными на отдельных частицах, и аномалиями Вуда–Рэллея [1], зависящими от угла падающей волны, позволяет эффективно настраивать КРР по всему видимому спектральному диапазону.

Сложная природа КРР в решетках их диэлектрических частиц как с электрическим дипольным (ЭД), так и с магнитным дипольным (МД) резонансами открывает путь для избирательной и гибкой настройки обоих типов КРР путем соответствующего изменения угла падения.

Кроме того, очень важны эффекты конечного размера, которые особенно выражены для КРР, возникающих для высоких порядков дифракции при наклонном падении.

В работе рассматриваются периодические решетки из наночастиц Si с радиусом $R = 65$ нм, расположенные в двумерной прямоугольной решетке с межчастичным расстоянием $h_y = 480$ нм и $h_x = 580$ нм вдоль осей Y и X соответственно.

При нормальном падении с $\mathbf{E}_0 = (E_{0x}, 0, 0)$ и $\mathbf{H}_0 = (0, H_{0y}, 0)$, решетки с этими геометрическими параметрами демонстрируют ЭД и МД КРР на длинах волн $\lambda \approx 450$ нм и $\lambda \approx 550$ нм.

*Работа поддержана Министерством Науки и Высшего Образования Российской Федерации, проект номер ФСРЗ-2020-008.

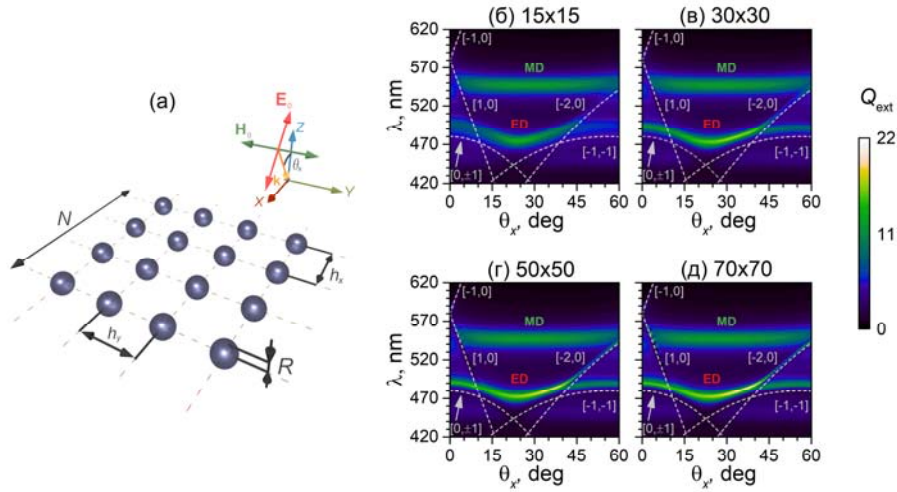


Рис. 1. Схематическое представление двумерной периодической решетки из $N \times N$ НЧ с радиусом R и шагом h_x и h_y вдоль осей Y и X соответственно (а). Вектор падающей волны k лежит в плоскости XOZ , а угол θ_x варьируется, а $\theta_y = 0$; (б–е) соответствуют эффективности экстинкции Q_{ext} для решеток из НЧ с $R = 65$ нм, $h_x = 580$ нм, $h_y = 480$ нм и для различного числа НЧ: (б) 15×15 ; (в) 30×30 ; (г) 50×50 ; (д) 70×70 . Пунктирные линии показывают спектральные положения аномалий Вуда – Рэлея [2]

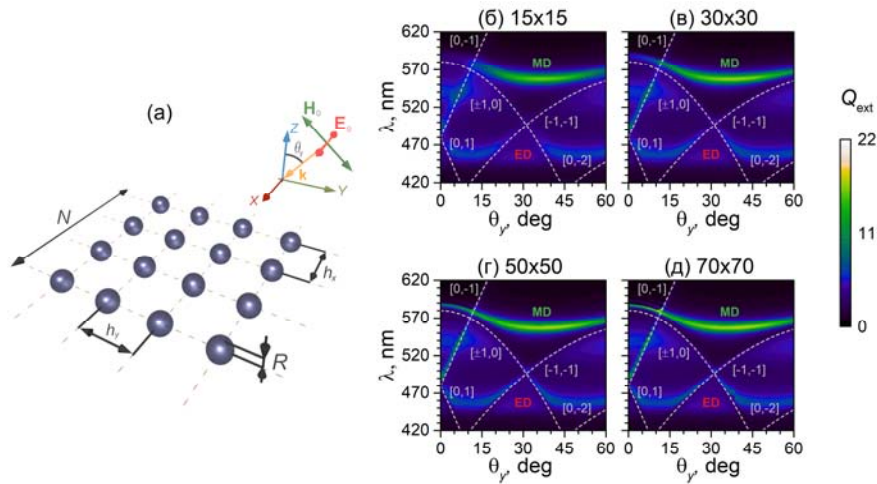


Рис. 2. То же, что и на рисунке 1, но с переменным углом падения θ_y и постоянным $\theta_x = 0$. Падающий волновой вектор $k \in YOZ$ [2]

Поскольку эффективная настройка ЭД и МД КРР происходит, если $h_{x,y}$ изменяются в направлении, перпендикулярном относительно поляризации E_0 или H_0 , полезно рассмотреть вдоль осей Y и X динамику поведения оптических резонансов, изменяя только один угол $\theta_{x,y}$ (рис. 1, а), оставляя другой $\theta_{x,y} = 0$ (рис. 2, а). Следуя этому подходу, можно отдельно изучать ЭД и МД КРР, в то время как для любой другой наклонной доли $\theta_x \neq 0$ и $\theta_y \neq 0$, что

показывает положительный оптический отклик для исследованных примеров.

На рис. 1, б–д показана эффективность экстинкции для решеток с различными $N \times N$ количеством наночастиц при падении падающего излучения под углами $0^\circ \leq \theta_x \leq 60^\circ$ и $\theta_y = 0$. Пунктирные линии показывают положения для аномалий Вуда – Рэлея, которые попадают в видимый диапазон для рассматриваемой геометрии. Видно, что, кроме общих аномалий $[0,1]$ и $[1,0]$, появились аномалии порядка

$[\pm 2, 0]$ и $[\pm 1, 1]$. С другой стороны, изменяя θ_y и поддерживая постоянный $\theta_x = 0$, можно контролировать спектральную позицию МД КРР, как ясно показано на рис. 2. В этом случае, ЭД КРР не исчезает так быстро при $0^\circ \leq \theta_y \leq 5^\circ$. ЭД-резонанс на единичной частице эффективно связывается с $[0, -1]$ аномалией Вуда – Рэлея и, таким образом, соответствующая ЭД компонента может быть настроена полностью до ≈ 570 нм, и, наконец, перекрывается с аномалией Вуда – Рэлея $[1, 0]$ МД КРР около 580 нм ниже $\theta_y < 12^\circ$. МД КРР может быть эффективно настроена только для $[1, 0]$ аномалии Вуда–Рэлея.

В заключение нужно сказать, что были рассмотрены особенности коллективных решеточных резонансов, возникающих в двумерных решетках с конечными размерами, состоящих из полностью диэлектрических наночастиц при наклонном падении внешнего излучения. Для частного случая наносфер Si, с фиксированными периодами h_x , аномалии Вуда–Рэлея высокого порядка находятся в пределах видимого диапазона длин волн и близки к оптическим резонан-

сам одиночной наночастицы Si. В этом случае эффективная гибридизация между электрическим дипольным или магнитным дипольным резонансами одиночной наночастицы приводит к появлению коллективных решеточных резонансов, которые могут наблюдаться только при наклонном падении.

Таким образом, результаты, представленные в этой работе, могут быть использованы при разработке фотонных устройств, где настройка резонансного отклика может быть достигнута без сложных технологий.

References

1. Wood R. W. On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum // Proc. Phys. Soc. Lond. 1902. Vol. 18. P. 269–275.
2. Collective Lattice Resonances in All-Dielectric Nanostructures under Oblique Incidence / A. D. Utyushev, V. I. Zakomirnyi, A. A. Ershov et al. // Photonics 2020. № 2. С. 1–11.

© Утюшев А. Д., Ершов А. Е., Герасимов В. С.,
Закомирный В. И., Карпов С. В., 2020

УДК 537.525.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ СВОЙСТВ НАНОЧАСТИЦ CuO*

А. В. Ушаков^{1,2}, И. В. Карпов^{1,2}, Л. Ю. Фёдоров^{1,2}

¹Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 660036, Красноярск, Академгородок, 50

²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

*E-mail: sfu-unesco@mail.ru

Исследовано влияние давления в плазмохимическом реакторе на магнитные свойства наночастиц оксида меди. Магнитные свойства обусловлены формированием ферромагнитной дендритной оболочки на антиферромагнитном ядре наночастицы, благодаря высокой скорости закалки.

Ключевые слова: оксид меди, наночастицы, магнитные свойства.

STUDY OF THE FERROMAGNETIC PROPERTIES OF CuO NANOPARTICLES

A. V. Ushakov^{1,2}, I. V. Karpov^{1,2}, L. Yu. Fedorov^{1,2}

¹Krasnoyarsk Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

²Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

*E-mail: sfu-unesco@mail.ru

The effect of pressure in a plasma-chemical reactor on the magnetic properties of copper oxide nanoparticles was studied. The magnetic properties are due to the formation of a ferromagnetic dendritic shell on the antiferromagnetic core of the nanoparticle due to the high quenching rate.

Keywords: copper oxide, nanoparticles, magnetic properties.

Вакуумно-дуговое нанесение нанодисперсных покрытий на детали аэрокосмической техники является эффективным методом повышения эксплуатационных свойств изделий работающих в экстремальных условиях [1].

Данный метод также позволяет получать изолированные наночастицы с необычными, по сравнению с объемными материалами, свойствами.

В связи с этим, научно значимой является проблема исследований дугового разряда и процессов, протекающих при его работе включающих связь между частицами, взаимодействия плазменных волн, химические реакции и динамические эффекты [2; 3]. Поэтому необходимость этой работы состоит в анализе результатов измерений [4; 5], морфологических и магнитных свойств наночастиц CuO, вызванных различными характеристиками и давлениями при получении.

Для получения наночастиц CuO использовалась экспериментальная установка, описанная в [4]. В работе [5] показано, что средний размер наночастиц и остаточное напряжение коррелирует с условиями распыления и зависят от давления в вакуумной камере. Данные предложенной модели были интерпо-

лированы для получения наночастиц со средним размером ~25 нм, но с разной скоростью закалки, что эквивалентно давлению в реакционной камере в 40 Па (образец 1) и 200 Па (образец 2).

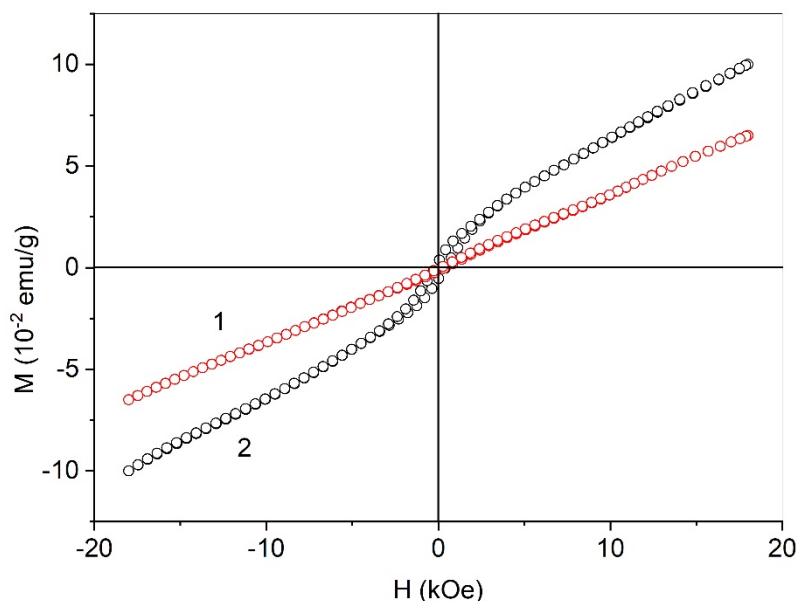
На рисунке представлена полевая зависимость намагниченности образцов 1, 2 CuO при комнатной температуре. Как следует из рисунка, обе кривые демонстрируют ферромагнетизм при малых напряженностях поля. Коэрцитивная сила H_c составила 40 и 300 Ое, а остаточная намагниченность M_r – $1,7 \cdot 10^{-4}$ и $6,2 \cdot 10^{-3}$ emu/g для образцов 1 и 2 соответственно.

В сильных полях петли не достигают насыщения и обе кривые демонстрируют парамагнетизм.

Проведя несложные вычисления можно вычлест парамагнитный вклад и определить намагниченность насыщения, составившую $1,3 \cdot 10^{-3}$ и $2,8 \cdot 10^{-2}$ emu/g для образцов 1 и 2 соответственно.

Таким образом, показано, что магнитные свойства наночастиц полученных при 40 Па близки по свойствам к объемному материалу и демонстрируют слабый ферромагнетизм. Наночастицы полученные при 200 Па демонстрируют существенное отклонение от свойств объемного материала, показывают магнитную твердость.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00021).



Полевая зависимость намагниченности образцов 1, 2 CuO при комнатной температуре.

Библиографические ссылки

1. Технология вакуумно-магнетронного напыления покрытий на элементы космического аппарата / П. А. Орлин, М. С. Руденко // Решетневские чтения : материалы XXII Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2018. С. 44–45.
2. Модель расплескивания жидкого металла в катодном пятне вакуумного дугового разряда / М. А. Гашков, Н. М. Зубарев, О. В. Зубарева и др. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2016. № 149(4). С. 896–908.
3. Численное моделирование устойчивого расширения плазмы взрывоэмиссионного центра в вакууме / Е. В. Нефёдцев, А. В. Батраков // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2015. № 148(4). С. 806–818.
4. Формирование кристаллических фаз CuO и Cu₂O в плазмохимическом реакторе дугового разряда низкого давления / А. В. Ушаков, И. В. Карпов, Л. Ю. Федоров и др. // Материаловедение. 2019. № 8. С. 26–32.
5. Investigation of the residual stresses effect on the magnetic properties of CuO nanoparticles synthesized in a low-pressure arc discharge plasma / I. V. Karpov, A. V. Ushakov, V. G. Demin et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2019. Vol. 490. P. 165492.

References

1. Orlin P. A., Rudenko M. S. [Technology of vacuum-magnetron spraying of coatings on the elements of the space vehicle] // *Reshetnevskie chteniya : materialy XXII Mezhdunar. nauch. konf.* / Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2018. P. 44–45 (In Russ.).
2. Model of liquid-metal splashing in the cathode spot of a vacuum arc discharge / M. A. Gashkov, N. M. Zubarev, O. V. Zubareva et al. // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2016. Vol. 122. P. 776–786.
3. Nefedtsev E. V., Batrakov A. V. Numerical simulations of stable explosive-emission center plasma expansion in vacuum // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2016. Vol. 121. P. 706–716.
4. Formation of CuO and Cu₂O Crystalline Phases in a Reactor for Low-Pressure Arc Discharge Synthesis / A. V. Ushakov, I. V. Karpov, L. Yu. Fedorov et al. // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2020. Vol. 11. P. 232–237.
5. Investigation of the residual stresses effect on the magnetic properties of CuO nanoparticles synthesized in a low-pressure arc discharge plasma / I. V. Karpov, A. V. Ushakov, V. G. Demin et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2019. Vol. 490. P. 165492.

© Ушаков А. В., Карпов И. В., Федоров Л. Ю., 2020

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ $Tm_{0,1}Mn_{0,9}S$ *

А. М. Харьков*, А. В. Гельгорн, В. В. Мироненко

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

*E-mail: khark.anton@mail.ru

Проведены измерения диэлектрической проницаемости в интервале частот 10^2 – 10^6 Hz и температур 300–500 K в магнитных полях до 12 kOe в твердых растворах $Tm_xMn_{1-x}S$ ($x = 0,1$). Установлены миграционный вклад и вклад от релаксационной проводимости в электрическую поляризацию. В модели Дебая вычислено время релаксации и энергия активации. Найдено уменьшение емкости и времени релаксации в магнитном поле.

Ключевые слова: твердые растворы, диэлектрическая проницаемость, модель Дебая.

DIELECTRIC PERMITTIVITY $Tm_{0,1}Mn_{0,9}S$

A. M. Kharkov*, A. V. Gelgorn, V. V. Mironenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: khark.anton@mail.ru

Dielectric permittivity was measured in the frequency range 10^2 – 10^6 Hz and temperatures 300–500 K in magnetic fields up to 12 kOe in solid solutions $Tm_xMn_{1-x}S$ ($x = 0.1$). The migration contribution and the contribution from relaxation conductivity to electric polarization are established. The Debye model calculates the relaxation time and activation energy. A decrease in the capacity and relaxation time in the magnetic field was found.

Keywords: solid solutions, dielectric permittivity, Debye model.

Материалы на основе твердых растворов $Tm_xMn_{1-x}S$, в перспективе могут использоваться для элементной базы в микроэлектронике, в которых проявляется взаимосвязь магнитных и электрических свойств. Такие магнитоэлектрики и мультиферроики, представляют интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Особое внимание привлекают материалы, обнаруживающие магнитоэлектрические свойства в области комнатных и более высоких температур в связи с практическим применением в микроэлектронике для записи и хранения информации [1].

Цель исследования установить влияние магнитного поля на диэлектрические характеристики и диэлектрические потери при электронном допировании полупроводников.

Диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери определены из измерения емкости и тангенса угла потерь, измеренных на приборе AM-3028 component analyzer in the frequency range of 10^2 – 10^6 Hz at temperatures of 300–500 K. Магнитоемкость образца определялась как: $\delta = (C(H) - C(0))/C(0)$, где $C(H)$ – емкость образца, измеренного в магнитном поле $H = 12$ kOe, приложенном параллельно пластинам конденсатора, $C(0)$ – емкость без магнитного поля. Для исключения токов утечки между образцом и пла-

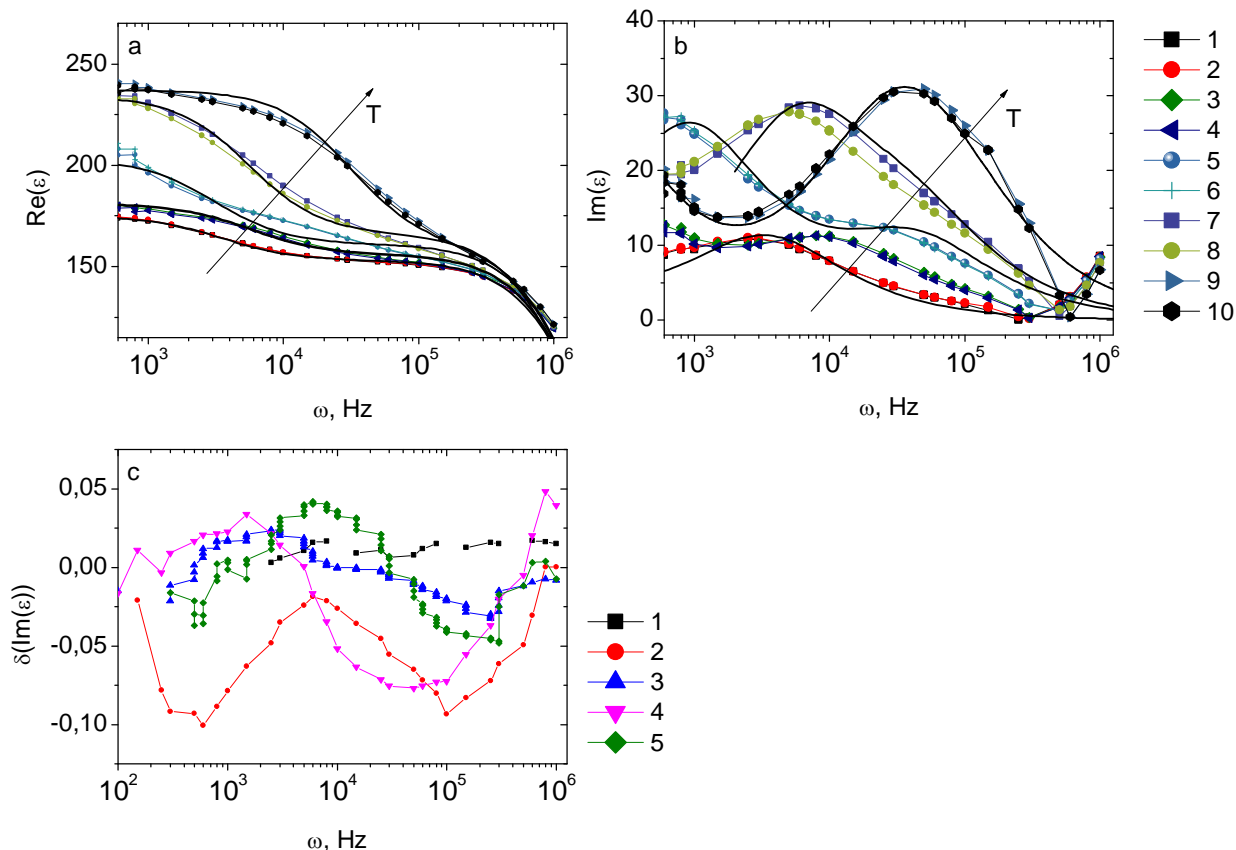
стинами конденсатора помещалась слюда, толщиной несколько микрометров [2].

Из частотной зависимости диэлектрической проницаемости можно оценить время релаксации и механизм релаксации дипольных моментов. На рисунке представлены частотные зависимости реальной и мнимой части диэлектрической проницаемости от температуры для образца $Tm_xMn_{1-x}S$ с $x = 0,1$, которые описываются в модели Дебая [3].

Диэлектрические потери вызваны электрон-фононным взаимодействием носителей тока с фононами. Мнимая часть диэлектрической проницаемости связана с вещественной частью оптической проводимости σ' соотношением $Im(\epsilon) = \sigma'/\omega$. С ростом концентрации увеличивается радиус локализации электронов, связанных с ионами тулия.

В этих образцах также реализуется Дебаевский и электрон-фононный механизм релаксации индуцированной электрической поляризации. При нагревании максимум $Im(\epsilon)$ смещается в область высоких частот. Энергия активации $\Delta E = 0,2$ эВ (1550 см⁻¹). Частота кроссовера, найденная из минимума $Im(\epsilon(\omega))$, растет при нагревании образца по степенному закону $\omega_c \sim T^{3/2}$. Возможно, это связано со смещением химпотенциала по температуре и с увеличением электронной плотности $g \sim T^{3/4}$.

*Работа выполнена при поддержке молодежного гранта СибГУ, 2020.



Действительная $Re(\epsilon)$ (a) и мнимая $Im(\epsilon)$ (b) компоненты диэлектрической проницаемости образца $Tm_xMn_{1-x}S$ с $x = 0,1$ без поля $H = 0$ при температурах $T = 300$ К(1), 350 К(3), 400 К(5), 450 К(7), 500 К(9) и в магнитном поле $H = 8$ кОе при температурах $T = 300$ К(2), 350 К(4), 400 К(6), 450 К(8), 500 К(10) от частоты ω . Вычисления в модели Дебая – сплошная линия (a, b). Относительное изменение мнимой части диэлектрической проницаемости $\delta(Im(\epsilon))$ в магнитном поле $H = 8$ кЭ при температурах $T = 300$ К(1), 350К(2), 400К(3), 450К(4), 500К(5) от частоты ω (c)

В магнитном поле диэлектрическая проницаемость уменьшается и наибольшее изменение $\Delta\epsilon = 2,5\%$ достигается при $T = 450$ К. При остальных температурах магнитоёмкость не превышает $0,5\%$. Смещение максимума мнимой компоненты диэлектрической проницаемости к низким частотам в магнитном поле приводит к изменению знака диэлектрических потерь с положительного на отрицательный с $\delta(Im(\epsilon)) = 0,024$ до $-0,08$ при $T = 450$ К (см. рисунок, c) [4].

Диэлектрическая проницаемость в интервале частот до одного мегагерца при электронном допировании в $Tm_xMn_{1-x}S$ обусловлена миграционной поляризацией локализованных электронов и релаксационной проводимостью, связанной с излучением и поглощением фононов. В модели Дебая найдено время релаксации электрической поляризации, которая имеет активационный характер и описывается законом Аррениуса. В окрестности концентрации протекания ионов тулия по решетке исчезает вклад миграционной поляризации и диэлектрические характеристики обусловлены релаксационной проводимостью в области высоких частот, интервал которых не зависит от температуры. Из ИК спектроскопии $Tm_xMn_{1-x}S$ установлен канал релаксации поляризации за счет рекомбинации электрон-дырочных пар при малых концентрациях.

В магнитном поле диэлектрическая проницаемость уменьшается на несколько процентов и практически не меняется в образце с концентрацией вблизи концентрации протекания. Увеличение времени релаксации в магнитном поле приводит к сдвигу максимума диэлектрических потерь в область низких частот и к смене знака диэлектрических потерь в магнитном поле по частоте.

Библиографические ссылки

1. Исследование электрических и термоэлектрических свойств сульфидов $Tm_xMn_{1-x}S$ / С. С. Аплеснин, О. Б. Романова, А. И. Галяс, В. В. Соколов // ФТТ. 2016. Т. 58. С. 21–26.
2. Magnetoresistance, magnetoimpedance, magnetothermopower, and photoconductivity in silver-doped manganese sulfides // О. В. Романова, S. S. Aplesnin, L. V. Udod et al. // J. Appl. Phys. 2019. Vol. 125. P. 175706.
3. Influence of induced electrical polarization on the magnetoresistance and magnetoimpedance in the spin-disordered $Tm_xMn_{1-x}S$ solid solution / S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov, A. M. Kharkov et al. // Phys. Status Solidi B. 2019. № 10. P. 1900043.

4. Аплеснин С. С., Ситников М. Н. Магнитотранспортные эффекты в парамагнитном состоянии в $Gd_xMn_{1-x}S$ // ЖЭТФ. 2014. Т. 100. С.104–110.

References

1. Investigation of electrical and thermoelectric properties of sulfides $Tm_xMn_{1-x}S$ / S. S. Aplesnin, O. B. Romanova, A. I. Galyas, V.V. Sokolov // *FTT*. 2016. Vol. 58. P. 21–26 (In Russ).

2. Magnetoresistance, magnetoimpedance, magnetothermopower, and photoconductivity in silver-doped manganese sulfides // O. B. Romanova, S. S. Aplesnin,

L. V. Udod et al. // *J. Appl. Phys.* 2019. Vol. 125. P. 175706.

3. Influence of induced electrical polarization on the magnetoresistance and magnetoimpedance in the spin-disordered $Tm_xMn_{1-x}S$ solid solution / S. S. Aplesnin, M. N. Sitnikov, A. M. Kharkov et al. // *Phys. Status Solidi B*. 2019. № 10. P. 1900043.

4. Aplesnin S. S., Sitnikov M. N. [Magnetotransport effects in the ferromagnetic state in $Gd_xMn_{1-x}S$] // *ZhETF*. 2014. Vol. 100. P. 104–110 (In Russ).

© Харьков А. М., Гельгорн А. В.,
Мироненко В. В., 2020

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ СЕЧЕНИЯ НЕУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ Al РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

Т. Н. Хохлова*, Т. А. Андриященко, А. С. Паршин

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

*E-mail: tanya.xo.xo03@gmail.com

В данной работе проведено исследование спектров сечения неупругого рассеяния электронов Al, который является перспективным материалом для создания всё новых сплавов на его основе.

Ключевые слова: факторный анализ, пики Тоугарда, метод Гергели, алюминий, методы электронной спектроскопии, спектроскопия сечения неупругого рассеяния электронов, спектроскопия характеристических потерь энергии электронов.

STUDY OF INELASTIC ELECTRON SCATTERING CROSS SECTION SPECTRA OF Al BY DIFFERENT METHODS

T. N. Khokhlova*, T. A. Andryushchenko, A. S. Parshin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: tanya.xo.xo03@gmail.com

In this paper inelastic electron scattering cross-section spectra of Al were studied. Aluminum is a promising material for creating more and more new alloys based on it.

Keywords: factor analysis, Tougaard functions, Gergely method, aluminium, electron spectroscopy methods, inelastic electron scattering cross-section spectroscopy, electron energy loss spectroscopy.

Алюминий представляет собой активно используемый материал в ракетно-космической отрасли, а его исследование при помощи методов электронной спектроскопии позволяет получить результаты, используемые в дальнейшем анализе материалов на его основе. При помощи совокупности различных методов анализа спектров возможно получение более качественных результатов.

В данной работе проведено исследование спектров сечения неупругого рассеяния электронов ($K\lambda$ -спектры) алюминия, которые были получены путём преобразования исходных спектров характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ). При помощи комплексного исследования посредством факторного анализа [1–3], аппроксимации пиками Тоугарда [4–6] и разложением методом Гергели [4; 7–8] были выделены вклады поверхностной и объёмной природы.

Экспериментальные спектры характеристических потерь энергии электронов получены с помощью сверхвысоковакуумного фотоэлектронного спектрометра SPECS при энергиях первичных электронов 200–3500 эВ. Из данных спектров согласно алгоритму [9] в программном пакете QUASES™ XS REELS [10] получены $K\lambda$ -спектры, представляющие собой произведения средней длины неупругого пробега электронов λ и дифференциального сечения неупругого рассеяния $K(E_0, E_0 - E)$, где E_0 и E – энергии первичных и отраженных электронов, соответственно, $T = E_0 - E$ – потери энергии электронов.

На $K\lambda$ -спектрах Al при всех энергиях первичных электронов наблюдаются два ярко-выраженных пика при энергиях потерь 15,1 и 30,3 эВ. Первый соответствует однократным потерям энергии электронов на возбуждение объёмного плазмона, а второй – процессу двукратных потерь энергии на возбуждение объёмного плазмона. В низкоэнергетической области присутствует вклад поверхностной природы, не разрешенный по энергии из-за аппаратных особенностей. В теории он соответствует однократным потерям энергии на возбуждение поверхностного плазмона. Основной задачей всех применяемых методов является выделение именно этого неразрешенного вклада.

В факторном анализе учитывается весь закономерно изменяющийся массив исходных $K\lambda$ -спектров, из которого были выделены поверхностный и объёмный вклады. Пик, соответствующий двукратным потерям энергии электронов на возбуждение объёмного плазмона присутствует в составе объёмного фактора.

Аппроксимация пиками Тоугарда, в свою очередь, применяется к каждому $K\lambda$ -спектру индивидуально. Благодаря использованию данного метода возможно выделить большее число составляющих в спектрах. В применении к $K\lambda$ -спектрам Al возможно отдельно задать пик, описывающий двукратные потери энергии.

Метод Гергели допускает выделение пика объёмного плазмона без учета влияния пиков поверхностной природы и последующее выделение поверхностной составляющей. Однако с его помощью невозмож-

но учитывать интенсивность пика двукратных потерь энергии на возбуждение объёмного плазмона, присутствующего в данных спектрах.

При помощи совместного использования трех заявленных методов было выполнено разделение вкладов различной природы с последующим определением их энергий и интенсивностей. Зависимости интенсивности потерь энергии от энергии первичных электронов, определённые разными методиками, согласуются и подтверждают природу выделенных вкладов.

Сравнение результатов показало, что каждый из методов обладает определёнными достоинствами, а их комплексное применение способствует получению исчерпывающей информации при анализе электронных спектров.

Библиографические ссылки

1. Measurement of optical constants of Si and SiO₂ from reflection electron energy loss spectra using factor analysis method / H. Jin, H. Shinotsuka, H. Yoshikawa et al. // *Journal of applied physics*. 2010. № 107. P. 083709, 1-11.
2. Factor analysis of inelastic electron scattering cross section spectra of FeSi₂ / A. Yu. Igumenov, A. S. Parshin et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. XX International Scientific Conference Reshetnev Readings*. 2019. Vol. 467. P. 012010, 1-5.
3. Factor analysis of inelastic electron scattering cross section spectra of iron monosilicide FeSi / А. Ю. Игуменов, А. С. Паршин, Т. А. Андриященко // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2019. Т. 20, вып. 1. С. 99–105.
4. Тонкая структура спектров сечения неупругого рассеяния электронов и поверхностный параметр Si / А. С. Паршин, А. Ю. Игуменов, Ю. Л. Михлин и др. // *Физика и техника полупроводников*, 2015. Т. 49 (4). С. 435–439.
5. Сравнительный анализ спектров характеристических потерь энергии электронов и спектров сечения неупругого рассеяния в Fe / А. С. Паршин, А. Ю. Игуменов, Ю. Л. Михлин и др. // *Физика твердого тела*, 2016. Т. 58 (5). С. 881–887.
6. Reflection electron energy loss spectroscopy of structures based on silicon and transition metals / A. S. Parshin, A. Yu. Igumenov et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017. Т. 255. P. 012019, 1-7.
7. Experimental estimation of surface excitation parameter for surface analysis / G. Gergely, M. Menyhard, S. Gurban et al. // *Surface and Interface Analysis*. 2002. Vol. 33, № 5. P. 410–413.
8. Gergely, G. Surface excitation effects in electron spectroscopy / G. Gergely, M. Menyhard, S. Gurban et al. // *Solid State Ionics*. 2001. Vol. 141–142. P. 47–51.
9. Tougaard S. Differential inelastic electron scattering cross sections from experimental reflection electron-energy-loss spectra: Application to background removal in electron spectroscopy // *Phys.Rev. B*, 1987. Vol. 35 (13). P. 6570–6577.
10. QUASES – Software packages to characterize surface nano-structures by analysis of electron spectra [Электронный ресурс]. URL: [http:// www.quases.com](http://www.quases.com) (дата обращения: 01.05.2018).

References

1. Measurement of optical constants of Si and SiO₂ from reflection electron energy loss spectra using factor analysis method / H. Jin, H. Shinotsuka, H. Yoshikawa et al. // *Journal of applied physics*. 2010. № 107. P. 083709, 1-11.
2. Factor analysis of inelastic electron scattering cross section spectra of FeSi₂ / A. Yu. Igumenov, A. S. Parshin et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. XX International Scientific Conference Reshetnev Readings*. 2019. Vol. 467. P. 012010, 1-5.
3. Factor analysis of inelastic electron scattering cross section spectra of iron monosilicide FeSi / А. Ю. Игуменов, А. С. Паршин, Т. А. Андриященко // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2019. Т. 20, вып. 1. С. 99–105.
4. On the Fine Structure of Spectra of the Inelastic-Electron-Scattering Cross Section and the Si Surface Parameter / A. S. Parshin, A. Yu. Igumenov, Yu. L. Mikhlin et al. // *Semiconductors*, 2015. Vol. 49 (4). P. 423–427. (In Russ.)
5. Comparative Analysis of the Characteristic Electron Energy-Loss Spectra and Inelastic Scattering Cross-Section Spectra in Fe / A. S. Parshin, A. Yu. Igumenov, Yu. L. Mikhlin et al. // *Physics of the Solid State*. 2016. Vol. 58 (5). P. 908–914. (In Russ.)
6. Reflection electron energy loss spectroscopy of structures based on silicon and transition metals / A. S. Parshin, A. Yu. Igumenov et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017. Т. 255. P. 012019, 1-7.
7. Experimental estimation of surface excitation parameter for surface analysis / G. Gergely, M. Menyhard, S. Gurban et al. // *Surface and Interface Analysis*. 2002. Vol. 33, № 5. P. 410–413.
8. Gergely, G. Surface excitation effects in electron spectroscopy / G. Gergely, M. Menyhard, S. Gurban et al. // *Solid State Ionics*. 2001. Vol. 141–142. P. 47–51.
9. Tougaard S. Differential inelastic electron scattering cross sections from experimental reflection electron-energy-loss spectra: Application to background removal in electron spectroscopy // *Phys.Rev. B*, 1987. Vol. 35 (13). P. 6570–6577.
10. QUASES – Software packages to characterize surface nano-structures by analysis of electron spectra [Electronic resource]. URL: [http:// www.quases.com](http://www.quases.com) (access: 01.05.2018).

© Хохлова Т. Н., Андриященко Т. А., Паршин А. С., 2020

УДК 543.428

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НЕСООТВЕТСТВИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕШЕТКИ ГЕТЕРОСИСТЕМЫ

Т. Н. Хохлова^{1*}, А. С. Дерябин², О. П. Пчеляков²

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

²Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
Российская Федерация, 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

*E-mail: tanya.xo.xo03@gmail.ru

Твердый раствор $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ используется при изготовлении высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей, которые широко используются в ракетно-космической отрасли.

Ключевые слова: твердый раствор, кремний, гетероструктуры, низкотемпературная молекулярно-лучевая эпитаксия, пронизывающие дислокации, дислокации несоответствия.

STUDY OF THE STRUCTURE OF HETEROEPITAXIAL LAYERS $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ DEPENDING ON DISCREPANCY OF THE LATTICE PARAMETERS OF THE HETEROSYSTEM

Т. N. Khokhlova^{1*}, A. S. Deryabin², O. P. Pchelyakov²

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

²Institute of Physics of semiconductors, Siberia department of Russian Academy of Sciences
13, Academician Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

*E-mail: tanya.xo.xo03@gmail.ru

Solid solutions apply in production high-performance photovoltaic converters, which are widely used in rocket space industry.

Keywords: solid solution, silicon, heterostructure, low - temperature molecular beam epitaxy, piercing dislocations, called threading dislocations.

Основами современной ракетно-космической отрасли являются микро-, опто- и нанoeлектроника. Развитие данных технологий с каждым годом принимает все большие обороты, и они являются неотъемлемой частью современной техники, без которых, на данный момент, не может обойтись человечество. Основной проблемой освоения космоса является проблематичность отправки космических аппаратов с большой массой, поэтому уменьшение размеров и массы электрорадиоэлементов является ключевым решением этой задачи.

Ежегодно огромный вклад в космическую отрасль вносят фундаментальные исследования в области нанотехнологий. Актуальным является получение качественных элементов, представляющих собой различного рода наноматериалы, которые служат составляющими компонентами в ракетно-космической технике.

Кремниевая технология охватила практически всю электронику, оснащающую как космические аппараты, так и наземные лаборатории для наблюдения и мониторинга космических объектов. Разработаны и широко применимы датчики на основе объемных кремниевых микроэлектромеханических структур.

Реализация кремниевой технологии для получения полупроводниковых приборов на основе гетероструктур (ГС) GeSi/Si [3] является одной из самых перспек-

тивных и востребованных на рынке современных технологий. Германий является единственным химическим элементом, который позволяет получать ГС на кремниевых подложках в широком диапазоне состава. Твердый раствор GeSi используется при изготовлении различных полупроводниковых приборов, интегральных цифровых схем. Материал GeSi лежит в основе высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей для солнечных батарей, которые широко используются в космической и авиационной технике.

Возникает необходимость в получении качественных полупроводниковых материалов на основе твердого раствора GeSi . В настоящее время ведутся экспериментальные исследования по выявлению наиболее приемлемой методики для получения качественного материала. Так же ведутся исследования по выявлению и уменьшению количества дефектов в структуре объемного кристалла.

В данной работе представлены исследования гетероэпитаксиальных слоев твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ с различным содержанием Ge в зависимости от несоответствия параметров решетки гетеросистемы. Технологический эксперимент проводился на автоматизированной многокамерной установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Катунь» в ИФП СО РАН им. А. В. Ржанова, г. Новосибирск. С помощью метода низкотемпературной молекулярно-лучевой эпитак-

сии (МЛЭ) были получены ГС $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ с различной долей x . Метод низкотемпературной МЛЭ является хорошо отработанной технологией получения различного рода полупроводниковых структур (ПС). Данный метод позволяет получать качественные ПС с высокими характеристиками. Это дает преимущество в использовании данной технологии в промышленном производстве.

Исследования морфологии поверхности гетероэпитаксиальных пленок $\text{GeSi}/\text{Si}(001)$ проводились на атомно-силовом микроскопе «Solver P47-PRO». В результате изучения рельефа образцов был сделан ряд предположений о зарождении и распространение пронизывающих дислокаций (ПД) в ГС $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$. К исследуемым образцам был применен метод структурно-чувствительного травления, являющийся достоверным методом по выявлению ПД в гетеросистемах твердого раствора $\text{GeSi}/\text{Si}(001)$ с различной долей x .

Далее благодаря методу двухкристальной дифрактометрии представлен анализ рентгеновских кривых качания исследуемых образцов ГС $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ с различным содержанием Ge. Данный анализ позволил получить результаты напряженного состояния каждой пленки – степень релаксации и численное значение величины x . Так же в ходе изучения морфологии рельефа образцов было численно установлено значение плотности ПД в гетеросистеме пленка-подложка и значения коэффициента шероховатости (Root Mean Square). Следует отметить, что при увеличении количества полос скольжения на поверхности исследуемых пленок численное значение RMS возрастает. При численном значении RMS больше 2 нм в случае исследования поверхности твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ уже можно судить о наличии ПД и об их относительно большей плотности. Так же в приведенных исследованиях закономерно то, что с увеличением RMS увеличилась степень релаксации пленки.

На примере исследований, представленных в работе, был изучен механизм действия низкотемпературного буферного слоя кремния Si (LT–Si). На основании проведенных экспериментов можно заключить, что основным источником дислокаций несоответствия (ДН) становятся точечные дефекты. Это осуществляется в присутствии поля напряжений растущего псевдоморфного слоя твердого раствора, что способствует упорядочению первичной сетки ДН и, в конечном счете, приводит к снижению плотности ПД. Данная работа подтверждает, что при создании пластической релаксации напряженной пленки GeSi твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ возникают зарождения ДН, относящиеся к внутренним дислокациям. Такие ДН связаны, в основном, с загрязнениями подложки Si. Результаты работы соответствуют результатам, описанным в работах [1–2]. Количество ДН существенно уменьшается при использовании метода низкотемпературной МЛЭ с наращиванием LT–Si.

Следует вывод, что наблюдаемый рельеф поверхности является следствием действия фундаментальных механизмов. К таким механизмам относится упругая релаксация напряжения, возникшая за счет по-

явления шероховатостей на поверхности напряженной пленки. Так же к фундаментальным механизмам относится образование ступеней из-за пересечения поверхности ПД в процессе пластической релаксации напряженной ГС. Это подтверждает тот факт, что при росте и релаксации гетероэпитаксиальных слоев $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ с $x \sim (0,2-0,3)$ основной вклад в зарождение ДН вносит поверхность растущего слоя [2]. Полученные результаты соответствуют предположениям о том, что именно возникновение наблюдаемого рельефа на поверхности пленки является причиной появления концентраторов напряжений, которые являются источниками ДН. Тем самым ограничивается рост пленок GeSi, релаксирующих с приемлемой плотностью ПД, где величина доли Ge не превышает 0,3 [2]. Так же стоит отметить мультиплицирование выращенных гетероэпитаксиальных слоев твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ с различной величиной x , где шаг Ge в составе исследуемых пленок составил более 11 %.

Библиографические ссылки

1. Достоверность выявления пронизывающих дислокаций в эпитаксиальных пленках с помощью структурно-чувствительного травления / А. С. Дерябин, Л. В. Соколов, Е. М. Труханов, К. Б. Фрицлер. // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44, вып. 20.
2. О зарождении дислокаций несоответствия с поверхности при выращивании пленок $\text{GeSi}/\text{Si}(001)$ методом низкотемпературной (300–400 °С) молекулярно-лучевой эпитаксии / Ю. Б. Блоховитянов, А. С. Дерябин, А. К. Гутаковский, М. А. Ревенко, Л. В. Соколов. // Физика и техника полупроводников. 2006. Т. 40, вып. 3.
3. Возможности и основы принципы управления пластической релаксации пленок GeSi/Si и GeSi ступенчато изменяемого состава / Ю. Б. Блоховитянов, А. С. Дерябин, А. К. Гутаковский, О. П. Пчеляков, Л. В. Соколов. // Физика и техника полупроводников. 2008. Т. 42, вып. 1.

References

1. Reliability of detection of penetrating dislocations in epitaxial films using structurally sensitive etching / A. S. Deryabin, L. V. Sokolov, E. M. Trukhanov, K. B. Fritzler // Letters in ZhTF. 2018. Vol. 44, iss. 20.
2. On the origin of mismatch dislocations from the surface when growing $\text{GeSi}/\text{Si}(001)$ films by low-temperature (300–400 °C) molecular beam epitaxy / Yu. B. Blokhovityanov, A. S. Deryabin, A. K. Gutakovsky, M. A. Revenko, L. V. Sokolov // Physics and technology of semiconductors. 2006. Vol. 40, iss 3.
3. Possibilities and principles of control of plastic relaxation of GeSi/Si and Ge Si films of stepwise variable composition / Yu. B. Blokhovityanov, A. S. Deryabin, A. K. Gutakovsky, O. P. Pchelyakov, L. V. Sokolov. // Physics and technology of semiconductors. 2008. Vol. 42, iss. 1.



Секция

**«МЕХАНИКА СПЛОШНЫХ СРЕД
(ГАЗОДИНАМИКА, ГИДРОДИНАМИКА,
ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ,
РЕОЛОГИЯ)»**

MODELLING OF FOUR-POINT BENDING TEST TAKING INTO ACCOUNT DISSYMMETRY OF THE YIELD SURFACE OF MATERIAL

O. Gomonova^{1*}, J. Rigaud², E. Andrieu³

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: *gomonova@sibsau.ru

²Liebherr–Aerospace Toulouse SAS

408 av. des Etats-Unis, Toulouse Cedex 2, 31016, France

³Université de Toulouse, CIRIMAT, UPS/CNRS/INPT, ENSIACET
4 allée Emile Monso, BP 44362, 31030, Toulouse Cedex 4, France

The article considers an original model which allows to take into account dissymmetry of the yield surface of studied material in a four-point bending test simulation. Experimental results of a four-point bending testing carried out on samples fabricated by additive layer manufacturing were used for validation of the proposed model.

Keywords: four-point bending test, finite element modelling, yield surface.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЯ НА ЧЕТЫРЕХТОЧЕЧНЫЙ ИЗГИБ С УЧЕТОМ АСИММЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ ТЕКУЧЕСТИ МАТЕРИАЛА

О. Гомонова^{1*}, Ж. Риго², Э. Андриё³

¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: gomonova@sibsau.ru

²Liebherr–Aerospace Toulouse SAS

408 av. des Etats-Unis, Toulouse Cedex 2, 31016, France

³Université de Toulouse, CIRIMAT, UPS/CNRS/INPT, ENSIACET
4 allée Emile Monso, BP 44362, 31030 Toulouse Cedex 4, France

Рассматривается оригинальная модель, позволяющая учесть асимметрию поверхности текучести изучаемого материала при моделировании испытания на четырехточечный изгиб. Для проверки достоверности предложенной модели были использованы результаты испытаний, проведенных на образцах, изготовленных с применением технологии послойного аддитивного производства.

Ключевые слова: испытание на четырехточечный изгиб, конечно-элементное моделирование, поверхность текучести.

Four-point bending testing is usually carried out for materials and standard items which reveal different behavior in tensile and in compression. Model considered in the article was constructed to simulate a four-point bending test on samples fabricated by additive layer manufacturing, the technique which is in wide use in particular in aerospace industry [1]. The samples were made of aluminium based powder AS7G06. Properties of the material are given in [2].

During the four-point bending test (fig. 1), a studying sample undergoes tensile and compressive loadings simultaneously.

Large values of the applied force while testing lead to appearing of plastic deformations and hardening material. The majority of finite element (FE) models used to simulate the testing apply a single law to describe the behavior of a studying material beyond its limit of elasticity. This law is usually chosen from the stress-strain curves obtained as a result of tensile test. Such models assume the

symmetry of the yield surface of the material with equal values of yield limits and identical hardening behavior in tension as well as in compression.

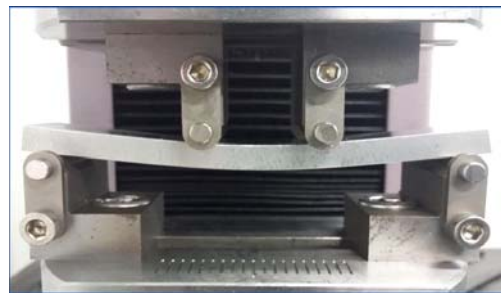


Fig. 1. Experimental setup of a four-point bending test

The authors propose a simple FE model which allows to take into consideration the dissymmetry of yield surface of a studied material in a four-point bending test

simulation. The proposed model was constructed in CAD system SolidWorks (fig. 2).

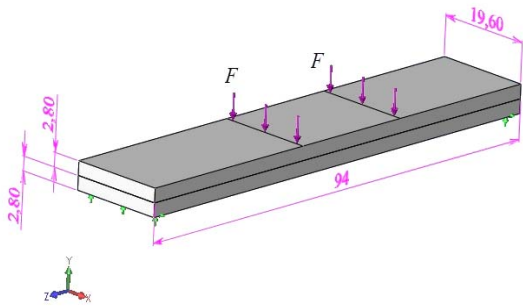


Fig. 2. Model of the sample constructed for simulation

Sizes of this model corresponded to those of samples fabricated for testing. The only distinction was that the model contained two layers as opposed to the one piece experimental specimens. This distinctive feature of the constructed model gives a capability to apply different

limits of elasticity and laws of hardening that the material reveals in tension and in compression, and thus to take into account the dissymmetry of the yield surface of material.

Tensile and compression tests were effectuated to get properties of the considered material beyond its limit of elasticity (fig. 3). Obtained stress-strain curves were used for further modelling, which was carried out in finite element analysis package SolidWorks Simulation [3–5].

The value of applied force for modeling and experiment was equal to 2300 N. Note that the experiment was carried out at the altering bending from 200 N to 2200 N with step of 200 N up to the largest value of the applied force. Results of simulation are presented on fig. 4 in comparison to experimental curve and a one obtained by modelling in case of symmetry of the yield surface of material. It worth noting that in the case of symmetric yield surface (as it is usually assuming in standard FE models), the values of yield limit and hardening behavior of material were taken from the tensile stress-strain curve only.

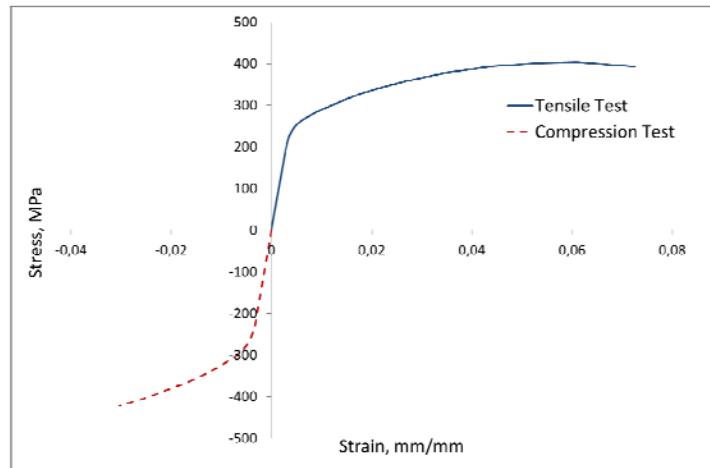


Fig. 3. Stress-strain curves obtained as result of tensile and compression tests

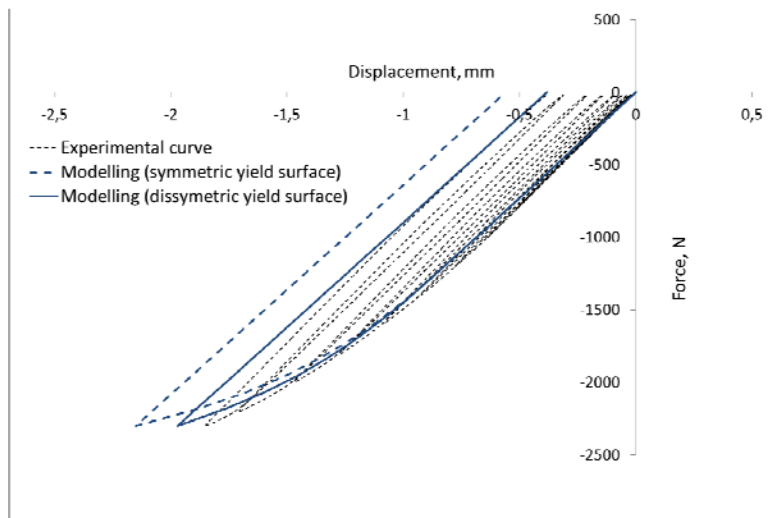


Fig. 4. Comparison of experimental results and modelling

As one can see from fig. 4, the model taking into account the dissymmetry of the yield surface of material give a good approximation of experimental results. Thereby the proposed model can serve as a simple and convenient tool for dealing with materials that own different behavior in tensile and compression.

References

1. Uriondo A., Esperon-Miguez M. and Perinpanayagam S. The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects // Proc IMechE Part G: J Aerospace Engineering. 2015. № 229 (11). P. 1–16.
2. RAFFMETAL the aluminium evolution (EN AB and AC 42200 Al Si 7 Mg 0.6) [Electronic

resource]. URL: http://www.raffmetal.com/web_eng/prodotti.asp#risultati (access: 12.05.2020).

3. Alyamovsky A. A. *Inzhenernye raschety v SolidWorks Simulation* [Engineer Calculations in SolidWorks Simulation]. M. : DMK., 2010. 464 p. (In Russ.).

4. Alyamovsky A. A. *SolidWorks Simulation. Kak reshat' prakticheskiye zadachi* [SolidWorks Simulation. Resolution of Practice Problems]. SPb. : BHV-Peterburg, 2012. 444 p. (In Russ.).

5. *Kompyuternoye modelirvaniye v inzhernoy praktike* [Computer Modeling in Engineering Practice] / A. A. Alyamovsky, A. A. Sobachkin, E. V. Odintsov et al. SPb. : BHV-Peterburg, 2005. 800 p. (In Russ.).

© Gomonova O., Rigaud J., Andrieu E., 2020

УДК 519.6

ГИДРОТЕРМИКА АБАКАНСКОЙ ПРОТОКИ НА РЕКЕ ЕНИСЕЙ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ*

В. М. Белолипецкий, С. Н. Генова

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44
E-mail: sv@icm.krasn.ru

В работе предложена численная модель для определения температуры воды в характерных створах Абаканской протоки и проведено сценарное моделирование.

Ключевые слова: протока, гидротермический режим, математическая модель, численные эксперименты.

HYDROTHERMICS OF THE ABAKAN CHANNEL ON THE YENISEI RIVER, NUMERICAL MODELING

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

A numerical model is proposed for determining the water temperature in the characteristic sections of the Abakan channel and scenario modeling is carried out in this work

Keywords: channel, hydrothermal regime, mathematical model, numerical experiments.

Введение. После возведения Красноярской ГЭС температурный режим реки Енисей в нижнем бьефе ГЭС заметно изменился. Температура воды ниже плотины понизилась в летние месяцы на 10–12 градусов и возросла в зимнее на 1,5–2,0 градуса. Жители г. Красноярска лишились привычного для них отдыха и купания на реке в летние месяцы [1]. С целью создания условий для купания Абаканская протока (в черте города) была перекрыта дамбой и устроен выпуск теплой воды в протоку от ТЭЦ–2 [2]. В настоящее время в протоке наблюдаются негативные явления: заиливание дна, разрастание водорослей и растений. Для выработки рекомендаций по сооружению проточного бассейна необходимо дать прогноз температуры воды в протоке при различных условиях водообмена [2].

Математическая модель течений в проточных водоемах. Упрощенная математическая модель для исследования гидротермического режима водоема получена для медленных течений (двумерных в вертикальной плоскости) в приближениях Буссинеска, гидростатики, пограничного слоя, «твердой крышки» [1; 3]:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial^2}{\partial z^2} (K_z \cdot \omega) + g \frac{\partial \hat{\rho}}{\partial x}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = -\omega, \quad (2)$$

$$U = \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad W = -\frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + W \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} K_{zT} \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (4)$$

Здесь ψ – функция тока, ω – вихрь, U , W – составляющие скорости течения воды в направлениях Ox , Oz соответственно, t – время, $\rho = \rho_0 [1 + \hat{\rho}(T)]$, ρ – плотность воды, ρ_0 – характерное значение плотности воды, g – ускорение свободного падения, T – температура воды, K_z , K_{zT} – коэффициенты турбулентного обмена.

Начальные условия: $\psi = \psi^0(x, z)$, $\omega = \omega^0(x, z)$, $T = T^0(x, z)$.

*Работа поддержана Красноярским математическим центром, финансируемым Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (Соглашение 075-02-2020-1631).

Граничные условия: на водной поверхности ($z = 0$)
 $\psi = 0, \quad \omega = \frac{\tau_y}{\rho_0 K_z}, \quad K_{zT} \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{F_n}{c_p \rho_0}$; на дне ($z = H$)

$\psi = q, \quad \omega = 2 \cdot \frac{q - \Psi_{jj-1}}{(\Delta z)^2}$ - условие Тома,

$K_{zT} \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{F_{\text{дн}}}{c_p \rho_0}$, q - удельный расход на единицу ширины.

F_n - полный поток тепла через свободную поверхность, составляющие теплового потока на поверхности воды определяются по известным формулам [1], $F_{\text{дн}}$ - теплообмен с ложем водоема.

Напряжение трения ветра $\vec{\tau}$ вычисляется по формуле Саймонса $\vec{\tau} = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot |\vec{W}_a| \cdot \vec{W}_a$, где $\vec{\tau} = (\tau_x, \tau_y)$, $\vec{W}_a = (W_{ax}, W_{ay})$ - вектор скорости ветра, скорость ветра в м/с, напряжение трения в кг/(м с²).

В начальном створе $x = 0$ задаются $\psi = \psi_{\text{ин}}, \quad \omega = \omega_{\text{ин}}, \quad T = T_{\text{ин}}$.

Коэффициенты турбулентного обмена для мелкого водотока представляются в виде суммы двух слагаемых, соответствующих ветровому и динамическому перемешиванию, определяемых по формулам Прандтля-Обухова [4] и Маккавеева [5].

Для мелких водотоков предлагается численный алгоритм, основанный на двумерной в вертикальной плоскости математической модели (1)-(4). Вводятся переменные, для которых в каждый момент времени расчетная область по вертикальной координате отображается на отрезок $[0, 1]$.

Разностные уравнения (2) относительно функции тока решаются методом прогонки. Уравнения (2), (4) в новых переменных решаются по явной схеме.

Результаты численных экспериментов

Для выработки рекомендаций по сооружению проточного бассейна проведены численные эксперименты. Проточный бассейн представляет канал с характерными размерами: ширина - 200 м, глубина - 2 м, длина - 1900 м, разделенный на 3 участка длиной 980 м, 390 м и 530 м. Створ 1 модельного проточного бассейна находится в месте дамбы, сброс теплой воды с ТЭЦ-2 находится на расстоянии 980 м от дамбы, пляж соответствует третьему расчетному участку.

Выбран набор сценариев летнего прогрева воды в протоке для различных режимов проточности (5-0 м³/с), тепловых сбросов (2-4 м³/с) с температурой воды с ТЭЦ-2 17,5-20,0 °С. Прогнозные расчеты выполнены для метеоданных среднего (1981 г.) и теплого (1991 г.) лета [6]. Температура воды в реке перед дамбой принималась равной $T_{\text{ин}} = 12,5$ °С. Начальный створ модельного проточного бассейна находится в месте сброса теплой воды. Температура воды в этом створе определяется как средневзвешенная.

Расчеты показали: если объем воды, поступающей в протоку через дамбу, не превышает 5 м³/с, то вода в бассейне летом может прогреться до 18-19 °С лишь при тепловом сбросе воды с температурой, равной 20 °С. В других сценариях (в том числе и при увели-

чении объема теплового сброса), вода в протоке не прогревается до «комфортной» температуры, выше 18 °С.

Результаты работы могут быть полезными при разработке проектов обустройства проток в черте г. Красноярска для организации купания летом.

Библиографические ссылки

1. Численное моделирование задач гидроредотермики водотоков / В. М. Белоліпецкий, С. Н. Генова, В. Б. Туговиков и др. Новосибирск : Сибирское отделение РАН, ИВТ, ВЦК, 1994. 138 с.
2. Белоліпецкий В. М., Генова С. Н., Кореньков В. А. Оценка летнего прогрева воды в протоке р. Енисей в черте г. Красноярска при различных условиях водообмена // Математические модели и методы их исследования : тезисы докладов междунар. конф. Красноярск, 1997. С. 32-33.
3. Belolipetskii V. M., Belolipetskii P. V., Genova S. N. Numerical modelling of the hydrothermal regime of the Krasnoyarsk reservoir // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2018. № 11 (5). P. 569-580.
4. Математические модели циркуляции в океане / под ред. Г. И. Марчука и А. С. Саркисяна. Новосибирск : Наука, 1980. 288 с.
5. Спицын И. П., Соколова В. А. Общая и речная гидравлика. Ленинград : Гидрометеиздат, 1990.

References

1. *Chislennoye modelirovaniye zadach gidroledotermiki vodotokov*. [Numerical modelling of the problems the channel ways of hydro-ice-thermics.] / V. M. Belolipetskii, S. N. Genova, V. B. Tugovikov et al. Novosibirsk : Siberian Division, Institute of Computational Technologies, Krasnoyarsk Computing Center, 1994.
2. Belolipetskii V. M., Genova S. N., Koren'kov V. A. *Otsenka letnego progrevya vody v protoke r.Yenisey v cherte g.Krasnoyarska pri razlichnykh usloviyakh vodoobmena* // *Matematicheskiye modeli i metody ikh issledovaniya : tezisy dokladov mezhdunarodnoy konferentsii* [Estimation of the summer heating of water in the channel of the Yenisei river within the city of Krasnoyarsk under various conditions of water exchange. Krasnoyarsk, 1997. P. 32-33.
3. Belolipetskii V. M., Belolipetskii P. V., Genova S. N. Numerical modelling of the hydrothermal regime of the Krasnoyarsk reservoir // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2018. № 11 (5). P. 569-580.
4. *Matematicheskiye modeli tsirkulyatsii v okeane / pod red. G. I. Marchuka, A. S. Sarkisyana*. Novosibirsk. Nauka, 1980. 288 p.
5. Spitsyn I. P., Sokolova V. A. *Obshchaya i rechnaya gidravlika*. Leningrad, *Gidrometeoizdat*. [General and river Hydraulics]. Leningrad : Hydropeteorology, 1990.

© Белоліпецкий В. М., Генова С. Н., 2020

УДК 519.6

**О ПРИМЕНЕНИИ ОДНОМЕРНОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ
ДЛЯ РАЙОНА ОЗЕРА ТУЛИК (АЛЯСКА)***

В. М. Белолипецкий, С. Н. Генова

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44
E-mail: sv@icm.krasn.ru

Построена упрощенная одномерная (в вертикальном направлении) модель динамики вечной мерзлоты в летний период с калибровочными коэффициентами.

Ключевые слова: математическая модель, калибровочные параметры, вечная мерзлота.

**ON THE APPLICATION OF A ONE-DIMENSIONAL MODEL OF PERMAFROST DYNAMICS
FOR TOOLIK LAKE REGION (ALASKA)**

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

A simplified one-dimensional (in the vertical direction) model of permafrost dynamics for summer period with calibration coefficients is constructed.

Keywords: mathematical model, calibration parameters, permafrost.

Введение. В связи с изменением глобальной температуры воздуха представляет интерес оценка реакции вечной мерзлоты на изменение климата. При потеплении климата увеличивается как толщина слоя талого грунта, так и продолжительность периода существования талика. Имеется обширная литература по математическому моделированию вечной мерзлоты (см., например, [1–4]). В настоящей работе рассматривается малоразмерная численная модель вертикальных распределений температуры в талом и мерзлом слоях для периода отсутствия мерзлого слоя на поверхности почвы. В вертикальном направлении выделяются талый и мерзлый грунты. Теоретическое описание температурного поля в почвах при их промерзании или оттаивании осуществляется с помощью решения задачи Стефана [5].

Построена упрощенная одномерная вертикальная модель динамики вечной мерзлоты. Калибровочные коэффициенты математической модели определяются из сопоставления рассчитанных выходных данных модели с результатами измерений.

Математическая модель динамики замерзания-оттаивания вечной мерзлоты. В летний период в вертикальном направлении образуется два слоя, верхний – талый, нижний – мерзлый. Вертикальные

распределения температуры в каждом слое определяются из решения уравнения теплопроводности, удовлетворяющего соответствующим начальным и граничным условиям. Для уравнения теплопроводности на поверхности суши ставится условие третьего рода, коэффициент теплообмена определяется при калибровке модели, коротковолновая радиация определяется по формулам из работы [6]. На подвижной границе фазового перехода ставится условие Стефана и равенство температур температуре замерзания. На известной глубине мерзлого грунта задается температура.

Численные методы решения задачи Стефана можно разделить на два класса: методы с явным выделением фронтов и методы сквозного счета. В настоящей работе использовался метод с выделением фронтов [5]. В новых независимых переменных в каждый момент времени расчетная область отображается на отрезок $[0,1]$ по пространственной переменной (в одномерной задаче). В уравнениях появляются конвективные слагаемые, характеризующие скорость переноса температуры w_i . Для задач динамики вечной мерзлоты результаты расчетов с учетом и без учета w_i практически совпали, то есть конвективными слагаемыми можно пренебречь (приближение медленных движений границ фазового перехода, $w_i \equiv 0$).

*Работа поддержана Красноярским математическим центром, финансируемым Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (Соглашение 075-02-2020-1631).

Численный алгоритм состоит из двух этапов. Пусть на n – ом временном слое известны все параметры (распределения температуры в рассматриваемых слоях и положение границы фазового перехода), тогда нахождение неизвестных параметров в момент времени t_{n+1} выполняется в два этапа: на первом этапе определяются распределения температуры в выделенных слоях; на втором этапе из условия Стефана уточняется положение границы раздела фаз.

Результаты численных экспериментов. Наиболее изучаемой и достаточно востребованной для практических целей характеристикой в районах вечной мерзлоты является глубина сезонного протаивания. Целью работы было построение упрощенной одномерной (в вертикальном направлении) модели для определения изменений профилей температуры в талом и мерзлом слоях и для прогноза заглужения талого грунта в летний период. Использовались измеренные на метеостанции озера Тулик (Аляска) профили температуры почвы на глубине от 0 до 1 м и температура воздуха (в 2009–2011 гг.) [7]. Калибровка параметров модели динамики вечной мерзлоты в районе озера Тулик (Аляска) проводилась с использованием численных экспериментов и данных натурных измерений 2009 года. Выбран вариант, обеспечивающий согласие рассчитанных выходных параметров модели (заглужение талого грунта, температура поверхности суши, вертикальные профили температуры параметров грунта) с натурными данными.

Проверка работоспособности модели проведена путем сравнения результатов расчетов с натурными данными. С выбранными параметрами модели выполнены прогнозные расчеты для 2010 и 2011 гг. Рассчитанные значения температуры поверхности грунта и толщины талого слоя согласуются с данными измерений.

Целью работы было построение упрощенного численного алгоритма для прогноза профилей температуры в талом и мерзлом слоях и заглужения талого слоя в летний период. Из метеоданных используется только один параметр – температура воздуха. Тестовые расчеты по предложенной модели показывают ее адекватность, согласованность с натурными измерениями. Разработанная малоразмерная модель может применяться для качественных исследований многолетней динамики вечной мерзлоты.

Библиографические ссылки

1. Малевский-Малевиц С. П., Молькентин Е. К., Надежина Е. Д. Модельные оценки эволюции вечной мерзлоты и распределения слоя сезонного протаивания в зависимости от климатических условий в северных регионах Западной Сибири // Криосфера Земли. 2000. № 4. С. 49–57.
2. Моделирование изменений температурного и гидрологического режимов приповерхностной мерзлоты с использованием климатических данных (реанализа) / М. М. Аржанов, А. В. Елисеев, П. Ф. Демченко и др. // Криосфера Земли. 2007. № 4. С. 65–69.

3. Sazonova T. S., Romanovsky V. E. 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.

4. Анисимов О. А., Белолуцкая М. А. Влияние изменения климата на вечную мерзлоту: прогнозирование и оценка неопределенности // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. СПб. : Гидрометеоиздат. 2003. Т. XIX. С. 21–38.

5. Belolipetskii V. M., Genova S. N. A numerical model of the seasonal thawing of permafrost in the bog-lake landscapes // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2016. Т. 9, № 2. P. 158–165.

6. Тимофеев Н. А. Радиационный режим океанов. Киев : Наукова Думка. 1983.

7. Romanovsky V. Network of Permafrost Observatories in North America and Russia: Alaska. Arctic Data Center. 2009.

References

1. Malevskiy-Malevich S. P., Mol'kentin Ye. K., Nadezhina Ye. D. *Model'nyye otsenki evolyutsii vechnoy merzloty i raspredeleniya sloya sezonnogo protaivaniya v zavisimosti ot klimaticheskikh usloviy v severnykh regionakh Zapadnoy Sibiri // Kriosfera Zemli*. [Model estimates of the evolution of permafrost and the distribution of the seasonal thawing layer depending on climatic conditions in the northern regions of Western Siberia // Earth Cryosphere.] 2000. № 4. P. 49–57.

2. Arzhanov M. M., Yeliseyev A. V., Demchenko P. F., Mokhov I. I. *Modelirovaniye izmeneniy temperaturnogo i gidrologicheskogo rezhimov pripoverkhnostnoy merzloty s ispol'zovaniyem klimaticheskikh dannyykh (reanaliza) // Kriosfera Zemli* [Modeling of changes in temperature and hydrological regimes of near-surface permafrost using climatic data (reanalysis) // Earth's Cryosphere.]. 2007. № 4. P. 65–69.

3. Sazonova T. S., Romanovsky V. E. 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.

4. Anisimov O. A., Belolutskaia M. A. *Vliyaniye izmeneniya klimata na vechnyuyu merzlotu: prognozirovaniye i otsenka neopredelennosti // Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*. SPb. : Gidrometeoizdat. 2003. Vol. XIX. P. 21–38.

5. Belolipetskii V. M., Genova S. N. A numerical model of the seasonal thawing of permafrost in the bog-lake landscapes // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2016. Vol. 9, № 2. P. 158–165.

6. Timofeev N. A. *Radiatsionnyy rezhim okeanov*. Kiev : Naukova Dumka, 1983.

7. Romanovsky V. Network of Permafrost Observatories in North America and Russia: Alaska. Arctic Data Center. 2009.

© Белолипецкий В. М., Генова С. Н., 2020

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО СЕЙСМОИСТОЧНИКА НА ГРУНТ*

Е. А. Ефимов

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/44
E-mail: efimov@icm.krasn.ru

Разработанный комплекс программ для многопроцессорных систем позволяет моделировать волновые процессы в геосредах. Проведён анализ различных режимов работы сейсмоисточника.

Ключевые слова: блочно-слоистая геосреда, импульсный электромагнитный сейсмоисточник, упругие волны, суперкомпьютерное моделирование.

NUMERICAL SIMULATION OF THE IMPACT OF A PULSE SEISMIC SOURCE ON THE GROUND

E. A. Efimov

Institute of Computational Modeling SB RAS
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
E-mail: efimov@icm.krasn.ru

The developed software package for multiprocessor systems allows to simulate wave processes in geomedium. Analysis of various operating modes of the seismic source was carried out.

Keywords: blocky-layered geomedium, electromagnetic pulse seismic source, elastic waves, supercomputer simulations.

Электромагнитные импульсные источники сейсмических колебаний, благодаря своей малогабаритности и простоте в транспортировке, широко используются в труднодоступных для геологоразведки местах, таких как тайга, тундра, районы с вечной мерзлотой. Источники такого типа обладают высоким коэффициентом преобразования электрической энергии в механическую, до 25 % которой уходит на создание упругой волны [1].

Рассматривается модель грунта с плоскостростой структурой с однородными и изотропными упругими слоями. Такое упрощение позволяет перейти к осесимметричной задаче теории упругости. Численный алгоритм основан на методе двуциклического покомпонентного расщепления по пространственным переменным [2], а при решении одномерных задач используется метод распада разрыва С. К. Годунова с процедурой ENO (Essentially Non Oscillatory) реконструкции [3]. Разработанный комплекс программ для многопроцессорных вычислительных систем кластерной архитектуры [4] позволяет моделировать волновые поля с высокой степенью детализации [5].

В ходе численных экспериментов сравнивались различные режимы работы сейсмоисточника. Получены амплитудно-частотные характеристики и зави-

симости сейсмического КПД от глубины для грунтов с различными механическими характеристиками. Расчёты проведены на кластерах серии МВС Института вычислительного моделирования СО РАН (Красноярск) и Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН (Москва).

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. № 4. С. 30–33.
2. Марчук Г. И. Методы расщепления. М.: Наука, 1988. 264 с.
3. Sadovskaya O., Sadovskii V. Mathematical Modeling in Mechanics of Granular Materials // Vol. 21 of Advanced Structured Materials. Springer, Heidelberg – New York – Dordrecht – London, 2012. 390 p.
4. Садовский В. М., Садовская О. В. Программный комплекс для решения двумерных упругопластических задач динамики сыпучих сред (2Dyn_Granular) : свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012613989 от 28.04.2012. RU ОБПБТ № 3 (80). М.: ФИПС, 2012. С. 209.

*Работа поддержана Красноярским математическим центром, финансируемым Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (Соглашение 075-02-2020-1631).

5. Sadovskii V. M., Sadovskaya O. V., Efimov E. A. Analysis of seismic waves excited in near-surface soils by means of the electromagnetic pulse source “Yenisei” // *Materials Physics and Mechanics*. 2019. Vol. 42, № 5. P. 544–557.

References

1. Detkov V. A., Shchadin P. Yu., Ivashin V. V. [Pulsed electromagnetic seismic sources “Yenisei”: Features of technical solutions and application] // *Pribory i sistemy razvedochnoy geofiziki*. 2007. № 4. С. 30–33.
2. Marchuk G. I. *Metody rasshchepeniya* [Splitting methods]. M. : Nauka, 1988. 264 p.
3. Sadovskaya O., Sadovskii V. Mathematical Modeling in Mechanics of Granular Materials. *Vol. 21 of Ad-*

vanced Structured Materials. Springer, Heidelberg – New York – Dordrecht – London, 2012. 390 p.

4. Sadovskii V. M., Sadovskaya O. V. [Parallel program system for the solution of 2D elastic-plastic problems of the dynamics of granular media (2Dyn_Granular)] : Certificate of state registration of the computer program № 2012613989. RU OBPBT № 3 (80). M. : FIPS, 2012. P. 209.

5. Sadovskii V. M., Sadovskaya O. V., Efimov E. A. Analysis of seismic waves excited in near-surface soils by means of the electromagnetic pulse source “Yenisei” // *Materials Physics and Mechanics*, 2019. Vol. 42, № 5. P. 544–557.

© Ефимов Е. А., 2020

УДК 532.5

**ПОСТРОЕНИЕ ТОЧНОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ, ОПИСЫВАЮЩЕЙ СТАЦИОНАРНОЕ
КОНВЕКТИВНОЕ ДВУХСЛОЙНОЕ ТЕЧЕНИЕ С УЧЕТОМ ЭНЕРГИИ
МЕЖФАЗНОГО ТЕПЛООБМЕНА***

М. В. Ефимова

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44
E-mail: *efmavi@icm.krasn.ru

Построено точное решение задачи, описывающей стационарное течение двухслойной системы жидкостей с учетом влияния энергии межфазного теплообмена. Такие решения позволяют описать процессы, происходящие в сложных экспериментальных установках, в том числе и в спутниковых аппаратах.

Ключевые слова: точное решение, конвекция, межфазный теплообмен.

**CONSTRUCTION OF AN EXACT SOLUTION OF THE PROBLEM DESCRIBING STATIONARY
CONVECTIVE TWO-LAYER FLOW WITH THE ENERGY OF INTERPHASE HEAT TRANSFER**

M. V. Efimova

Institute of computational modeling SB RAS
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
E-mail: *efmavi@icm.krasn.ru

An exact solution to the problem describing the steady flow of a two-layer system of liquids with allowance for the influence of the energy of interphase heat transfer was constructed. Such solutions describes the processes in experimental setups, including satellite devices.

Keywords: exact solution, convection, interphase heat transfer.

Введение. Для описания реальных физических процессов в вычислительной и теоретической гидродинамике используются усложненные модели микроконвекции [1], а также модели конвекции с учетом термодиффузии [2]. Исследование условий возникновения конвекции важно для оптимизации тепловых режимов хранения нефтепродуктов в емкостях, процессов химической технологии и др. Несмотря на широкое распространение [3–4], экспериментальное изучение таких течений оказывается достаточно сложным, поэтому качественное исследование частных случаев таких усложненных моделей является актуальной задачей. В частности, точные решения всегда играли и продолжают играть огромную роль в формировании правильного понимания качественных особенностей многих явлений и процессов в различных областях естествознания. Эти решения часто используют в качестве «тестовых задач» для проверки корректности и оценки точности различных асимптотических, приближенных и численных методов.

Постановка задачи. Исследуется задача, описывающая совместное движение бинарной смеси и вязкой теплопроводной жидкости в плоском канале. Жидкости имеют общую поверхность раздела, кото-

рая считается недеформируемой. Поверхностное натяжение линейно зависит от температуры и концентрации смеси. Система ограничена твердыми стенками с заданным распределением температуры. Кроме того, считается, что через твердую стенку и поверхность раздела отсутствует поток вещества.

Течение в системе описывается уравнениями Навье-Стокса, неразрывности, теплопроводности и массопереноса, записанные для каждого из слоев жидкости. На поверхности раздела учитывается условие энергообмена, а также выполнены кинематическое, динамическое условия, условия равенства скоростей и температур. Твердые стенки неподвижны и на них задано условие прилипания.

Поле скоростей в возникающей краевой задаче описывается в специальном виде, когда компоненты скорости линейно зависят от одной пространственной переменной [5]. Поля температур и концентрации имеют квадратичную зависимость от горизонтальных координат.

Основными характерными параметрами задачи являются число Марангони, число Прандтля, число Шмидта, параметр энергии межфазного теплообмена.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 20-01-00234).

В предположении, что течение является ползущим, т. е. число Марангони мало, рассматриваемая задача может иметь до двух решений, которые получены в явном виде, в зависимости от значений определяющих параметров. Построены структуры течения в слоях и проведен анализ влияния межфазной энергии на течение в системе.

Библиографические ссылки

1. Пухначев В. В. Модель конвективного движения при пониженной гравитации // Моделирование в механике. 1992. Т. 6, № 4. С. 47–56.
2. Андреев В. К., Захватаев В. Е., Рябицкий Е. А. Термокапиллярная неустойчивость. Новосибирск : Наука, 2000. 280 с.
3. Scriven L. E., Sterling C. V. The Marangoni effects // Nature. 1960. Vol. 187, № 4733. P. 186–188.
4. Bejan A. Convection Heat Transfer. N. Y.: Wiley, 2004. 696 p.

5. Lin C. C. Note on a class of exact solutions in magnetohydrodynamics // Arch. Rational Mech. Anal. 1958. Vol. 1. P. 391–395.

References

1. Pukhnachev V. V. A model of convective motion under low gravity // Model. Mekh. 1992. Vol. 6, № 4. P. 47–56.
2. Andreev V. K., Zakhvataev V. E., Ryabitskiy E. A. Termokapillyarnaya neustoychivost' [Thermocapillary instability]. Novosibirsk : Nauka, 2000. 280 c.
3. Scriven L. E., Sterling C. V. The Marangoni effects // Nature. 1960. Vol. 187, № 4733. P. 186–188.
4. Bejan A. Convection Heat Transfer. N. Y.: Wiley, 2004. 696 p.
5. Lin C. C. Note on a class of exact solutions in magnetohydrodynamics // Arch. Rational Mech. Anal. 1958. Vol. 1. P. 391–395.

© Ефимова М. В., 2020

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОННОЙ ПРОВОДИМОСТИ НАНОПОРИСТЫХ МЕМБРАН С ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ*

А. И. Кром^{1*}, М. И. Медведева², И. И. Рыжков^{1,2}

¹Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50/44

²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

*E-mail: kai@icm.krasn.ru

Построены двумерная и одномерная модели для описания ионной проводимости мембран с электропроводящей поверхностью. Сравнение результатов расчетов на основе моделей показало допустимость использования одномерной модели в случаях, когда радиус поры меньше длины Дебая.

Ключевые слова: перенос ионов, модель пространственного заряда, модель однородного потенциала.

MATHEMATICAL MODELLING OF IONIC CONDUCTIVITY IN NANOPOROUS MEMBRANES WITH ELECTRICALLY CONDUCTIVE SURFACE

A. I. Krom^{1*}, M. I. Medvedeva², I. I. Ryzhkov^{1,2}

¹Institute of Computational Modelling SB RAS
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

²Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

*E-mail: kai@icm.krasn.ru

We have constructed two- and one-dimensional models for describing ionic conductivity of membranes with electrically conductive surface. The comparison between models showed that one-dimensional model can be employed when the pore radius is smaller than the Debye length.

Keywords: Ion transport, Space charge model, Uniform potential model.

Введение. Процессы, основанные на мембранном разделении, востребованы во многих отраслях промышленности.

Перенос ионов через нанопоры мембран возникает при разделении смесей, преобразовании энергии, изготовлении химических сенсоров и т. д., что актуализирует задачи теоретического исследования данных процессов. В частности, большой интерес представляет изучение мембран, способных менять свои селективные свойства под действием внешних сил, например, электрического поля [1–3].

В данной работе рассматривается процесс переноса водного раствора электролита через мембрану, разделяющую два резервуара с заданными концентрациями ионов. Перенос происходит под действием электрического поля, определяемого различными значениями потенциала в резервуарах. Электропроводящая поверхность мембраны позволяет управлять зарядом поверхности путем задания на ней заданного потенциала. Если размер поры сравним с длиной Дебая, то при отрицательном (положительном) заряде поверхности в поре будет наблюдаться повышенная концентрация катионов (анионов). Это позволяет

управлять транспортом ионов через поры посредством изменения поверхностного потенциала.

Математическое моделирование. Мембрана с электропроводящей поверхностью моделируется как массив параллельных цилиндрических нанопор, что позволяет рассматривать перенос ионов в одной нанопоре. Предполагается, что двойной электрический слой вблизи стенок нанопоры состоит из диффузного слоя и слоя Штерна [4]. Толщина диффузного слоя характеризуется длиной Дебая.

Для исследования ионной проводимости нанопоры была построена модель пространственного заряда [5], основанная на стационарных уравнениях Навье–Стокса, Нернста–Планка и Пуассона. Вычисление проводимости требует расчета потоков ионов, которые определяются из следующего уравнения:

$$J_{\pm} = C_{\pm}U - D_{\pm}\nabla C_{\pm} \mp (D_{\pm}F / R_gT)C_{\pm}\nabla\Phi,$$

где C_{\pm} – концентрации катионов и анионов, P – давление, Φ – потенциал, U – вектор скорости, J_{\pm} – потоки катионов и анионов, D_{\pm} – коэффициенты диффузии ионов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта «Математическое моделирование процессов синтеза проводящих нанопористых мембран и их транспортных свойств по отношению к ионам» № 18-48-242011.

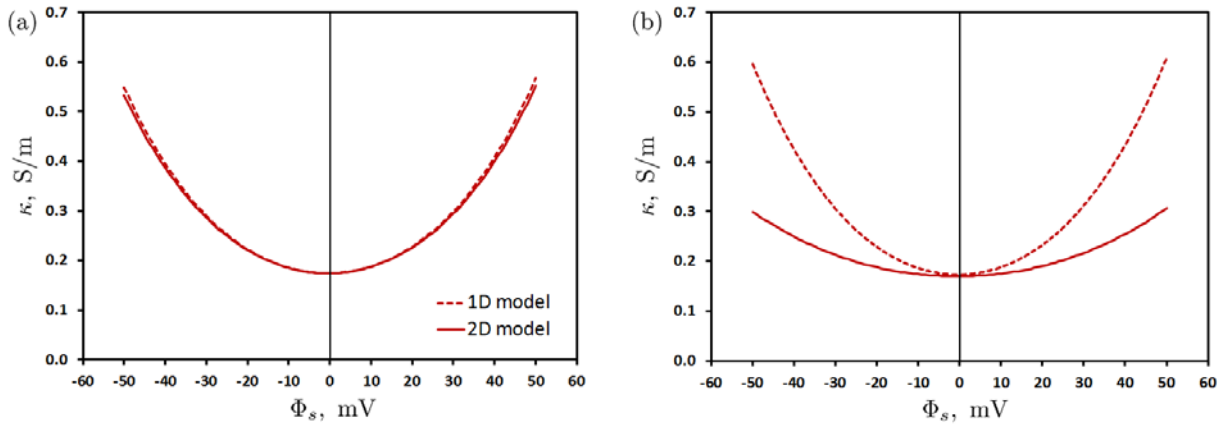


Рис. 1. Зависимость проводимости от поверхностного потенциала в порах радиусом поры 2 нм (а) и 10 нм (б) для 1D и 2D моделей. Концентрация ионов в резервуарах 10 мМ, длина поры 10 мкм

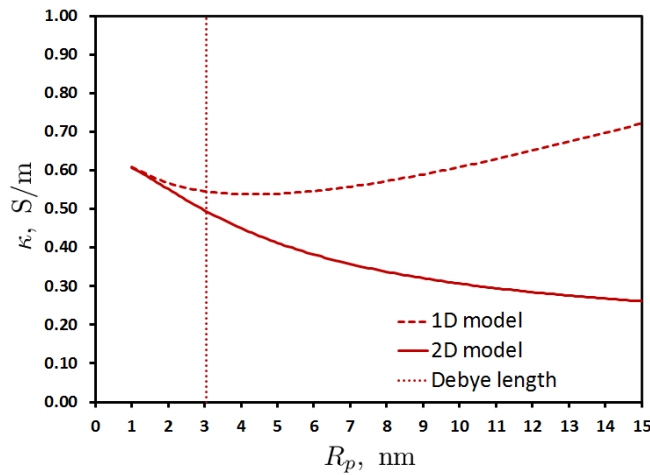


Рис. 2. Зависимость проводимости от радиуса нанопоры для поверхностного потенциала 25 мВ на основе 1D и 2D моделей. Вертикальной линией – длина Дебая. Концентрация ионов 10 мМ

Безразмерные функции потенциала, концентраций и давления внутри цилиндрической нанопоры ищутся в виде

$$\begin{aligned} \varphi(r, z) &= f_v(z) + \psi(r, z), \\ c_{\pm}(r, z) &= c_v(z) \exp(m\psi(r, z)), \\ p(r, z) &= p_v(z) + 2c_v(z) \cosh(\psi(r, z)), \end{aligned}$$

где функция ψ определяется из уравнения Пуассона. При данных допущениях связь между потоками ионов и их движущими силами записывается в виде феноменологического формализма «сила – поток». Дополняя полученную систему граничными условиями в резервуарах, разделяемых мембраной (заданные концентрации ионов, заданные (нулевые) давления и различные потенциалы) получаем двумерную (2D) задачу, для которой был разработан и реализован алгоритм численного решения. В случае, когда радиус поры не превосходит длины Дебая, можно считать, что функции концентраций, давления и потенциала однородны по радиальной компоненте. Данный подход называется моделью однородного потенциала [5].

Получаемая при нем задача является одномерной (1D), для которой также был разработан и реализован алгоритм численного решения.

Результаты. Было проведено сравнение результатов, получаемых с помощью 2D и 1D моделей для водного раствора KCl. На рис. 1 представлены зависимости проводимости от поверхностного потенциала для различных радиусов нанопор.

Из графиков видно, что проводимость возрастает вместе с увеличением абсолютного значения поверхностного потенциала в результате увеличения концентрации носителей заряда внутри поры (катионов или анионов при отрицательных или положительных значениях потенциала соответственно). Данные, полученные на основе 1D и 2D моделей, хорошо согласуются для нанопор малого радиуса (2 нм), однако для больших нанопор (10 нм) 1D модель приводит к завышенным значениям проводимости.

На рис. 2 представлена зависимость проводимости от радиуса нанопоры. Согласно двумерной модели, проводимость падает с увеличением радиуса в силу

того, что размер поры становится больше длины Дебая, которая определяет толщину слоя противоионов вблизи стенки поры. Одномерная модель хорошо согласуется с двумерной только при малых радиусах нанопоры, однако дает завышенные значения проводимости в остальной области.

Итак, мы можем сделать следующий вывод: проводимость растёт с увеличением абсолютного значения потенциала и падает с увеличением радиуса нанопоры, 1D и 2D модели хорошо согласуются в случае, когда радиус поры не превосходит длину Дебая.

References

1. Controlling ion transport selectivity in gold nanotubule membranes / C.R. Martin, M. Nishizawa, K. Jirage et al. // *Advanced Materials*. 2001. Vol. 13. P. 1351–1362.

2. Effect of electric field on ion transport in nanoporous membranes with conductive surface / D. V. Lebedev, V. S. Solodovnichenko, M. M. Simunin, I. I. Ryzhkov // *Petroleum chemistry*. 2018. Vol. 58. P. 474–481.

3. Ryzhkov I. I., Vyatkin A. S., Mikhлина E. V. Modelling of conductive nanoporous membranes with switchable ionic selectivity // *Membranes and Membrane Technologies*. 2020. Vol. 2. P. 10–19.

4. Zhang L., Biesheuvel P. M., Ryzhkov I. I. Theory of ion and water transport in electron-conducting membrane pores with pH-dependent chemical charge // *Physical Review Applied*. 2019. Vol. 12. P. 014039.

5. Peters P. B., Van Roij R., Bazant M. Z. Analysis of electrolyte transport through charged nanopores // *Physical Review E*. 2016. Vol. 93. P. 053108.

© Кром А. И., Медведева М. И.,
Рыжков И. И., 2020

О ВЛИЯНИИ КВАДРАТОВ ПЕРВЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ФУНКЦИИ ПРОГИБА НА ЗНАЧЕНИЯ МЕМБРАННЫХ СИЛ В ГИБКИХ ПЛАСТИНАХ

Д. Р. Кубышкина, Р. А. Сабиров

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

Рассматривается продольно-поперечный изгиб пластины от действий поперечной нагрузки и мембранных растягивающих сил. Пренебрегается функциями смещений базисной поверхности и их производными по координатам. Разрешающее уравнение равновесия, составлено по деформированной схеме для пластины из ортотропного материала. Расчеты показали несущественность получаемых внутренних мембранных сил по сравнению с растягивающими предварительными натяжениями, что показывает правомерность применения рассматриваемой модели.

Ключевые слова: продольно-поперечный изгиб пластины.

THE INFLUENCE OF THE SQUARES OF THE FIRST DERIVATIVES OF THE BENDING FUNCTION ON THE VALUES OF MEMBRANE FORCES IN FLEXIBLE PLATES

D. R. Kubyshkina, R. A. Sabirov

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

The longitudinal-transverse bending of the plate from the action of the transverse load and membrane tensile forces is considered. Neglected functions of displacements of the reference surface and their derivatives with respect to coordinates. The resolving equilibrium equation is compiled according to the deformed scheme for a plate made of orthotropic material. Calculations have shown that the obtained internal membrane forces are insignificant in comparison with tensile prestresses, which shows the legitimacy of the application of the model under consideration.

Keywords: longitudinal-transverse bending of the plate.

Рассматривается продольно-поперечный изгиб пластины от действий поперечной нагрузки q и мембранных растягивающих сил N_x , N_y , S_{xy} . Составлено уравнение равновесия, аналогичное уравнению равновесия С. Тимошенко [1]:

$$B_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + B_{12} \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + B_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2S_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = q. \quad (1)$$

Здесь $w = w(x, y)$ – функция прогиба; параметры жесткости равны:

$$B_{11} = \frac{b_{11} h^3}{12}, \quad B_{12} = \frac{2b_{12} + 4b_{66}}{12} h^3, \quad B_{22} = \frac{b_{22} h^3}{12},$$

$$b_{11} = \frac{c_{22}}{c_{11}c_{22} - c_{12}^2}, \quad b_{12} = b_{21} = -\frac{c_{12}}{c_{11}c_{22} - c_{12}^2},$$

$$b_{22} = \frac{c_{11}}{c_{11}c_{22} - c_{12}^2}, \quad b_{66} = \frac{1}{c_{66}}$$

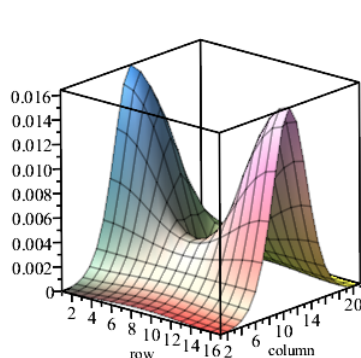
и выражаются через модули Юнга и коэффициенты Пуассона [2]: $c_{11} = 1/E_1$, $c_{12} = -\nu_{21}/E_2$, $c_{21} = -\nu_{12}/E_1$, $c_{22} = 1/E_2$.

Дискретизацию уравнения (1) выполним методом сеток [3]:

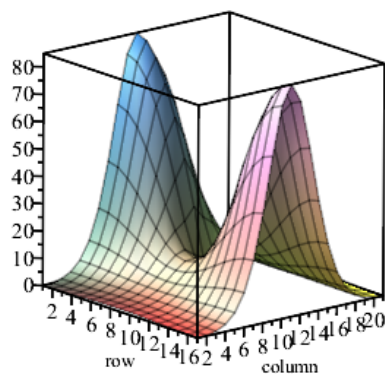
$$\left[\frac{6(B_{11} + B_{22}) + 4B_{12}}{\lambda^4} + \frac{2(N_x + N_y)}{\lambda^2} \right] w_{i,j} - \left(\frac{4B_{11} + 2B_{22}}{\lambda^4} + \frac{N_x}{\lambda^2} \right) w_{i,j+1} - \left(\frac{4B_{11} + 2B_{22}}{\lambda^4} + \frac{N_x}{\lambda^2} \right) w_{i,j-1} - \left(\frac{4B_{22} + 2B_{12}}{\lambda^4} + \frac{N_y}{\lambda^2} \right) w_{i+1,j} - \left(\frac{4B_{22} + 2B_{12}}{\lambda^4} + \frac{N_y}{\lambda^2} \right) w_{i-1,j} + \frac{B_{12}}{\lambda^4} w_{i+1,j+1} + \frac{B_{12}}{\lambda^4} w_{i+1,j-1} + \frac{B_{12}}{\lambda^4} w_{i-1,j-1} + \frac{B_{12}}{\lambda^4} w_{i-1,j+1} + \frac{B_{11}}{\lambda^4} w_{i,j+2} + \frac{B_{11}}{\lambda^4} w_{i,j-2} + \frac{B_{11}}{\lambda^4} w_{i+1,j} + \frac{B_{11}}{\lambda^4} w_{i-1,j} = \frac{P_{ij}}{\lambda^2}. \quad (2)$$

для равномерной квадратной сетки $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$, с шагом λ ; $P_{ij} = q_{ij} \lambda^2$.

Принимаем в первом приближении, разрешающее уравнение (2) с линейными, относительно функций прогибов, коэффициентами, то есть $N_x = \text{const}$ и $N_y = \text{const}$.



а



б

Продольные усилия, вычисляемые по формулам (3) и (4): а) N_x ; б) N_y .

Если уровень полученных в результате расчета мембранных сил будет сопоставим с уровнем начально заданных сил растяжения, тогда потребуются итерационный процесс, приводящий к сходимости решений.

В задаче деформирования продольно-поперечного изгиба пластины, для принятого уравнения (1), то есть, как для “*модели гибкой пластины небольшого прогиба*”, считаем несущественными мембранные перемещения базисной поверхности u_0 и v_0 в сравнении с функцией прогиба w . Поэтому в уравнениях Лява – Кармана – Новожилова – Папковича [4–6] пренебрежем производными функций смещений: $\partial u_0 / \partial x$, $\partial v_0 / \partial y$, $\partial u_0 / \partial y + \partial v_0 / \partial x$. Это дает следующую группу мембранных сил:

$$N_x = \frac{h}{2} \left[b_{11} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + b_{12} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right], \quad (3)$$

$$N_y = \frac{h}{2} \left[b_{12} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + b_{22} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right], \quad (4)$$

$$S_{xy} = b_{66} h \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y}. \quad (5)$$

Для оценки уровня усилий (3) и (4), зависящих от квадратов первых производных функций прогибов рассмотрен расчет ортотропной пластины. По сравнению с задаваемыми продольными усилиями, порядок которых 10^5 – 10^6 Н/м, и дающих напряжения при толщине пластины $h = 2$ мм, порядка 50 МПа – 500 МПа. Усилия, вычисляемые по формулам (3) и (4) дают напряжения порядка 0,04 МПа. То есть квадраты первых производных функции прогиба $\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2$

и $\left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2$ в (3) и (4) слабо влияют на значения продольных мембранных сил.

На рисунке покажем эпюры мембранных сил, получаемых по формулам (3) и (4).

Таким образом, следуя полученным результатам расчетов, нет смысла усложнять модель продольно-поперечного деформирования пластины при предварительных натяжениях мембранными силами, и решать задачу (1) с переменными коэффициентами.

Библиографические ссылки

1. Тимошенко С. П. Устойчивость упругих систем. М.–Л.: ОГИЗ-Гостехиздат, 1946, с. 532.
2. Лехницкий С. Г. Теория упругости анизотропного тела. М.: Наука, 1977. 416 с.
3. Самарский А. А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 656 с.
4. Новожилов В. В. Основы нелинейной теории упругости. Л.–М.: ОГИЗ. Гостехиздат, 1948. 212 с.
5. Папкович П. Ф. Строительная механика корабля. Ч. II. Сложный изгиб, устойчивость стержней и устойчивость пластин. Ленинград: СУДПРОМГИЗ, 1941. 960 с.
6. Ляв А. Математическая теория упругости. М.: ОНТИ, 1935.

References

1. Timoshenko S. P. Ustojchivost' uprugih sistem. M.: OGIZ Gostekhizdat, 1946. P. 532.
2. Lekhnickij S. G. Teoriya uprgosti anizotropnogo tela. M.: Nauka, 1977. 416 p.
3. Samarskij A.A. Teoriya raznostnyh skhem. M.: Nauka, 1977. 656 p.
4. Novozhilov V. V. Osnovy nelinejnoj teorii uprugosti. L.–M.: OGIZ. Gostekhizdat, 1948. 212 p.
5. Papkovich P. F. Stroitel'naya mekhanika korablya. Chast' II. Slozhnyj izgib, ustojchivost' stержnej i ustojchivost' plastin. L.: SUDPROMGIZ, 1941. 960 p.
6. Lyav A. Matematicheskaya teoriya uprugosti. M.: ONTI, 1935.

© Кубышкина Д. Р., Сабилов Р. А., 2020

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОЛНОВОДОВ ПРИ ИНЕРЦИОННОМ НАГРУЖЕНИИ*

И. В. Кудрявцев

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

С использованием зависимостей теории пластин и оболочек получено аналитическое решение системы дифференциальных уравнений, описывающих напряжённо-деформированное состояние тонкостенных волноводов при инерционном нагружении. Результаты показали, что использование для данного расчета теории стержней приводит к весьма значительным погрешностям при определении величин максимальных напряжений.

Ключевые слова: волновод, теория пластин и оболочек, инерция, напряжение, деформация.

THE STRESS AND DEFORMED STATE OF WAVEGUIDES AT INERTIAL LOADING

I. V. Kudryavtsev

Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: ikudryavcev@sfu-kras.ru

With the use of dependencies of the theory of plates and shells the analytical solution of the differential equations describing the stress and deformed state of thin-walled wave guides at inertial loading is received. The results showed that the use of beam theory for this calculation leads to significant errors in determining the values of maximum stresses and deformations.

Keywords: waveguide, theory of plates and shells, inertia, stress, deformation.

Введение. Рассматривается случай инерционного нагружения волновода, при котором происходит его изгиб в плоскости наименьшей жесткости. Инерционное нагружение элементов и конструкций происходит в результате воздействий, вызванных, например, земным притяжением, ускоренным движением, механическими колебаниями и др.

Расчет стержней с тонкостенным профилем поперечного сечения часто проводят с использованием технической теории стержней [1], однако это позволяет оценивать их напряжённо-деформированное состояние (НДС) только в целом, не учитывая их особенности, например, изменение геометрии поперечного сечения.

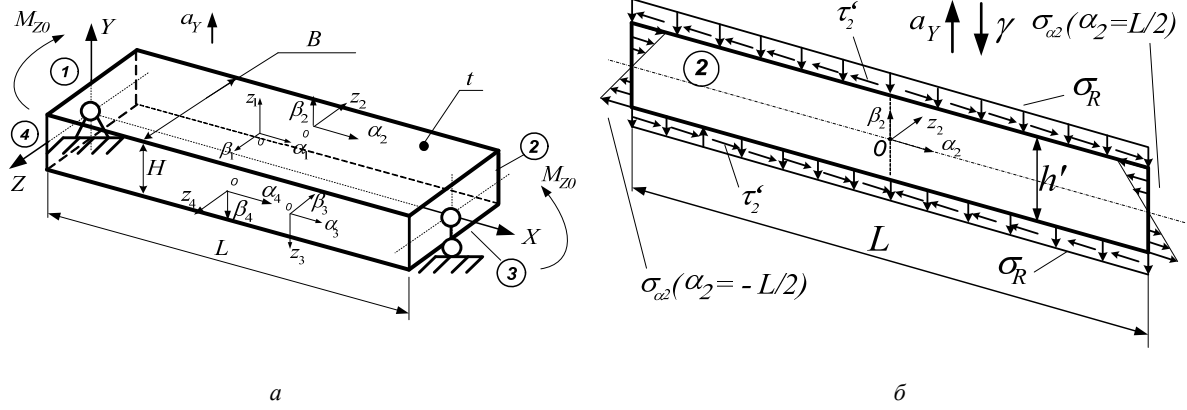
Использование более точных методов, например, В. З. Власова [2], А. Р. Ржаницына [3], Д. В. Бычкова [4], В. И. Сливкера [5] и других не позволяет полностью устранить все недостатки.

Нами предлагается более точный подход [6], при котором тонкостенный стержень представляется набором из пластин и оболочек, соединенных между собой.

Недостатком такого подхода является сложность получения общего аналитического решения для системы дифференциальных уравнений, описывающей его НДС [7]. Однако частные решения для простых случаев нагружения просты и их можно использовать как эталон для сравнения.

Математическая модель. Рассмотрим прямой участок волновода в виде набора из четырех пластинок, который имеет простое шарнирное опирание и подвергается воздействию ускорения a_y в плоскости XY глобальной системы координат конструкции (см. рисунок). Для учета взаимодействия волновода с другими элементами конструкции, по его краям действуют некоторые известные изгибающие моменты M_{z0} .

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 19-41-240005: «Разработка методов моделирования и аналитического расчета статического и квазистатического состояния протяженных тонкостенных неосесимметричных конструкций волноводов антенно-фидерных систем».



Расчетная схема прямого участка волновода
 а – расчетная модель; б – напряжения в боковой стенке

Согласно предложенного подхода [7], система дифференциальных уравнений имеет вид:

$$\nabla^4 \varphi_i = E \cdot \left[\left(\frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \alpha_i \partial \beta_i} \right)^2 - \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \alpha_i^2} \cdot \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \beta_i^2} \right];$$

$$\nabla^4 \omega_i = \frac{t}{D} \left[\frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial \beta_i^2} \cdot \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \alpha_i^2} - 2 \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial \alpha_i \partial \beta_i} \cdot \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \alpha_i \partial \beta_i} + \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial \alpha_i^2} \cdot \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \beta_i^2} - q_{\alpha i} \frac{\partial \omega_i}{\partial \alpha_i} - q_{\beta i} \frac{\partial \omega_i}{\partial \beta_i} + q_{z i} - \rho t \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \tau^2} \right] \quad (1)$$

где $i = 1, 2, 3, 4$ – номера пластинок; $\omega_i = \omega_i(\alpha_i, \beta_i)$, $\varphi_i = \varphi_i(\alpha_i, \beta_i)$ – функции прогибов и напряжений для i -й пластинки; E – модуль Юнга; α – коэффициент теплового расширения; t – толщина пластинок; ρ – плотность материала пластинок; D_i – цилиндрическая жёсткость i -й пластинки.

Решение. Для решения рассматриваемой задачи инерционного изгиба (4,5) использован полуобратный метод Сен-Венана [8] с определением напряжений.

Функцию Эри $\varphi_i(\alpha_i, \beta_i)$ для боковых пластинок примем в виде полинома [9]:

$$\varphi_2(\alpha_2, \beta_2) = \frac{d_5}{6} \alpha_2^2 \cdot \beta_2^3 - \frac{d_5}{30} \beta_2^5 + \frac{d_3}{6} \beta_2^3 + \frac{b_3}{2} \alpha_2^2 \cdot \beta_2 + \frac{a_2}{2} \alpha_2^2. \quad (2)$$

После подстановки выражений (7) в условия (8–10) получим искомые коэффициенты в функции Эри (6):

$$a_2 = 0; \quad b_3 = -\sigma_R \frac{3}{h} - \gamma \frac{3}{2} - \frac{\tau_2}{L};$$

$$d_3 = M_{Z0} \frac{12}{h^3} - \mu \gamma - d_5 \frac{5L^2 - 2h^2}{20};$$

$$d_5 = \frac{6}{h^2} \left[\sigma_R \frac{2}{h} + \gamma + \frac{\tau_2}{L} \right].$$

Выражения для нормальных и касательных напряжений получим из функции Эри как:

$$\sigma_{\alpha 2} = d_5 \alpha_2^2 \beta_2 - \frac{2d_5 \beta_2^3}{3} + (d_3 + \mu \gamma) \beta_2,$$

$$\sigma_{\beta 2} = \frac{d_5 \beta_2^3}{3} + (b_3 + \gamma) \beta_2 + a_2,$$

$$\tau_{\alpha 2 \beta 2} = -d_5 \alpha_2 \beta_2^2 - b_3 \alpha_2. \quad (3)$$

Деформированное состояние пластинки 2 определим на основе функции Эри по методике П. Ф. Папкович, изложенной в [12]. Получим:

$$u_2(\alpha_2, \beta_2) = \frac{1}{6G} [-A_1 \alpha_2 \beta_2^3 + B_1 \alpha_2^3 \beta_2 + C_1 \alpha_2 \beta_2], \quad (4)$$

$$v_2(\alpha_2, \beta_2) = A_2 \cdot \beta_2^2 + \frac{1}{24G} [B_2 \beta_2^4 - C_2 \cdot \alpha_2^2 \beta_2^2 + D_2 \beta_2^2 + E_2 \cdot \alpha_2^4 + F_2 \cdot \alpha_2^2],$$

где

$$A_1 = d_5(2 - \mu); \quad B_1 = d_5(1 - \mu); \quad C_1 = 3(d_3 - \mu d_3 - \mu b_3);$$

$$A_2 = \frac{0,5 - \mu}{1 - \mu} \cdot \frac{\gamma}{2G}; \quad B_2 = d_5(1 + \mu); \quad C_2 = 6\mu d_5;$$

$$D_2 = 2(3b_3 - 3\mu b_3 + d_3 - 3\mu d_3); \quad E_2 = d_5(\mu - 1);$$

$$F_2 = 6(\mu b_3 - 2b_3 - d_3 + d_3 \mu).$$

Вывод. Полученные выражения (13–15) полностью определяют деформированное состояние боковой пластинки 2, а также пластинки 4 волновода при его инерционном нагружении. Сравнение результатов расчета напряжений и деформаций в ППП Ansys, Nastran показало весьма хорошую сходимость, до 4 %.

Библиографические ссылки

1. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов. 10-е изд. М. : МГТУ, 1999. 592 с.
2. Власов В. З. Избранные труды. Т. 2 : Тонкостенные упругие стержни. М. : Изд-во АН СССР, 1963. 507 с.
3. Ржаницын А. Р. Строительная механика. М. : Высшая школа, 1982. 400 с.
4. Бычков Д. В. Строительная механика стержневых тонкостенных конструкций. М. : Госстройиздат, 1962. 387 с.

5. Сливкер В.И. Строительная механика. Вариационные основы. М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2005. 736 с.

6. The analytical solution of the problem of the pure bend for shell model of the thin-walled beam with rectangular cross section / I. V. Kudryavtsev, O. B. Gotseluk, A. E. Mityaev, V. G. Demin // International Journal of Pure and Applied Mathematics. 2017. № 113(1). P. 151–165.

7. Новожилов В. В. Линейная теория тонких оболочек. СПб. : Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2010. 380 с.

8. Папкович П. Ф. Теория упругости. Л.-М. : Изд-во ГИОП, 1939. 642 с.

9. Александров А. В. Основы теории упругости и пластичности. М. : Высшая школа, 2002. 400.

References

1. Feodos'ev V. I. Soprotivlenie materialov. 10-e izd. M. : MG TU, 1999. 592 p. (In Russ.).

2. Vlasov V. Z. Izbrannye trudy. T. 2 : Tonkostennye uprugie sterzhni. M. : Izd-vo AN SSSR, 1963. 507 p. (In Russ.).

3. Rzhanicyn A. R. Stroitel'naya mekhanika. M. : Vysshaya shkola, 1982. 400 p. (In Russ.)

4. Bychkov D. V. Stroitel'naya mekhanika sterzhnevyyh tonkostennykh konstrukcij. M. : Gosstrojizdat, 1962. 387 p. (In Russ.)

5. Slivker V. I. Stroitel'naya mekhanika. Variacionnye osnovy. M. : Izd-vo Associacii stroitel'nyh vuzov, 2005. 736 p. (In Russ.)

6. The analytical solution of the problem of the pure bend for shell model of the thin-walled beam with rectangular cross section / I. V. Kudryavtsev, O. B. Gotseluk, A. E. Mityaev, V. G. Demin // International Journal of Pure and Applied Mathematics. 2017. № 113(1). P. 151–165.

7. Novozhilov V. V. Linejnaya teoriya tonkih obolochek. SPb. : Izd-vo Sankt-Peterburgskogo un-ta, 2010. 380 p. (In Russ.)

8. Papkovich P.F. Teoriya uprugosti. L.-M. : Izd-vo GIOP, 1939. 642 p. (In Russ.)

9. Aleksandrov A.V. Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti. M. : Vysshaya shkola, 2002. 400 p. (In Russ.)

© Кудрявцев И. В., 2020

МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТНЫХ УСЛОВИЙ ПРОЧНОСТИ В РАСЧЕТАХ УПРУГИХ ТЕЛ С НЕОДНОРОДНОЙ РЕГУЛЯРНОЙ СТРУКТУРОЙ

А. Д. Матвеев

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44
E-mail: mtv241@mail.ru

Предложен метод эквивалентных условий прочности для расчета на статическую прочность упругих тел с неоднородной регулярной структурой (пластин, балок, оболочек), которые широко применяются в авиационной и ракетной технике.

Ключевые слова: композиты, упругость, многосеточные конечные элементы, эквивалентные условия прочности, пластины, балки, оболочки.

THE METHOD OF EQUIVALENT STRENGTH CONDITIONS IN CALCULATIONS OF ELASTIC BODIES WITH INHOMOGENEOUS REGULAR STRUCTURE

A. D. Matveev

Institute of Computational Modeling SB RAS
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
E-mail: mtv241@mail.ru

The Method of equivalent strength conditions is proposed for calculating static strength of composite bodies with inhomogeneous regular structure (plates, beams, shells), which are widely used in aviation and rocket technology.

Keywords: composites, elastic, multigrid finite elements, equivalent strength conditions, plates, beams, shells.

Введение. При анализе напряженно-деформированного состояния (НДС) упругих тел широко применяется метод конечных элементов (МКЭ) [1]. Базовые дискретные модели, учитывающие неоднородную, микронеоднородную структуру тел (пластин, балок, оболочек) в рамках микроподхода, имеют высокую размерность. Реализация МКЭ для таких дискретных моделей требует больших ресурсов ЭВМ. Для определения НДС композитных тел эффективно используется метод многосеточных конечных элементов (ММКЭ) [2, 3], порождающий дискретные модели, размерности которых в $10^3 \div 10^6$ раз меньше размерностей базовых. Следует отметить, что МКЭ есть частный случай ММКЭ. Если при решении краевых задач по МКЭ используются многосеточные конечные элементы (МнКЭ) [2–5], то в этом случае, по сути, реализуется ММКЭ. В данной работе для расчета на прочность упругих тел с неоднородной, микронеоднородной регулярной структурой предлагается метод эквивалентных условий прочности (МЭУП), который реализуется с помощью МКЭ с использованием МнКЭ и сводится к расчету на прочность упругих изотропных однородных тел с применением эквивалентных условий прочности [6]. Реализация МЭУП требует малых ресурсов ЭВМ.

1. Положения метода эквивалентных условий прочности. В МЭУП используются линейно упругие однородные и композитные тела (КТ) с гладкими гра-

ницами, состоящие из пластичных материалов. Функции статических нагрузений КТ – гладкие. Связи между составными телами КТ идеальны. Границы закрепления КТ не вырождаются в точки.

2. Процедуры реализации метода эквивалентных условий прочности. Не теряя общности суждений, рассматриваем тела с неоднородной волокнистой структурой, которые широко применяются в технике. В основе МЭУП лежит следующая теорема.

Теорема. Пусть для КТ V_0 (волокнистой структуры) заданы условия прочности вида

$$n_1 \leq n_0 \leq n_2, \quad (1)$$

где n_1, n_2 – заданы, $n_1 > 1$, n_0 – коэффициент запаса КТ V_0 , $n_0 = \sigma_T / \sigma_0$, σ_T – предел текучести волокна, σ_0 – максимальное эквивалентное напряжение КТ V_0 , которое отвечает точному решению задачи теории упругости, построенному для КТ V_0 .

Тогда существуют такое число p (коэффициент эквивалентности) и такое изотропное однородное тело V^b , что если коэффициент запаса n_b тела V^b удовлетворяет эквивалентным условиям прочности [7], которые учитывают погрешность напряжений, т. е.

$$\frac{pn_1}{1 - \delta_\alpha} \leq n_b \leq \frac{pn_2}{1 + \delta_\alpha}, \quad (2)$$

то коэффициент запаса n_0 КТ V_0 удовлетворяет заданным условиям прочности (1), где $n_b = \sigma_T / \sigma_b$, σ_b – максимальное эквивалентное напряжение тела V^b , отвечающее приближенному решению задачи упругости, построенному для тела V^b , $|\delta_b| \leq \delta_\alpha < C_\alpha = \frac{n_2 - n_1}{n_1 + n_2}$, δ_b – относительная погрешность напряжения σ_b , δ_α – верхняя оценка для δ_b задана.

Тела V^b , V_0 имеют одинаковые форму, размеры, закрепления и нагружения, модули упругости тела V^b и волокна одинаковы. Не теряя общности суждений, процедуры реализации МЭУП кратко рассмотрим на примере расчета КТ (балки) V_0 размерами $128h \times 1536h \times 128h$, где h – задано, рис. 1. Тело V_0 армировано волокнами. Регулярная ячейка G_0 КТ V_0 имеет размеры $8h \times 8h \times 8h$, сечения 16 продольных волокон размерами $h \times h$ закрашены, рис. 2.

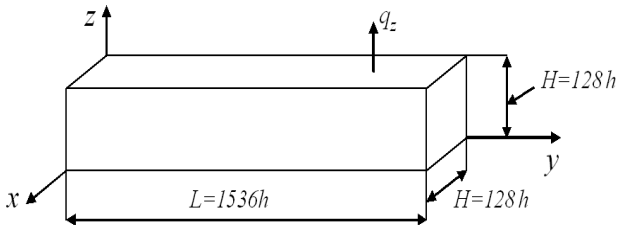


Рис. 1. Характерные размеры КТ (балки) V_0

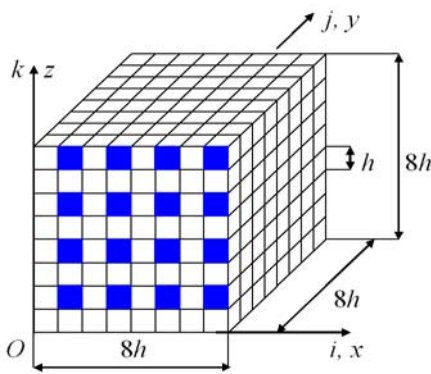


Рис. 2. Регулярная ячейка G_0

При $y = 0$ КТ закреплено, при $z = H$ имеет нагружение q_z . Для коэффициента запаса n_0 КТ V_0 заданы условия прочности (1). Базовая дискретная модель R_0 КТ V_0 , состоящая из конечных элементов (КЭ) 1-го порядка формы куба со стороной h [1] (в которых реализуется трехмерное НДС), учитывает неоднородную структуру КТ и порождает равномерную сетку с шагом h размерности $129 \times 1537 \times 129$. Сетка ячейки G_0 показана на рис. 2. Для тела V^b оп-

ределяем дискретную модель V_n^b , которая состоит из КЭ $V_e^{(n)}$ 1-го порядка формы куба со стороной h_n и имеет равномерную сетку с шагом h_n размерности $n_1^{(n)} \times n_2^{(n)} \times n_3^{(n)}$, где

$$\begin{aligned} n_1^{(n)} &= 8n + 1, \quad n_2^{(n)} = 12 \times 8n + 1, \\ n_3^{(n)} &= 8n + 1, \quad n = 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (3)$$

В силу (3) получаем $h_n = 16h/n$, $n = 1, 2, 3, \dots$, модель V_n^b состоит из одинаковых тел G_n^b размерами $8h_n \times 8h_n \times 8h_n$. Пусть КТ G_n^0 (размерами $8h_n \times 8h_n \times 8h_n$) состоит из КЭ $V_e^{(n)}$, имеет волокнистую структуру, такое же число и взаимное расположение волокон (сечением $h_n \times h_n$) как тело G_0 (рис. 2), $n = 1, 2, 3, \dots$. Неоднородная структура в КТ G_n^0 учитывается с помощью КЭ $V_e^{(n)}$. Волокна и матрицы тел G_n^0 , G_0 имеют одинаковые модули упругости. Используя в модели V_n^b вместо тела G_n^b тело G_n^0 , получаем композитную дискретную модель R_n^0 , $n = 1, 2, 3, \dots$, в которой учитывается неоднородная структура и КТ G_n^0 является регулярной ячейкой. Модель R_n^0 имеет такую же равномерную сетку с шагом h_n и размерность как модель V_n^b . Важно отметить, что в силу (3) размерности моделей V_n^b , R_n^0 при $n \leq 15$ меньше размерности модели R_0 . Для понижения размерностей моделей V_n^b , R_n^0 используются МнКЭ [2–5]. При $n = 16$ ($h_{16} = h$) модели R_{16}^0 , V_{16}^b и R_0 имеют одинаковую размерность, причем, $R_{16}^0 = R_0$. Так как модели R_{16}^0 , V_{16}^b имеют высокую размерность как базовая дискретная модель R_0 КТ V_0 , имеющая 76681728 узловых неизвестных МКЭ, то считаем, что максимальное эквивалентное напряжение σ_{16}^0 (σ_{16}^b) модели R_{16}^0 (V_{16}^b) мало отличается от точного напряжения σ_0 (σ_b^0). Поэтому полагаем $\sigma_0 = \sigma_{16}^0$, $\sigma_b^0 = \sigma_{16}^b$. Коэффициент эквивалентности p находим по формуле $p = \sigma_0 / \sigma_b^0$ [6, 7] или с учетом последних 2-х равенств

$$p = \sigma_{16}^0 / \sigma_{16}^b. \quad (4)$$

Учитывая в формуле $p_n = \sigma_n^0 / \sigma_n^b$, где σ_n^0 (σ_n^b) – максимальное эквивалентное напряжение модели R_n^0 (V_n^b), что при $n \rightarrow 16$ $\sigma_n^0 \rightarrow \sigma_{16}^0$, $\sigma_n^b \rightarrow \sigma_{16}^b$, в силу (4) имеем $p_n \rightarrow p$ при $n \rightarrow 16$. Пусть p_n быстро сходится к p . Пусть $\delta_n = |p_n - p_{n-1}| / p_n$ мало, где $n = 2, 3, \dots$. Тогда принимаем $p = p_n$. Подставляя найденный коэффициент p и заданные δ_α , n_1 и n_2 в (2), определяем эквивалентные условия прочности, кото-

рые учитывают погрешность напряжений. Пусть δ_n^b быстро сходится к σ_b^0 . Пусть $\delta_n^\sigma = |\sigma_n^b - \sigma_{n-1}^b| / \sigma_n^b$ мало и $|\delta_n^b| \leq \delta_\alpha$, где δ_n^b – относительная погрешность напряжения σ_n^b , δ_α – задано, $\delta_\alpha < C_\alpha$, $n = 2, 3, \dots$. Тогда полагаем $\sigma_b = \sigma_n^b$. Пусть коэффициент запаса n_b (где $n_b = \sigma_T / \sigma_n^b$) изотропного однородного тела V^b удовлетворяет построенным эквивалентным условиям прочности (2). Тогда коэффициент запаса n_0 КТ V_0 удовлетворяет заданным условиям прочности (1). Приведенный в работе [7] расчет на прочность балки с микронеоднородной регулярной структурой с помощью МЭУП показывает высокую его эффективность.

Библиографические ссылки

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 542с.
2. Матвеев А. Д. Метод многосеточных конечных элементов в расчетах трехмерных однородных и композитных тел // Учен. зап. Казан. ун-та. Серия: Физ.-матем. науки. 2016. Т. 158, кн. 4. С. 530–543.
3. Matveev A. D. Multigrid finite element method in stress of three-dimensional elastic bodies of heterogeneous structure // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2016. Vol. 158, № 1. Art. 012067, P. 9
4. Матвеев А. Д. Построение сложных многосеточных конечных элементов с неоднородной и микронеоднородной структурой // Известия АлтГУ. 2014. № 1/1, Серия: Математика и механика. С. 80–83.
5. Матвеев А. Д. Построение многосеточных конечных элементов для расчета оболочек, пластин и балок на основе образующих конечных элементов // Вестник ПНИПУ. Механика. 2019. № 3. С. 48–57.
6. Матвеев А. Д. Расчет на прочность композитных конструкций с применением эквивалентных условий прочности // Вестник КрасГАУ. 2014. № 11. С. 68–79.
7. Матвеев А. Д. Метод эквивалентных условий прочности в расчетах композитных конструкций ре-

гулярной структуры с применением многосеточных конечных элементов // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20, № 4. С. 423–435.

References

1. Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [Finite element method in engineering]. M.: Mir, 1975. 544 p.
2. Matveev A. D. *Metod mnogosetochnykh konechnykh elementov v raschetakh trekhmernykh odnorodnykh i kompozitnykh tel* [The method of multigrid finite elements in the calculations of three-dimensional homogeneous and composite bodies] // *Uchen. zap. Kazan. un-ta. Seriya: Fiz.-matem. Nauki*, 2016. T. 158, kn. 4. P. 530–543.
3. Matveev A. D. *Multigrid finite element method in stress of three-dimensional elastic bodies of heterogeneous structure* // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2016, Vol. 158, no. 1, Art. 012067, P. 9
4. Matveev A. D. *Postroenie slozhnykh mnogosetochnykh konechnykh elementov s neodnorodnoj i mikro-neodnorodnoj strukturoj* [Construction of complex multigrid finite elements with inhomogeneous and microinhomogeneous structure] // *Izvestiya AltGU*. 2014. № 1/1, Seriya: Matematika i mekhanika. P. 80–83.
5. Matveev A. D. *Postroenie mnogosetochnykh konechnykh elementov slozhnoi formu dlya rascheta obolochek, plastin i balok* [Construction of multigrid finite elements to calculate shells, plates and beams based on generating finite elements]. // *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2019. № 3. P. 48–57.
6. Matveev A. D. *Raschet na prochnost' kompozitnykh konstrukcij s primeneniem ekvivalentnykh uslovij prochnosti* [Calculation of the strength of composite structures using equivalent strength conditions] // *Vestnik KrasGAU*. 2014. № 11. P. 68–79.
7. Matveev A. D. *The method of equivalent strength conditions in calculating composite structures with a regular structure using multigrid finite elements* // *Siberian Journal of Science and Technology*. 2019. Vol. 20, № 4. P. 423–435.

© Матвеев А. Д., 2020

ОСНОВНАЯ ТЕОРЕМА МЕТОДА ЭКВИВАЛЕНТНЫХ УСЛОВИЙ ПРОЧНОСТИ

А. Д. Матвеев

Институт вычислительного моделирования СО РАН
 Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44
 E-mail: mtv241@mail.ru

Рассмотрена основная теорема метода эквивалентных условий прочности, который используется для расчета на прочность упругих тел с неоднородной регулярной структурой (пластин, балок, оболочек), широко применяемых в авиационной и ракетной технике.

Ключевые слова: композиты, упругость, эквивалентные условия прочности.

THE BASIC THEOREM OF THE METHOD OF EQUIVALENT STRENGTH CONDITIONS

A. D. Matveev

Institute of Computational Modeling SB RAS
 50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
 E-mail: mtv241@mail.ru

The basic theorem of the method of equivalent strength conditions is considered, which is used to calculate the strength of elastic bodies with inhomogeneous regular structure (plates, beams, shells), which are widely used in aviation and rocket technology.

Keywords: composites, elastic, equivalent strength conditions.

Введение. При анализе напряженно-деформированного состояния упругих тел широко используется метод конечных элементов (МКЭ). Базовые дискретные модели, учитывающие неоднородную структуру тел в рамках микроподхода, имеют очень высокую размерность. Кроме того, для определения погрешности решения необходимо использовать последовательность приближенных решений, построенных с помощью процедуры измельчения композитных дискретных моделей, что приводит к резкому увеличению размерностей этих моделей. Для расчета на прочность трехмерных тел с неоднородной регулярной структурой используется метод эквивалентных условий прочности (МЭУП) [1], который сводится к расчету на прочность изотропных однородных тел с применением эквивалентных условий прочности. МЭУП реализуется с помощью МКЭ с использованием многосеточных конечных элементов [2; 3], которые порождают дискретные модели малой размерности и решения с малой погрешностью. Реализация МЭУП требует малых ресурсов ЭВМ и не использует процедуры измельчения композитных дискретных моделей.

1. Основная теорема метода эквивалентных условий прочности. Не теряя общности суждений, для простоты изложения рассматриваем тела с неоднородной волокнистой структурой, которые широко применяются на практике. В основе МЭУП лежит следующая теорема, которая, по сути, объединяет две теоремы, доказанные в работе [1].

Теорема. Пусть для коэффициента запаса n_0 тела V_0 , имеющего неоднородную (волокнистую) структуру, заданы условия прочности

$$n_1 \leq n_0 \leq n_2, \quad (1)$$

где n_1, n_2 – заданы, $n_1 > 1$, n_0 – коэффициента запаса тела V_0 отвечает точному решению задачи теории упругости, построенному для тела V_0 .

Тогда существуют такое изотропное однородное тело V^b и такое число p (коэффициент эквивалентности), что если коэффициент запаса n_b тела V^b удовлетворяет (скорректированным) эквивалентным условиям прочности вида

$$\frac{pn_1}{1-\delta_\alpha} \leq n_b \leq \frac{pn_2}{1+\delta_\alpha}, \quad (2)$$

то коэффициент запаса n_0 тела V_0 удовлетворяет заданным условиям прочности (1), где $n_b = \sigma_T / \sigma_b$, σ_T – предел текучести волокна [1], σ_b – максимальное эквивалентное напряжение тела V^b , отвечающее решению задачи упругости, построенному по МКЭ для тела V^b ,

$$\delta_\alpha < C_\alpha = (n_2 - n_1) / (n_2 + n_1), \quad (3)$$

δ_α – верхняя оценка относительной погрешности δ_b напряжения σ_b , $|\delta_b| \leq \delta_\alpha$, δ_α – задано.

Эквивалентные условия прочности (2), учитывающие погрешность напряжений, называются скорректированными [1].

Доказательство.

Пусть упругое однородное изотропное тело V^b и композитное тело V_0 имеют одинаковые форму, размеры, закрепления и нагружения, но отличаются модулями упругости. Пусть модули упругости тела V^b и волокна одинаковы. Коэффициенты запаса n_0 , n_b^0 соответственно тел V_0 , V^b находим по формулам

$$n_0 = \sigma_T / \sigma_0, \quad (4)$$

$$n_b^0 = \sigma_T / \sigma_b^0, \quad (5)$$

где σ_b^0 – максимальное эквивалентное напряжение конструкции V^b , отвечающее точному решению задачи упругости.

Пусть коэффициент n_0 удовлетворяет условиям (1). Тогда подставляя (4) в (1) получим

$$n_1 \leq (\sigma_T / \sigma_0) \leq n_2. \quad (6)$$

Существует такое число p (коэффициент эквивалентности), что

$$p = \sigma_0 / \sigma_b^0. \quad (7)$$

Учитывая (7) в (6), имеем

$$pn_1 \leq (\sigma_T / \sigma_b^0) \leq pn_2. \quad (8)$$

Используя (5) в (8), получаем

$$pn_1 \leq n_b^0 \leq pn_2. \quad (9)$$

Итак, показано, что если коэффициент запаса n_0 композитного тела V_0 удовлетворяет условиям (1), то коэффициент запаса n_b^0 изотропного однородного тела V^b удовлетворяет условиям (9). Обратно, пусть коэффициент запаса n_b^0 тела V^b удовлетворяет условиям прочности (9). Тогда подставляя (5) в (9) с учетом (7), имеем $pn_1 \leq (p\sigma_T / \sigma_0) \leq pn_2$. Откуда с учетом (4) следует выполнение для коэффициента запаса n_0 композитного тела V_0 условий прочности (1). Итак, показано, что всякому коэффициенту $n_b^0 \in (pn_1, pn_2)$ соответствует единственный коэффициент $n_0 \in (n_1, n_2)$, найденный по формуле (6), и наоборот. Рассмотрим предельные случаи. Пусть $n_b^0 = pn_1$. Используя соотношение (5), в последнем равенстве, получаем $p\sigma_T / \sigma_0 = pn_1$. Откуда с учетом (4) следует $n_0 = n_1$. Аналогично показываем, если $n_b^0 = pn_2$, то $n_0 = n_2$. Пусть $n_0 = n_1$. Используя (4), (7) в последнем равенстве, получаем $\sigma_T / \sigma_b^0 = pn_1$. Откуда с учетом (5) вытекает $n_b^0 = pn_1$. Аналогично показываем, если $n_0 = n_2$, то $n_b^0 = pn_2$. Отсюда следует, что (9) есть эквивалентные условия прочности для тела V_0 [1].

Пусть для тела V^b найдено максимальное эквивалентное напряжение σ_b такое, что

$$|\delta_b| \leq \delta_\alpha < C_\alpha = (n_2 - n_1) / (n_2 + n_1), \quad (10)$$

где δ_b – относительная погрешность для σ_b , т. е.

$$\delta_b = (\sigma_b - \sigma_b^0) / \sigma_b^0. \quad (11)$$

Из (11) следует $\sigma_b = (1 + \delta_b) \sigma_b^0$. Отсюда получаем

$$n_b^0 = (1 + \delta_b) n_b. \quad (12)$$

Отметим, что в (10) $C_\alpha < 1$. Пусть δ_0 такое, что $\delta_0 = |\delta_b|$. Тогда в силу (10) имеем

$$0 \leq \delta_0 = |\delta_b| \leq \delta_\alpha < 1. \quad (13)$$

Принимая в (12) последовательно $\delta_b = -\delta_0$, $\delta_b = \delta_0$, введем коэффициенты

$$n_1^r = (1 - \delta_0) n_b, \quad n_2^r = (1 + \delta_0) n_b, \quad (14)$$

Тогда в силу (12), (14) получаем

$$n_b^0 = n_1^r \text{ или } n_b^0 = n_2^r. \quad (15)$$

Введем коэффициенты n_1^d , n_2^d по формулам

$$n_1^d = (1 - \delta_\alpha) n_b, \quad n_2^d = (1 + \delta_\alpha) n_b. \quad (16)$$

В силу, что $0 \leq \delta_\alpha < 1$, $n_b > 0$, из (16) следует

$$n_2^d \geq n_1^d. \quad (17)$$

Эквивалентные условия прочности, учитывающие погрешность напряжений, т. е. скорректированные эквивалентные условия прочности, имеют вид (2) или

$$pn_1(1 + \delta_\alpha) \leq n_b(1 - \delta_\alpha^2) \leq pn_2(1 - \delta_\alpha). \quad (18)$$

Пусть для коэффициента n_b выполняются эквивалентные условия прочности (18), т. е. пусть выполняются неравенства $pn_1 \leq (1 - \delta_\alpha) n_b$, $(1 + \delta_\alpha) n_b \leq pn_2$. Тогда отсюда следует, что для коэффициентов n_1^d , n_2^d с учетом (16), (17) выполняются неравенства

$$pn_1 \leq n_1^d \leq n_2^d \leq pn_2. \quad (19)$$

Из сравнения (14), (16) с учетом (13), следуют неравенства $n_1^d \leq n_1^r$, $n_2^r \leq n_2^d$. Отсюда, учитывая, что согласно (14) $n_1^r \leq n_2^r$, получаем

$$n_1^d \leq n_1^r \leq n_2^r \leq n_2^d. \quad (20)$$

Тогда в силу (19), (20) выполняются неравенства

$$pn_1 \leq n_1^r \leq n_2^r \leq pn_2. \quad (21)$$

Из выполнения (21) с учетом (15) следует выполнение условий прочности (9) для коэффициента запаса n_b^0 , следовательно, и выполнение заданных условий прочности (1). Ограничения на параметр δ_α находим из предположения существования скорректированных условий прочности (4), т. е. пусть $pn_1(1 + \delta_\alpha) \leq pn_2(1 - \delta_\alpha)$. Откуда следует

$$\delta_\alpha \leq C_\alpha = (n_2 - n_1) / (n_1 + n_2). \quad (22)$$

Отметим, что поскольку $n_2 > n_1 \geq 1$, то из (22) следует $0 < C_\alpha < 1$. Если $\delta_\alpha = C_\alpha$, то диапазон для варьирования значений коэффициента n_b равен нулю, т. е. $n_b = p(n_1 + n_2) / 2$, что трудно выполнить на практике. Поэтому необходимо δ_α задать такое, что $\delta_\alpha < C_\alpha$. В этом случае возможно выполнение эквивалентных условий прочности (9) для коэффициента n_b^0 с помощью скорректированных эквивалентных условий прочности (2) и напряжения σ_b , имеющего такую погрешность δ_b , что $|\delta_b| \leq \delta_\alpha$. Выше было показано, что из выполнения условий (9) следует выполнение заданных условий прочности (1). Теорема доказана.

Согласно выше изложенной теореме, реализация МЭУП сводится к построению скорректированных эквивалентных условий прочности (т. е. к определению коэффициента эквивалентности) и нахождению коэффициента запаса (т. е. максимального эквивалентного напряжения) изотропного однородного тела. Подробно МЭУП изложен в работе [1].

Библиографические ссылки

1. Матвеев А. Д. Метод эквивалентных условий прочности в расчетах композитных конструкций регулярной структуры с применением многосеточных конечных элементов // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20, № 4. С. 423–435.

2. Матвеев А. Д. Построение сложных многосеточных конечных элементов с неоднородной и микронеоднородной структурой // Известия АлтГУ. 2014. № 1/1, Серия: Математика и механика. С. 80–83.

3. Матвеев А. Д. Построение многосеточных конечных элементов для расчета оболочек, пластин и балок на основе образующих конечных элементов // Вестник ПНИПУ. Механика. 2019. № 3. С. 48–57.

References

1. Matveev A. D. *The method of equivalent strength conditions in calculating composite structures with a regular structure using multigrid finite elements*. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2019. Vol. 20, № 4. P. 423–435.

2. Matveev A. D. *Postroenie slozhnykh mnogosetochnykh konechnykh elementov s neodnorodnoy i mikroneodnorodnoy strukturoj* [Construction of complex multigrid finite elements with inhomogeneous and micro-inhomogeneous structure] // *Izvestiya AltGU*. 2014. № 1/1, Seriya: Matematika i mekhanika. P. 80–83.

3. Matveev A. D. *Postroenie mnogosetochnykh konechnykh elementov slozhnoi formu dlya rascheta obolochek, plastin i balok* [Construction of multigrid finite elements to calculate shells, plates and beams based on generating finite elements] // *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2019. № 3. P. 48–57.

© Матвеев А. Д., 2020

МЕТОД МАСШТАБИРОВАНИЯ В РАСЧЕТАХ КОМПОЗИТНЫХ ТЕЛ

А. Д. Матвеев

Институт вычислительного моделирования СО РАН
 Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44
 E-mail: mtv241@mail.ru

Предложен метод масштабирования для расчета на статическую прочность упругих тел с неоднородной, микронеоднородной регулярной структурой (пластин, балок, оболочек), которые широко применяются в авиационной и ракетной технике.

Ключевые слова: композиты, упругость, масштабирование, метод конечных элементов.

THE METHOD SCALING IN CALCULATIONS OF COMPOSITES BODIES

A. D. Matveev

Institute of Computational Modeling SB RAS
 50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
 E-mail: mtv241@mail.ru

The method scaling is proposed for calculating the static strength of elastic bodies with inhomogeneous, microinhomogeneous regular structure (plates, beams, shells), which are widely used in aviation and rocket technology.

Keywords: composites, elastic, scaling, finite element method.

Введение. В расчетах на прочность упругих композитных конструкций (пластин, балок, оболочек) с помощью метода конечных элементов (МКЭ) [1] важно знать погрешность приближенного решения, для нахождения которой необходимо построить последовательность решений, что связано с применением процедуры измельчения конечноэлементных (дискретных) моделей. Реализация процедуры измельчения для базовых дискретных моделей, которые учитывают в рамках микроподхода неоднородную структуру конструкций (тел), затруднительна, приводит к резкому увеличению размерностей дискретных моделей и поэтому требует больших ресурсов ЭВМ, особенно для дискретных моделей, имеющих микронеоднородную структуру. Расчет на прочность конструкции – один из важнейших на этапе эскизного проектирования, которое является технико-экономическим обоснованием проекта конструкции. Как правило, расчет на прочность конструкции проводится по запасам прочности и сводится к определению максимального эквивалентного напряжения конструкции [2].

В данной работе предлагается метод масштабирования (ММ) для расчета на статическую прочность (двумерных) трехмерных упругих тел с неоднородной, микронеоднородной регулярной структурой, который реализуется с помощью МКЭ с применением многосеточных конечных элементов (МнКЭ) [3, 4]. Реализация ММ сводится к расчету на прочность композитных масштабированных дискретных моделей, которые имеют такие же размеры, форму, закрепления и нагружения как базовая дискретная модель композитного тела (КТ). Размерности масштабиро-

ванных дискретных моделей, которые образуются с помощью масштабированной регулярной ячейки КТ, меньше размерности базовой модели.

Реализация ММ требует малых ресурсов ЭВМ и не содержит процедуры измельчения композитных дискретных моделей. Расчеты показывают, что ММ наиболее эффективен при расчете на прочность трехмерных упругих тел с микронеоднородной регулярной (волоконистой) структурой.

1. Положения метода масштабирования. *Положение 1.* Максимальное эквивалентное напряжение базовой дискретной модели КТ мало отличается от напряжения, которое отвечает точному решению задачи упругости, построенному для КТ. *Положение 2.* Базовая дискретная модель КТ порождает равномерную сетку. *Положение 3.* Для характерных размеров КТ и его регулярной ячейки выполняется условие $d/B \ll 1$, где d – максимальный характерный размер регулярной ячейки КТ, B – минимальный характерный размер КТ. Положение 3, как правило, выполняется для тел с микронеоднородной регулярной структурой.

2. Метод масштабирования в расчетах композитных тел. Не теряя общности суждений, реализацию ММ кратко рассмотрим на примере расчета на прочность КТ (балки) V_0 размерами $H \times L \times H$, где $H = 128h$, $L = 1536h$, h – задано, рис. 1. Балка V_0 армирована продольными волокнами. Регулярная ячейка G_0 КТ V_0 размерами $8h \times 8h \times 8h$ имеет 16 волокон, сечения волокон (в плоскости xOz) размерами $h \times h$ закрашены, рис. 2.

При $y = 0$ балка закреплена, при $z = H$ имеет нагружение q_z . Базовая дискретная модель \mathbf{R}_0 КТ V_0 , состоящая из конечных элементов (КЭ) 1-го порядка формы куба со стороной h [1] (в которых реализуется трехмерное напряженное состояние), учитывает неоднородную структуру КТ и порождает равномерную сетку с шагом h размерности $129 \times 1537 \times 129$.

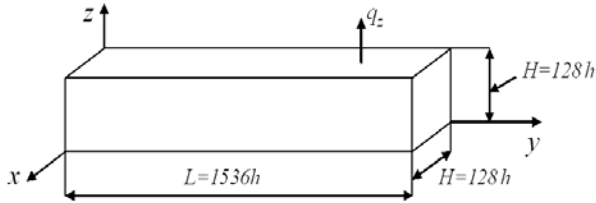


Рис. 1. Характерные размеры КТ (балки) V_0

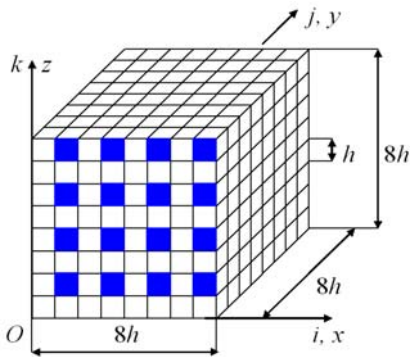


Рис. 2. Регулярная ячейка G_0

Для базовой модели \mathbf{R}_0 положение 2 ММ выполняется. Сетка ячейки G_0 (размерности $9 \times 9 \times 9$, $i, j, k = 1, \dots, 9$) показана на рис. 2. Так как $d/B = 0,062 \ll 1$, где $B = 128h$, $d = 8h$, то для КТ V_0 положение 3 ММ выполняется. Пусть для КТ V_0 заданы условия прочности вида [2]

$$n_1 \leq n_0 \leq n_2, \quad (1)$$

где n_1, n_2 – заданы, $n_1 > 1$, n_0 – коэффициента запаса КТ V_0 , $n_0 = \sigma_T / \sigma_0$, σ_T – предел текучести [2] волокна, σ_0 – максимальное эквивалентное напряжение КТ V_0 , которое отвечает точному решению задачи теории упругости, построенному для КТ V_0 .

В основе ММ лежит следующее утверждение [5]. Пусть коэффициент запаса n_b КТ V_0 удовлетворяет скорректированным условиям прочности [5]

$$\frac{n_1}{1 - \delta_\alpha} \leq n_b \leq \frac{n_2}{1 + \delta_\alpha}, \quad (2)$$

тогда коэффициент запаса n_0 КТ V_0 удовлетворяет заданным условиям прочности (1), где $n_b = \sigma_T / \sigma_b$, σ_b – максимальное эквивалентное напряжение КТ V_0 , которое отвечает решению задачи упругости,

найденному по МКЭ для КТ V_0 , $\delta_\alpha < C_\alpha = (n_2 - n_1) / (n_2 + n_1)$, δ_α – верхняя оценка для относительной погрешности δ_b напряжения σ_b , $|\delta_b| \leq \delta_\alpha$, δ_α – задано.

Согласно ММ определяем композитные (масштабированные) дискретные модели R_n , которые имеют такие же размеры и форму, закрепления и нагружения как базовая модель \mathbf{R}_0 , $n = 1, 2, 3, \dots$. Дискретная модель R_n , состоящая из КЭ V_e^n 1-го порядка формы куба со стороной h_n (в КЭ V_e^n реализуется трехмерное напряженное состояние), имеет равномерную сетку с шагом h_n размерности $n_1^{(n)} \times n_2^{(n)} \times n_3^{(n)}$, где

$$\begin{aligned} n_1^{(n)} &= 8n + 1, \quad n_2^{(n)} = 12 \times 8n + 1, \\ n_3^{(n)} &= 8n + 1, \quad n = 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (3)$$

Согласно (3) модель R_n состоит из одинаковых тел G_n размерами $8h_n \times 8h_n \times 8h_n$, где

$$h_n = \beta_n h, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (4)$$

где β_n – коэффициент масштабности, $\beta_n = 16/n$, при $n \leq 15$ имеем $\beta_n > 1$, т. е. $h_n > h$.

Тело G_n имеет такое же число волокон (сечением $h_n \times h_n$) и такое же их взаимное расположение как регулярная ячейка (тело) G_0 базовой модели \mathbf{R}_0 . Волокна и связующий материал тел G_n и G_0 имеют одинаковые модули упругости. Введем следующее определение.

Определение. Будем говорить, что упругое тело G образовано путем масштабирования упругого тела G_0 с коэффициентом масштабности p , если любой точке $A \in G_0$ отвечает такая единственная точка $B \in G$, что $x_B = px_A$, $y_B = py_A$, $z_B = pz_A$, где x_A, y_A, z_A (x_B, y_B, z_B) – координаты точки A (точки B), отвечающие декартовой системе координат $Oxuz$. И наоборот, если любой точке $B \in G$ соответствует такая единственная точка $A \in G_0$, что $x_A = x_B / p$, $y_A = y_B / p$, $z_A = z_B / p$. Модули упругости в точках $A \in G_0$, $B \in G$ одинаковы.

Итак, согласно (4), КТ G_n образуется путем масштабирования регулярной ячейки G_0 базовой модели (с коэффициентом масштабности β_n). Тело G_n будем называть масштабированной регулярной ячейкой. Отметим, что тела G_n, G_0 геометрически отличаются только масштабностью. Тогда, учитывая (4), формально для тел G_n, G_0 запишем соотношение

$$G_n = \beta_n G_0, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

Поскольку в регулярной ячейке G_0 учитывается неоднородная структура, то в силу (5) и в КТ G_n ($n \leq 15$) также учитывается неоднородная структура с помощью КЭ V_e^n формы куба со стороной h_n . Мо-

дель R_n , которая в силу (5) образуется с помощью масштабированной регулярной ячейки G_n , будем называть масштабированной, в которой учитывается неоднородная структура. КТ G_n , по сути, является регулярной ячейкой для модели R_n . Для композитной масштабированной дискретной модели R_n , $n = 1, 2, 3, \dots$, следует отметить следующее.

1. Размерность модели R_n , при $n \leq 15$, в силу (3) меньше размерности базовой модели R_0 . Поэтому реализация МКЭ для модели R_n ($n \leq 15$) требует меньше ресурсов ЭВМ, чем для базовой. Для понижения размерности модели R_n используются МКЭ [3, 4].

2. При построении композитных масштабированных дискретных моделей не используется процедура измельчения композитных дискретных моделей.

Согласно (4), (5) при $n = 16$ ($h_{16} = h$, $\beta_{16} = 1$, $G_{16} = G_0$) модели R_{16} и R_0 совпадают, т. е. $R_{16} = R_0$. Так как модель R_{16} (как и модель R_0) имеет высокую размерность, т. е. имеет 76681728 неизвестных МКЭ, и учитывая, что $h \ll H$, то считаем, что максимальное эквивалентное напряжение σ_{16} модели R_{16} мало отличается от точного напряжения σ_0 , т. е. положение 1 ММ для базовой модели R_0 выполняется. Тогда полагаем $\sigma_0 = \sigma_{16}$. Согласно (4), (5) при $n \rightarrow 16$ (при $\beta_n \rightarrow 1$) имеем $G_n \rightarrow G_0$. Отсюда, учитывая, что КТ G_n является регулярной ячейкой модели R_n , следует

$$R_n \rightarrow R_0 \text{ при } n \rightarrow 16. \quad (6)$$

В силу (6) при $n \rightarrow 16$ имеем $\sigma_n \rightarrow \sigma_{16}$ или (с учетом равенства $\sigma_0 = \sigma_{16}$) $\sigma_n \rightarrow \sigma_0$, где σ_n – максимальное эквивалентное напряжение модели R_n , которое определяется с помощью МКЭ [1]. Пусть σ_n быстро сходится к σ_0 . Пусть $\delta_\sigma = |\sigma_n - \sigma_{n-1}| / \sigma_n$ малая величина и $|\delta_n| \leq \delta_\alpha$, где δ_n – относительная погрешность для напряжения σ_n , δ_α задано, $\delta_\alpha < C_\alpha$, $n = 2, 3, \dots$

Тогда, учитывая быструю сходимость $\sigma_n \rightarrow \sigma_0$, принимаем $\sigma_b = \sigma_n$.

Пусть коэффициент запаса n_b (где $n_b = \sigma_T / \sigma_n$) удовлетворяет скорректированным условиям прочности (2). Тогда коэффициент запаса n_0 КТ V_0 удовлетворяет заданным условиям прочности (1).

Библиографические ссылки

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 542 с.
2. Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Иосилевич Г. Б. Расчет на прочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.
3. Матвеев А. Д. Построение сложных многосеточных конечных элементов с неоднородной и микронеоднородной структурой // Известия АлтГУ. 2014. № 1/1, Серия: Математика и механика. С. 80–83.
4. Матвеев А. Д. Построение многосеточных конечных элементов для расчета оболочек, пластин и балок на основе образующих конечных элементов // Вестник ПНИПУ. Механика. 2019. № 3. С. 48–57.
5. Матвеев А. Д. Расчет упругих конструкций с применением скорректированных условий прочности // Известия АлтГУ. 2017. № 4, математика и механика. С. 116–119.

References

1. Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [Finite element method in engineering]. M.: Mir, 1975. 544 p.
2. Birger I. A., Shorr B. F., Iosilevich G. B. *Raschet na prochnost' detalej mashin* [Calculation of the strength of machine parts]. M.: Mashinostroyeniye, 1993. 640 p.
3. Matveev A. D. *Postroyeniye slozhnykh mnogoseyechnykh konechnykh elementov s neodnorodnoy i mikroneodnorodnoy strukturoy* [Construction of complex multigrid finite elements with inhomogeneous and microinhomogeneous structure] // *Izvestiya AltGU*. 2014. № 1/1, Seriya: Matematika i mekhanika. P. 80–83.
4. Matveev A. D. *Postroyeniye mnogoseyechnykh konechnykh elementov slozhnoi formu dlya rascheta obolochek, plastin i balok* [Construction of multigrid finite elements to calculate shells, plates and beams based on generating finite elements] // *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2019. № 3. P. 48–57.
5. Matveev A. D. *Raschet uprugih konstrukcij s primeneniye skorrektirovannykh uslovij prochnosti* [Calculation of elastic structures using the adjusted terms of strength] // *Izvestiya AltGU*. 2017. № 4, matematika i mekhanika. P. 116–119.

© Матвеев А. Д., 2020

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕИЗВЕСТНЫХ ТРАЕКТОРИЙ АРМИРОВАНИЯ
В УСЛОВИЯХ СВЯЗАННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ДЛЯ ПЛОСКОЙ ЗАДАЧИ**

Ю. В. Немировский¹, Н. А. Федорова²

¹Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
Российская Федерация, 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская 4/1

²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: feodorova.natalia@mail.ru, nfeodorova@sfu-kras.ru

Представлены методы решения обратных задач армированной среды для создания плоских авиационных конструкций, удовлетворяющих заданному уровню температурных и силовых воздействий.

Ключевые слова: обратная задача армированной среды, криволинейные траектории.

**DETERMINATION OF THE UNKNOWN TRAJECTORIES OF REINFORCEMENT
IN TERMS OF RELATED STRAINS FOR A PLANE PROBLEM**

Y. V. Nemirovsky¹, N. A. Feodorova²

¹Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
4/1 Institutskaya str., Novosibirsk, 630090, Russia

²Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: feodorova.natalia@mail.ru, nfeodorova@sfu-kras.ru

We solved the inverse problem of determining the directions of rational reinforcement for various mechanical constraints. This report describes a new methodological approach to development of planar aeronautical constructions reinforced by curvilinear fibers sets.

Keywords: the inverse problem for a reinforced plate, curvilinear trajectories.

Введение. Армированные конструкции служат элементами ответственного назначения в ракетно-космической технике [1–6]. За счет найденного в рамках обратной задачи способа армирования вдоль криволинейной траектории реализуются заданные тепловые и силовые воздействия на конструкцию. Плоская конструкция представляет собой симметричный пакет из произвольных анизотропных слоев малой толщины, поле температур постоянно. Рассмотрены кинематические задачи с использованием дополнительных связей между характеристиками деформационного поля. Сформулированы разрешающие системы дифференциальных уравнений для нахождения подходящей структуры армирования в условиях связанных деформаций.

Постановка задачи. Рассмотрены $2n$ – слойные конструкции симметричной структуры из произвольных плоских анизотропных слоев $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$. Предполагается, что температура постоянна, прослойки тонкие ($\sum_i \delta_i \ll 1$), чтобы в конструкции реализовывалось плоское напряженное состояние. Рассмотрена плоская двухсвязная пластина с контурами Γ_1, Γ_2 .

Плоская задача линейной неоднородной анизотропной задачи упругости в декартовой системе координат с учетом введенного армирования вдоль непрерывных криволинейных траекторий представляет собой следующие соотношения [1–2]: связь напряжений σ_{ij} и деформаций ε_{ij} для неоднородного армированного материала

$$\sigma_{ij} = (1 - \sum_{m=1}^2 \omega_m) \sigma_{ij}^c + \sum_{m=1}^2 \sigma_m \omega_m l_{mi} l_{mj},$$

$$l_{m1} = \cos \varphi_m, l_{m2} = \sin \varphi_m,$$

где напряжения в связующем

$$\sigma_{ii}^c = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\varepsilon_{ii} + \nu \varepsilon_{jj} - \alpha^c (1+\nu) T),$$

$$\sigma_{ij}^c = \frac{E}{(1+\nu)} \varepsilon_{ij}, \quad j = 3-i, i = 1, 2,$$

E, ν, α^c – соответственно, модуль Юнга, коэффициент Пуассона и коэффициент линейного температурного расширения связующего материала, ω_m интенсивность армирования m -м семейством непрерывных волокон σ_m – напряжение в волокне.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-01-00038).

Уравнения равновесия формулируются относительно усилий N_{11}, N_{12}, N_{22} :

$$\frac{\partial N_{11}}{\partial x} + \frac{\partial N_{12}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial N_{12}}{\partial x} + \frac{\partial N_{22}}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

условие совместности деформаций в декартовой системе координат

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{11}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{22}}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \varepsilon_{12}}{\partial x \partial y} = 0, \quad (2)$$

модельное уравнение армирования, связывающее деформации $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{22}$, деформации в волокне ε_m^0 и углы армирования φ_m m -м семейством непрерывных волокон ($m=1,2$) (структурная модель Ю. В. Немировского)

$$\varepsilon_{11} \cos^2 \varphi_m + \varepsilon_{22} \sin^2 \varphi_m + \varepsilon_{12} \sin \varphi_m \cos \varphi_m = \varepsilon_m^0.$$

В частности, рассмотрена задача с двумя слоями. Пусть $2h$ – толщина пластины, δ_1 – толщина армирующего слоя первого направления φ_1 с интенсивностью армирования ω_1 , δ_2 – толщина армирующего слоя второго направления φ_2 с интенсивностью армирования ω_2 . Тогда усилия через деформации запишем в виде (приведем пример для N_{11})

$$\begin{aligned} N_{11} = & 2(h - \delta_1 - \delta_2) \left[\frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{11} + \nu \varepsilon_{22} - \alpha(1+\nu)T) \right] + \\ & + 2\delta_1 [(1-\omega_1) \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{11} + \nu \varepsilon_{22} - \alpha(1+\nu)T) + \\ & + \omega_1 E_1 (\varepsilon_{11} \cos^2 \varphi_1 + \varepsilon_{22} \sin^2 \varphi_1 - 2\varepsilon_{12} \sin \varphi_1 \cos \varphi_1)] \cos^2 \varphi_1 + \\ & + 2\delta_2 [(1-\omega_2) \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{11} + \nu \varepsilon_{22} - \alpha(1+\nu)T) + \\ & + \omega_2 E_2 (\varepsilon_{11} \cos^2 \varphi_2 + \varepsilon_{22} \sin^2 \varphi_2 - 2\varepsilon_{12} \sin \varphi_2 \cos \varphi_2)] \cos^2 \varphi_2; \end{aligned}$$

E_m – модуль Юнга материала m -го семейства армирующих волокон.

Введем следующие виды деформационных полей в плоской конструкции, например

$$\varepsilon_{11} = af(x, y), \quad \varepsilon_{22} = bf(x, y), \quad \varepsilon_{12} = f(x, y), \quad (3)$$

либо

$$\varepsilon_{11} = f(x, y), \quad \varepsilon_{22} = b_1 f(x, y), \quad \varepsilon_{12} = b_2 f(x, y). \quad (4)$$

Точное (аналитическое) решение уравнения совместности деформаций (2) для вида деформационного поля (3) запишется

$$\begin{aligned} f(x, y) = & F_1 \left(\frac{x - x\sqrt{1-4ab} + 2yb}{2b} \right) + \\ & + F_2 \left(\frac{x + x\sqrt{1-4ab} + 2yb}{2b} \right). \end{aligned}$$

Аналитическое решение уравнения (2) для вида деформационного поля (4) имеет вид

$$\begin{aligned} f(x, y) = & F_3 \left(\frac{xb_2 - x\sqrt{b_2^2 - 4b_1 + 2yb_1}}{2b_1} \right) + \\ & + F_4 \left(\frac{xb_2 + x\sqrt{b_2^2 - 4b_1 + 2yb_1}}{2b_1} \right), \end{aligned}$$

где F_1, F_2, F_3, F_4 – произвольные функции, их точно или приближенно (например, методом наименьших квадратов) определяем из граничных условий на контуре, a, b, b_1, b_2 – константы, удовлетворяющие условиям не отрицательности выражений под радикалом.

Введем неизвестные функции углов армирования, выполнив замену $U(x, y) = \cos 2\varphi_1$, $V(x, y) = \cos 2\varphi_2$, получим соотношения для усилий через неизвестные функции углов армирования $U(x, y), V(x, y)$, интенсивности $\omega_1(x, y), \omega_2(x, y)$ и найденные значения компонент деформации. Подставим эти соотношения в уравнения равновесия (1), получим разрешающую систему. Дифференцирование усилий для подстановки в (1) и последующие преобразования выполнены в среде символьных вычислений Maple. Исходная разрешающая система в настоящей работе не приводится в виду громоздкости.

В каждом слое вводим условия постоянства сечений волокон, связывающие интенсивности армирования ω_1, ω_2 и вспомогательные функции углов армирования $U(x, y), V(x, y)$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (\omega_1 (1 - U(x, y))^2) + \frac{\partial}{\partial y} (\omega_1 (1 + U(x, y))^2) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial x} (\omega_2 (1 - V(x, y))^2) + \frac{\partial}{\partial y} (\omega_2 (1 + V(x, y))^2) &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Выписываем частные решения в полиномах для (5), они содержат набор констант и имеют следующие формы

$$\begin{aligned} U(x, y) = C_1 + C_2 y + C_3 x, \quad \omega_1(x, y) &= 0; \\ U(x, y) = -1, \quad \omega_1(x, y) = C_1 + C_2 y + C_3 y^2; \\ U(x, y) = (x + y)C_2 + C_1, \quad \omega_1(x, y) &= \\ = \frac{(x + y)^2 C_2 + 2(1 + C_1) + 2y(-1 + C_1)C_4 + C_2 C_3}{C_2}. \end{aligned}$$

Каждое из приведенных совокупностей решений $U(x, y), \omega_1(x, y)$ обращает первое уравнение (5) в тождество (проверка выполнена в среде Maple).

Выбираем набор $U(x, y), \omega_1(x, y)$ (аналог для $V(x, y), \omega_2(x, y)$) из форм с неизвестными константами, выполняем подстановку в разрешающую систему, находим константы. Граничные условия для ω_1, ω_2 и φ_1, φ_2 на контуре вводятся на основе исходных данных технологического процесса по изготовлению конструкции.

Решение обратной задачи для армированной плоской конструкции позволяет за счет управления структурой армирования реализовывать заданные условия деформирования конструкции.

Библиографические ссылки

1. Немировский Ю. В., Федорова Н. А. Математическое моделирование плоских конструкций из армированных волокнистых материалов : монография / СФУ. Красноярск, 2010. 136 с.
2. Немировский Ю. В., Федорова Н. А. Примеры решения обратных задач слоисто-волокнистых конструкций с криволинейным армированием // Решетневские чтения : материалы XXIII Междунар. науч.-практич. конф. В 2 ч. ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2019. С. 606–607.
3. Feodorova N. A., Nemirovsky Yu. V. Modeling limit states for curvilinearly reinforced rotated disks // *Mathematica Montisnigri*. 2019. Vol. XLIV. P. 84–99.
4. Немировский Ю. В., Федорова Н. А. Решение плоской задачи для металлокомпозита, армированного одним семейством криволинейных волокон // Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2017. № 2 (32). С. 3–16.
5. Немировский Ю. В., Федорова Н. А. Предельное деформирование дисков газовых и гидротурбин при различных структурах армирования // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56, № 7/3. С. 191–196.
6. Немировский Ю. В., Федорова Н. А. Предельные деформации термоупругих плоских конструкций с криволинейным армированием // Вестник СибГАУ. 2016. № 1(17). С. 73–78.

References

1. Nemirovsiy Yu. V., Feodorova N. A. *Matematicheskoe modelirovanie ploskikh konstruktсий iz armirovannykh voloknistykh materialov* [Mathematical modeling of flat structures made of reinforce fibrous materials] / Sib. Fed. Univ. Krasnoyarsk, 2010. 136 p. (In Russ.).
2. Nemirovsky Yu. V., Feodorova N. A. [Primery resheniya obratnykh zadach sloisto-voloknistykh konstrukcij s krivolinejnym armirovaniem] // *Reshetnevskie chteniya : materialy XV Mezhdunar. nauch. konf.* / Reshetnev University. Krasnoyarsk, 2019. P. 606–607 (In Russ.).
3. Feodorova N. A., Nemirovsky Yu. V. Modeling limit states for curvilinearly reinforced rotated disks // *Mathematica Montisnigri*. 2019. Vol. XLIV. P. 84–99.
4. Nemirovsky Yu. V., Feodorova N. A. [Solving a flat problem for a metal composite reinforced with one family of curved fibers] // *Vestnik ChGPU im. I. Ja. Jakovleva. Serija: Mehanika predel'nogo sostojanija*. 2017. № 2 (32). P. 3–16 (In Russ.).
5. Nemirovsiy Yu. V., Feodorova N. A. [Ultimate deformations of gas and hydraulic turbine disks with various reinforcement structures] // *Izvestia vuzov. Physics*. 2013. Vol. 56, № 7/3. P. 191–196 (In Russ.).
6. Nemirovskij Ju. V., Feodorova N. A. [Ultimate deformations of thermoelastic flat structures with curvilinear reinforcement] // *Vestnik SibGAU*. 2016. № 1(17). P. 73–78 (In Russ.).

© Немировский Ю. В., Федорова Н. А., 2020

УДК 539.37

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗГИБА ТОНКИХ ПЛАСТИНОК ИЗ ОДНОСЛОЙНОГО ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТА С УЧЕТОМ РАЗЛИЧНОЙ ИЗГИБНОЙ ЖЕСТКОСТИ*

И. Е. Петраков

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50/44
E-mail: petrigr@icm.krasn.ru

Для моделирования изгиба тонкой композитной пластинки применяется принцип минимума потенциальной энергии и строится функционал энергии, учитывающий различную изгибную жесткость относительно направления армирования.

Ключевые слова: волокнистый композит, тонкая пластинка, изгибное состояние, разномодульная теория упругости, принцип минимума потенциальной энергии.

MODELING THE BENDING OF THIN PLATES FROM A SINGLE-LAYER FIBER COMPOSITE TAKING INTO ACCOUNT DIFFERENT FLEXURAL RIGIDITY

I. E. Petrakov

Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of RAS
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
E-mail: petrigr@icm.krasn.ru

In this work we use the minimum total potential energy principle to model the bending of a thin composite plate. We construct an energy functional that takes into account different flexural rigidity relative to the direction of reinforcement.

Keywords: fiber composite, thin plate, bending state, multi-modulus theory of elasticity, minimum total potential energy principle.

Композитные материалы широко применяются в промышленности, поскольку они могут обладать лучшими механическими свойствами при том же весе по сравнению с традиционными материалами [1]. Характеристики композитного материала отличаются от характеристик исходных компонентов благодаря своей структуре, поэтому для проектирования композитных материалов и конструкций требуется более детальное моделирование этой структуры и особенностей, возникающих из-за нее. Одной из таких особенностей являются различные модули упругости при растяжении и сжатии композитного материала [2]. При изгибе композитных пластинок разномодульность является причиной различной изгибной жесткости при изгибе в различных направлениях относительно волокон армирования.

Рассмотрим изгиб тонкой пластинки в рамках теории Кирхгофа-Лява. Пусть выполняются следующие гипотезы Кирхгофа: точки срединной плоскости испытывают только нормальные смещения; ввиду малости толщины пластинки смещения u_x и u_y можно считать линейными функциями от z ; в точках срединной плоскости сдвиги в вертикальных плоскостях равны

нулю; сдвиговые напряжения вдоль оси z пренебрежимо малы; для изогнутой пластины сохраняется силу принцип минимума потенциальной энергии [3].

Для описания изгиба такой пластинки был использован принцип минимума потенциальной энергии, согласно которому из всех кинематически возможных напряженно-деформированных состояний твердого деформируемого тела для действительного деформированного состояния потенциальная энергия деформаций достигает минимального значения [4].

Запишем функционал энергии:

$$I(\omega) = \frac{D}{2} \iint_S (\Delta\omega)^2 - \frac{2q}{D} \omega \, dS - \frac{D(1-\sigma)}{2} \times \\ \times \int_L \frac{\partial\omega}{\partial y} \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{\partial\omega}{\partial x} \right) - \frac{\partial\omega}{\partial x} \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{\partial\omega}{\partial y} \right) \, ds,$$

где $\omega(x, y)$ – нормальное смещение точки (x, y) ; $q(x, y)$ – нормальная нагрузка, действующая на основание пластинки S ; D – изгибная жесткость; ds – дифференциал контура пластинки L .

Рассмотрим задачу в случае жестко закрепленного края пластинки.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-90032.

Тогда для ω на контуре пластинки выполняются следующие граничные условия:

$$\omega = 0, \quad \frac{\partial \omega}{\partial x} = \frac{\partial \omega}{\partial y} = 0,$$

а функционал энергии примет вид

$$I(\omega) = \frac{D}{2} \iint_S (\Delta \omega)^2 - \frac{2q}{D} \omega \, dS.$$

Рассмотрим пластинку армированную тонкими нитями в направлении оси x . Обозначим как D_1 и D_2 изгибную жесткость в направлении волокон армирования и перпендикулярно волокнам. В разномодульной теории изгиба изгибная жесткость и модули Юнга при растяжении E^+ и при сжатии E^- связаны между собой уравнениями [5]:

$$h_+ = \frac{\sqrt{E^-} h}{\sqrt{E^-} + \sqrt{E^+}}, \quad h_- = \frac{\sqrt{E^+} h}{\sqrt{E^-} + \sqrt{E^+}},$$

$$D_1 = \left(\frac{E^+ h_+^3}{3(1-\nu^2)} + \frac{E^- h_-^3}{3(1-\nu^2)} \right).$$

При расчете D_2 будем считать модули упругости при растяжении и сжатии равными и воспользуемся формулами осреднения Рейсса:

$$E_{D_2} = \frac{E_m E_f}{f E_f + (1-f) E_m}, \quad D_2 = \frac{2 E_{D_2} h^3}{3(1-\nu^2)},$$

$$D = \sqrt{D_1^2 + D_2^2}, \quad \nu = f \nu_f + (1-f) \nu_m,$$

где f – доля армирующих волокон в материале, E_m , ν_m , E_f , ν_f – модули Юнга, коэффициенты Пуассона материала матрицы и волокон соответственно. Тогда функционал энергии будет равен:

$$I(\omega) = \frac{1}{2} \iint_S \left(\sqrt{D_1} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \sqrt{D_2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right)^2 - \frac{2q}{D} \omega \, dS.$$

Далее рассмотрим пластинку армированную под углом α . В этом случае вторые частные производные заменяются на вторые производные в направлении и перпендикулярно армированию. Получим следующий функционал:

$$I(\omega) = \frac{1}{2} \iint_S \left(\sqrt{D_1} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \cos^2 \alpha + 2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} \sin \alpha \cos \alpha + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \sin^2 \alpha \right) + \sqrt{D_2} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \sin^2 \alpha - 2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} \sin \alpha \cos \alpha + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \cos^2 \alpha \right) \right)^2 - \frac{2q}{D} \omega \, dS.$$

Для минимизации данного функционала может быть применен метод вариации, приводящий к дифференциальному уравнению, которое может быть решено методами конечных элементов [6].

Библиографические ссылки

1. Вильдеман В. Э., Соколкин Ю. В., Ташкинов А. А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов / под ред. Ю. В. Соколкина. М.: Наука. Физматлит, 1997. 288 с.
2. Christensen R. M. *Mechanics of Composite Materials*. New York: Dover Publ., 2005. 384 p.
3. Михлин С. Г. Вариационные методы в математической физике. М.: Наука, 1970. 512 с.
4. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. М.: Мир, 1987. 542 с.
5. Амбарцумян С. А. Разномодульная теория упругости. М.: Наука, 1982. 320 с.
6. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 392 с.

References

1. Vil'deman V. E., Sokolkin Yu. V., Tashkinov A. A. *Mekhanika neuprugogo deformirovaniya i razrusheniya kompozitsionnykh materialov* [The mechanics of inelastic deformation and fracture of composite materials]. M.: Nauka Publ., 1997. 288 p.
2. Christensen R. M. *Mechanics of Composite Materials*. New York: Dover Publ., 2005. 384 p.
3. Mihlin S. G. *Variatsionnye metody v matematicheskoy fizike* [Variational methods in mathematical physics]. M.: Nauka Publ., 1970. 512 p.
4. Washizu K. *Variatsionnye metody v teorii uprugosti i plastichnosti* [Variational methods in the theory of elasticity and plasticity]. M.: Mir Publ., 1987. 542 p.
5. Ambartsumyan S. A. *Raznomodul'naya teoriya uprugosti* [Multimodulus elasticity theory]. M.: Nauka Publ., 1982. 320 p.
6. Segerlind L. *Primenenie metoda konechnykh elementov* [Applied Finite Element Analysis]. M.: Mir Publ., 1979. 392 p.

© Петраков И. Е., 2020

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСПЛАВОВ ПОЛИЭТИЛЕНОВ ПРИ ИХ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

Г. О. Рудаков¹, А. С. Малыгина¹, Г. В. Пышнограй¹, А. А. Лаас²

¹Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,
Российская Федерация, 656038, г. Барнаул, просп. Ленина, 46

²Алтайский государственный университет
Российская Федерация, 656049, г. Барнаул, просп. Ленина, 61
E-mail: parya_96@mail.ru

Рассмотрено применение модифицированной реологической модели Виноградова–Покровского в задаче установления напряжений при одноосном растяжении полимерного расплава.

Ключевые слова: реология, одноосное растяжение, расплавы полиэтилена, многомодовая реологическая модель, элонгационная вязкость.

MODELING OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF POLYETHYLENE MELTS DURING UNIAXIAL ELONGATION

G. O. Rudakov¹, A. S. Malygina¹, G. V. Pyshnograï¹, A. A. Laas²

¹Polzunov Altai State Technical University
46, Lenina Av., Barnaul, 656038, Russian Federation

²Altai State University
61, Lenina Av., Barnaul, 656049, Russian Federation
E-mail: parya_96@mail.ru

The paper considers the use of the modified Vinogradov and Pokrovskii rheological model to describe the establishment of stresses during uniaxial elongation of a polymer melt.

Keywords: rheology, uniaxial elongation, polyethylene melts, multimode rheological model, elongation viscosity.

В настоящее время полимерные материалы широко используются во многих отраслях промышленности и в частности в ракетно-космической отрасли. Их применение позволяет создавать изделия с существенно меньшей массой при сохранении остальных эксплуатационных характеристик. Еще одним достоинством полимерных материалов является простота их переработки, так как изделия из них создаются в основном по расплавной или растворной технологиям. Поэтому актуальность задачи математического моделирования течений растворов и расплавов полимеров не вызывает сомнения.

На сегодняшний момент предложено достаточное число реологических моделей, которые в той или иной мере учитывают сложный характер строения полимерных молекул.

Одной из первых была сформулирована модель Дои–Эдвардса [1].

Альтернативой этим теориям является мезоскопический подход, изложенный в работах [2–6]. В его основу положена модель Каргина–Слонимского–Рауза с дополнительным предположением об анизотропном характере взаимодействия макромолекулы со своим окружением [3, 4]. В этом случае анизотропия релаксационного взаимодействия определяется

размерами и ориентацией макромолекулярного клубка. Дальнейшая модификация этого подхода была связана с обобщением результатов на многомодовый случай, что позволило с приемлемой для практики точностью описать стационарные и нестационарные вискозиметрические функции при простом сдвиге и одноосном растяжении. Следовательно, целью настоящей работы является дальнейшая модификация закона внутреннего трения в модели макромолекулы, которая позволит устранить это несоответствие и выполнить расчет установления сдвиговой вязкости при одноосном растяжении, а также провести сравнение с экспериментальными данными для расплавов полиэтилена различного строения.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что многомодовая модель (mVP) позволяет достаточно точно описать нестационарные зависимости вязкости расплавов разветвленных полимеров от времени при одноосном растяжении. Также можно ожидать, что полученная здесь модель окажется пригодной и для концентрированных растворов и расплавов линейных полимеров. Это в свою очередь может стать основой для использования модели для описания более сложных течений растворов и расплавов полимеров с различной структурой макромолекул.

Библиографические ссылки

1. Doi M., Edwards S. F. The Theory of Polymer Dynamics. Oxford : Oxford University Press. 1988. 345 p.
2. Покровский В. Н., Пышнограй Г. В. Простые формы определяющего уравнения концентрированных растворов и расплавов полимеров как следствие молекулярной теории вязкоупругости // Изв. АН СССР. МЖГ. 1991. № 1. С. 71–77.
3. Определяющее уравнение нелинейных вязкоупругих (полимерных) сред в нулевом приближении по параметрам молекулярной теории и следствия для сдвига и растяжения / Г. В. Пышнограй, В. Н. Покровский, Ю. Г. Яновский и др. // Доклады. АН. 1994. Т. 339, № 5. С. 612–615.
4. Pyshnograi G. V., Gusev A. S., Pokrovskii V. N. Constitutive equations for weakly entangled linear polymers // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2009. Vol. 163, № 1–3. P. 17–28.
5. Модификация закона внутреннего трения в мезоскопической теории текучих полимерных сред / Х. Н. А. Аль Джода, Г. Л. Афонин, Д.А. Мерзликina и др. // Механика композиционных материалов и конструкций. 2013. Т. 19, № 1. С. 124–135.
6. Мерзликina Д. А., Филип П., Пивоконский Р., Пышнограй Г. В., Многомодовая реологическая модель и следствия для простого сдвига и растяжения // Механика композиционных материалов и конструкций. 2013. Т. 19, № 2. С. 254–261.

References

1. Doi M., Edwards S. F. The Theory of Polymer Dynamics. Oxford : Oxford University Press. 1988. 345 p.
2. Pokrovskii V. N., Pyshnograi G. V. Simple forms of the defining equation of concentrated solutions and polymer melts as a consequence of the molecular theory of viscoelasticity// Fluid Mech. 1991. № 1. P. 58–64.
3. Defining equation of nonlinear viscoelastic (polymer) media in the zero approximation by parameters of molecular theory and consequence for shear and stretching / G. V. Pyshnograi, V. N. Pokrovskii, Yu. G. Yanovskii et al. // Reports. AN. 1994. Vol. 339, № 5. С. 612–615.
4. Pyshnograi G. V., Gusev A. S., Pokrovskii V. N. Constitutive equations for weakly entangled linear polymers // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2009. Vol. 163, № 1–3. P. 17–28.
5. Modification of the law of internal friction in the mesoscopic theory of fluid polymer media / H. N. A. Al Joda, G. L. Afonin, D. A. Merzlikina et al. // Mechanics of composite materials and designs. 2013. Vol. 19, № 1. P. 124–135.
6. Merzlikina D. A., Philip P., Pivokonsky R., Pyshnograi G. V., Multimode rheological model and consequences for simple shear and stretching// Mechanics of composite materials and designs. 2013. Vol. 19, № 2. P. 254–261.

© Рудаков Г. О., Малыгина А. С.,
Пышнограй Г. В., Лаас А. А., 2020

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ИЗГИБАЕМОЙ ТОНКОЙ ПЛАСТИНЫ РАСТЯЖЕНИЕМ МЕМБРАННЫМИ СИЛАМИ

Р. А. Сабиров

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

Изучается вопрос продольно-поперечного деформирования изотропной пластин от локальной силы и от растягивающих мембранных сил. В зоне приложения сосредоточенной силы в тонкостенных конструкциях возникают существенные изгибающие моменты и перерезывающие силы. Эти локальные силы являются источником концентрации напряжений. В качестве модели деформирования пластины применена модель С. П. Тимошенко. Прием уменьшения напряжений выбран прием натяжения пластины мембранными силами, приложенными по контуру. При действии сосредоточенной силы и натяжения по всем четырем сторонам контура, прогиб уменьшился на два порядка, а напряжения снижены на порядок. При растяжении пластины только по двум противоположным сторонам, для достижения такого же результата, сила натяжения увеличилась вчетверо. В обоих случаях уровень напряжений не превысил допустимых значений.

Ключевые слова: изгиб пластины, продольно-поперечное деформирование.

REGULATION OF THE STRESS-DEFORMED STATE OF THE BENDED THIN OF THE PLATE BY EXTENSION BY MEMBRANE FORCES

R. A. Sabirov

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

The problem of longitudinal-transverse deformation of isotropic plates from local force and from tensile membrane forces is studied. In the area of application of a concentrated force in thin-walled structures, significant bending moments and shearing forces arise. These local forces are the source of stress concentration. One of the methods for reducing stresses can be the tension of the plate by membrane forces applied along the contour. As a model of plate deformation, combining bending with tension, S.P. Timoshenko. In the first case, under the action of a concentrated force and tension on all four sides of the contour, the deflection arrow was reduced by two orders of magnitude, and the stresses were reduced by an order of magnitude. In the second case, stretching only on two opposite sides of the contour, to achieve the required stress-strain state, the tensile force increased fourfold. In both cases, the stress level did not exceed the permissible values.

Keywords: plate bending, longitudinal-transverse deformation.

В отечественной литературе по изучению и практическому приложению теории совместного изгиба и растяжения пластин мембранными силами, по праву относятся работы Папковича П. Ф. [1], С. П. Тимошенко [2]. В области космической техники существуют конструкции пластин, с поперечными нагрузками распределенными на существенно малой поверхности. Когда размеры зоны, в пределах которой действует нагрузка, существенно малы по сравнению с размерами всей поверхности конструкции, или, например, когда диаметр нагруженной зоны меньше толщины пластины, нагрузку можно рассматривать как локальную, то есть как сосредоточенную силу, приложенную в одной точке [3]. В зоне приложения сосредоточенной силы в тонкостенных конструкциях возникают существенные изгибающие моменты и перерезывающие силы. Эти локальные силы являются источником концентрации напряжений. Одним из

приемов уменьшения напряжений может быть натяжение пластины мембранными силами, приложенными по контуру.

В качестве модели деформирования пластины, сочетающую изгиб с растяжением, применим модель С. П. Тимошенко [2]:

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_{yx}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 H_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2S_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + q_z = 0. \quad (1)$$

К (1) добавлены мембранные силы и изгибающие моменты с крутящим моментом, в соответствии с законом Гука [4], а мембранные силы $N_x = N_x(y)$, $N_y = N_y(x)$, $S_{xy} = \text{const}$, можно применить, как заданные силы натяжения; $w = w(x, y)$ – функция прогиба.

Рассмотрим квадратную пластину ($1 \text{ м} \times 1 \text{ м}$) из фторопластовой пленки толщиной $h = 0,5 \text{ мм}$ и упругими свойствами $E = 650 \text{ МПа}$ и $\nu = 0,38$ из [5]. По контуру задано шарнирно-неподвижное опирание; допускаемая стрела прогиба $w^+ = 15 \text{ мм}$.

1. Пластина подвергается воздействию сосредоточенной силой $P = 1 \text{ Н}$ в центре, что дает максимальный прогиб $w = 1,49 \text{ м}$, что почти в 100 раз больше допускаемого прогиба w^+ . Изгибающие моменты: $M_x^{\max} = M_y^{\max} = 0,953 \text{ Нм/м}$. Максимальный крутящий момент в углах пластины составил $H_{xy}^{\max} = 0,053 \text{ Нм/м}$. Наибольшие напряжения получились следующими: $\sigma_x^{\max} = 22,88 \text{ МПа}$; $\sigma_y^{\max} = 22,88 \text{ МПа}$, $\tau_{xy}^{\max} = 1,28 \text{ МПа}$. Решения (эпюры) приведены на рис. 1.

2. Добавим к сосредоточенной силе P мембранные растягивающие усилия $N_x = N_y = 40 \text{ Н/м}$. В этом случае *максимальный прогиб уменьшился* до значения $w = 14,37 \text{ мм}$, что отвечает значению допускаемого прогиба $w^+ = 15 \text{ мм}$.

Эпюры прогибов, эпюры изгибающего и крутящего моментов приведены на рис. 2.

Причем $M_x^{\max} = M_y^{\max} = 0,0915 \text{ Нм/м}$, $H_{xy}^{\max} = 0,0915 \text{ Нм/м}$.

Напряжения на порядок уменьшились и стали равными: $\sigma_x^{\max} = \sigma_y^{\max} = 2,28 \text{ МПа}$, $\tau_{xy}^{\max} = 0,0712 \text{ МПа}$. Эпюры покажем на рис. 2.

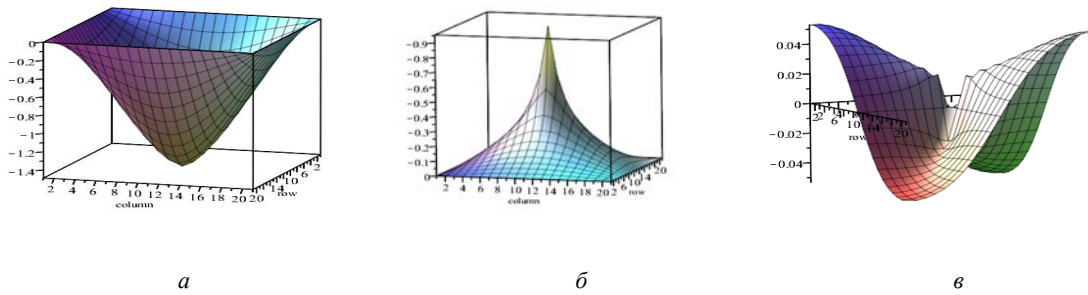


Рис. 1. Эпюры от действия сосредоточенной силы: а – прогиб w ; б – изгибающий момент M_x ; в – крутящий момент H_{xy}

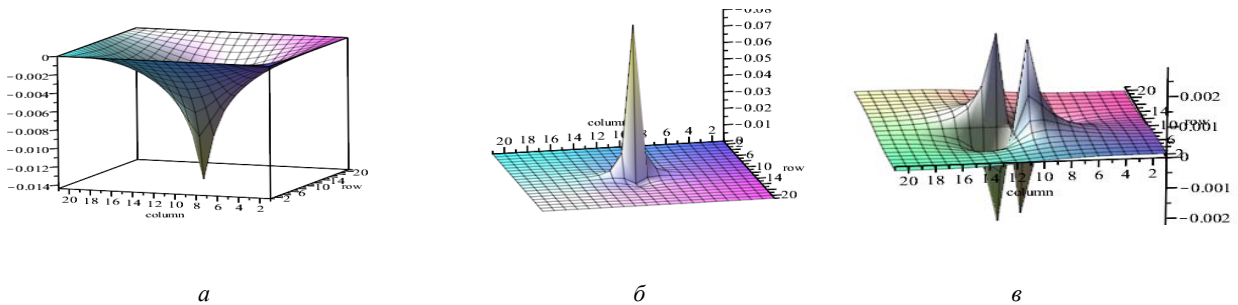


Рис. 2. Эпюры от действия сосредоточенной силы и растяжения по обеим сторонам пластины: а – прогиб w ; б – изгибающий момент M_x ; в – крутящий момент H_{xy}

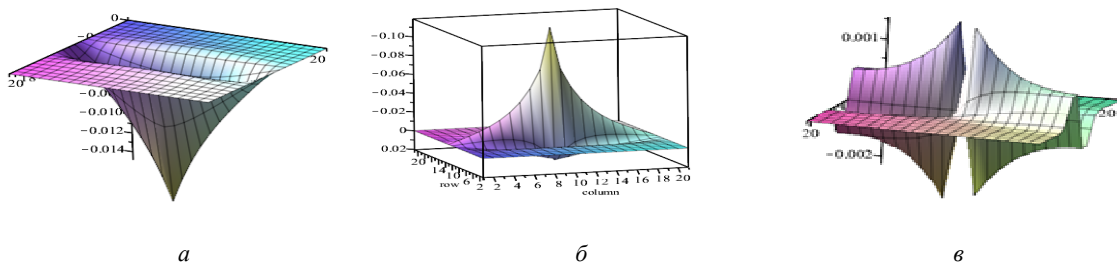


Рис. 3. Эпюры от действия сосредоточенной силы и растяжения по двум противоположным сторонам пластины: а – прогиб w ; б – изгибающий момент M_x ; в – крутящий момент H_{xy}

Технологически организовать растяжение полотна одновременно с обеих сторон сложно, поэтому рассмотрим растяжение полотна только с двух противоположных сторон силами N_x . Для того, чтобы достичь прогиба порядка 15 мм, подберем значение N_x . Сила оказалась равной $N_x = 160 \text{ Н/м}$. При этом значении максимальный прогиб равен $w = 14,8 \text{ мм}$, а начальное напряжение в полотне $\sigma_x^0 = 0,32 \text{ МПа}$, $\sigma_y^0 = 0$.

Наибольшие напряжения здесь равны: $\sigma_x^{\max} = 3,17 \text{ МПа}$, $\sigma_y^{\max} = 1,99 \text{ МПа}$, $\tau_{xy}^{\max} = 0,052 \text{ МПа}$. По сравнению с растяжением полотна по обеим сторонам, в этом расчете напряжение σ_x^{\max} увеличилось, а напряжение σ_y^{\max} – уменьшилось

Библиографические ссылки

1. Папкович П. Ф. Строительная механика корабля. Часть II. Сложный изгиб, устойчивость стержней и устойчивость пластин. Л. : СУДПРОМГИЗ, 1941. 960 с.
2. Тимошенко С. П. Устойчивость упругих систем. М.–Л. : ОГИЗ-Гостехиздат, 1946, с. 532.
3. Лукасевич С. Локальные нагрузки в пластинах и оболочках. М. : Мир, 1982. 544 с.

4. Тимошенко С. П., Юнг Д. Инженерная механика. М. : Mashgiz, 1960. 508 с.

5. Morozov E. V., Lopatin A. V. Analysis and design of the flexible composite membrane stretched on the spacecraft solar array frame // Composite Structures. 94. 2012. P. 3106–3114.

References

1. Papkovich P. F. Stroitel'naya mekhanika korablya. CHast' II. Slozhnyj izgib, ustojchivost' stержnej i ustojchivost' plastin. Leningrad : SUDPROMGIZ, 1941. 960 p.
2. Timoshenko S.P. Ustojchivost' uprugih sistem. M. – L. : OGIZ Gostekhizdat, 1946. P. 532.
3. Lukasevich S. Lokal'nye nagruzki v plastinah i obolochkah. – Moskva, Mir, 1982. 544 p.
4. Timoshenko S. P., Yung D. Inzhenernaya mekhanika. M. : Mashgiz, 1960. 508 p.
5. Morozov E. V., Lopatin A. V. Analysis and design of the flexible composite membrane stretched on the spacecraft solar array frame // Composite Structures. 94. 2012. P. 3106–3114.

© Сабиров Р. А., 2020

ПРОЧНОСТЬ И ЖЕСТКОСТЬ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ СЛОЖНОМ ИЗГИБЕ ОТ ОРИЕНТАЦИИ ВОЛОКНА КОМПОЗИТА

Р. А. Сабиров

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

Подобран максимально возможный порядок мембранных сил натяжения тонкой ортотропной пластины при одновременном воздействии с локальной поперечной силой, обеспечивающий условиям прочности и жесткости конструкции пластины солнечной батареи, имеющей шарнирно-неподвижное опирание по контуру.

Ключевые слова: продольно-поперечный изгиб пластины, напряжения, деформации.

STRENGTH AND RIGIDITY OF A RECTANGULAR PLATE WITH COMPLEX FLEXION FROM THE ORIENTATION OF THE FIBER OF THE COMPOSITE

R. A. Sabirov

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

The maximum possible order of membrane tensile forces of a thin orthotropic plate was selected with simultaneous action with a local shear force, which provides the conditions for the strength and rigidity of the solar battery plate structure, which has a hinged-fixed support along the contour.

Keywords: longitudinal-transverse bending of the plate, stresses, deformations.

В космической технике применяются прямоугольные гибкие ортотропные пластины, которые крепятся к ребрам и предварительно растягиваются с помощью сил в плоскости. Под термином сложный изгиб понимается продольно-поперечный изгиб пластины. В качестве поперечной нагрузки действует локальная сила. По контуру задано шарнирно-неподвижное опирание. Исследовано напряженно-деформированное состояние от поперечной сосредоточенной силы и от приложенных растягивающих мембранных сил по контуру. Подобран максимально возможный порядок мембранных сил натяжения, уменьшающих напряжения от изгиба локальной нагрузкой, с целью обеспечения условиям прочности и жесткости конструкции пластины.

В качестве модели деформирования пластины, сочетающую изгиб с растяжением, принято дифференциальное уравнение равновесия С. П. Тимошенко [1] и геометрически-нелинейные уравнения для пластин [2–3]. Физические соотношения выписаны для тела, обладающего ортогонально-анизотропными свойствами [4]. Формулировка задачи дифференциальная. Аппроксимация разрешающих дифференциальных уравнений принята конечно-разностной [5]. Выполнены расчеты по самостоятельно составленной программе в системе Maple.

Рассмотрена пластина размерами в плане (1 м × 0,8 м) из однонаправленного углепластика [6] Торнел-300, толщиной $h = 2$ мм. Прочность этого материала

(рис. 1) вдоль волокон составляет $\sigma_1^+ = 1400$ МПа и поперек волокон $-\sigma_2^+ = 34,5$ МПа; прочность при сдвиге $\tau_{12} = 74$ МПа. Модуль упругости при растяжении вдоль волокон равен $E_1 = 142,8$ ГПа, а модуль упругости при растяжении поперек волокон ниже, и равен $E_2 = 9,13$ ГПа; коэффициенты Пуассона: $\nu_{21} = 0,32$, $\nu_{12} = 0,02$. Модуль сдвига $G_{12} = 5,49$ ГПа. Условия прочности композита в его главных направлениях продублированы на рис. 1; допустимый прогиб пластины не должен превышать $w^+ = 5$ мм.

На рис. 2 покажем пластину, волокна композита которой направлены: вдоль длинной стороны (рис. 2, а) и вдоль ее короткой стороны (рис. 2, б); действует сила P . Там же показаны результаты вычисления прогибов и напряжений в сравнении с соответствующими нормативными значениями. При расположении волокон композита вдоль короткой стороны пластины прогибы на 56 % получаются меньшими, чем при расположении волокон вдоль ее длинной стороны. Нормальные напряжения в обоих случаях больше нормативных.

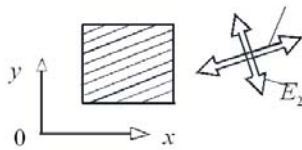
Выполнены расчеты для обоих вариантов расположения волокон при совместном действии силы P и растяжения мембранными силами. На рис. 3 приведем результаты расчетов для двух ориентаций волокон однонаправленного углепластика в рамке прямо-

угольника пластины: волокна параллельны длинной стороне пластины (рис. 3, а) и волокна параллельны короткой стороне пластины – (рис. 3, б). Символом w_{\max} обозначен максимальный прогиб под силой P . Напряжения $\sigma_x^0 = N_x / h$ и $\sigma_y^0 = N_y / h$ обозначают начальные напряжения от растяжений. По формулам $\sigma_x^{\max} = M_x / h^2 + \sigma_x^0$, $\sigma_y^{\max} = M_y / h^2 + \sigma_y^0$, $\tau_{xy} = H_{xy} / h^2$ вычислены максимальные напряжения.

Расчеты пластины, в которой волокна композита располагаются вдоль ее длинной стороны показали,

что требуемые характеристики жесткости и прочности могут быть обеспечены предварительным натяжением $N_x = 10^6 \text{ Н/м}$. При этом напряжение, действующее поперек волокон, уменьшается от 474,6 МПа (рис. 2, а) до 31,9 МПа (рис. 3, а). Нагружение пластины, волокна которой расположены по короткой стороне, силами $N_y = 10^6 \text{ Н/м}$, уменьшает напряжение σ_x^{\max} , от 1834,5 МПа (рис. 2, б) до 29,86 МПа (рис. 3, б).

Эпюры изгибающих моментов приведем на рис. 4.



$\sigma_1^+ = 1400 \text{ МПа}$	$E_1 = 142,8 \text{ ГПа}$
$\sigma_2^+ = 34,5 \text{ МПа}$	$E_2 = 9,13 \text{ ГПа}$
$\tau_{12}^+ = 74 \text{ МПа}$	$G_{12} = 5,49 \text{ ГПа}$

Рис. 1. Ориентация композита в глобальной системе координат пластины (θ_{xy}) и прочностные параметры с характеристиками жесткости в направлении собственных осей анизотропии $O12$ материала.

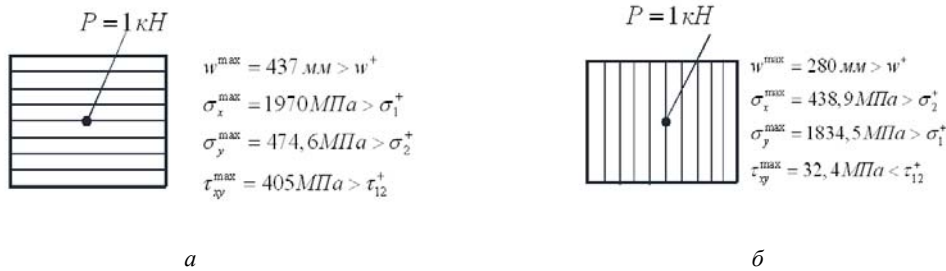


Рис. 2. Пластина, на которую действует только сила P :
 а – волокна композита направлены вдоль длинной стороны;
 б – волокна композита направлены вдоль короткой стороны.

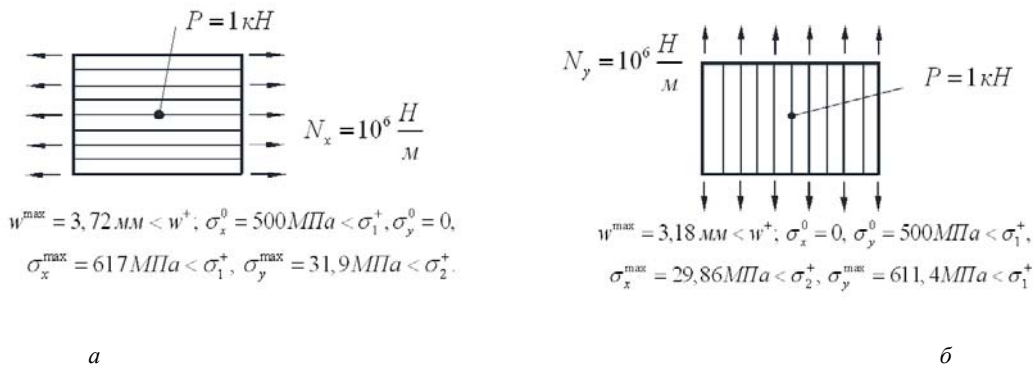


Рис. 3. Ориентации однонаправленного композита в прямоугольном контуре пластины, удовлетворяющие условиям прочности композита и жесткости пластины:
 а – волокна направлены вдоль длинной стороны пластины;
 б – волокна направлены вдоль короткой стороны пластины.

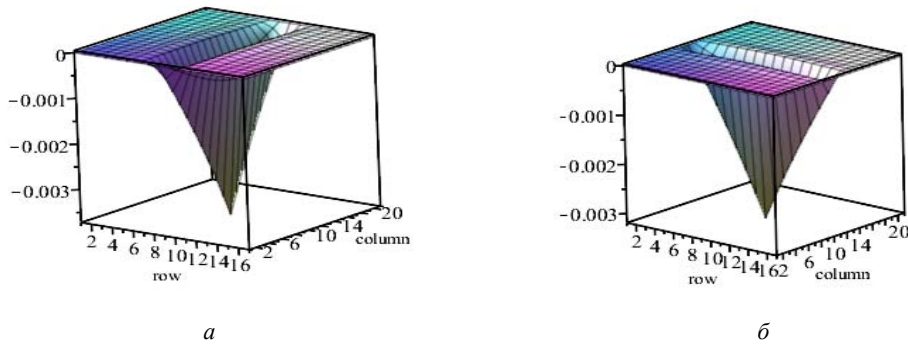


Рис. 4. Эпюры изгибающих моментов:
 a – эпюра M_x в пластинке с волокнами, направленными вдоль ее длинной стороны; b – эпюра M_y в пластинке с волокнами, направленными вдоль ее короткой стороны

Библиографические ссылки

1. Тимошенко С. П. Устойчивость упругих систем. М.–Л. : ОГИЗ-Гостехиздат, 1946. С. 532.
2. Новожилов В.В. Основы нелинейной теории упругости. Л.-М. : ОГИЗ. Гостехиздат, 1948. 212 с.
3. Папкович П.Ф. Строительная механика корабля. Часть II. Сложный изгиб, устойчивость стержней и устойчивость пластин. Л. : СУДПРОМГИЗ, 1941. 960 с.
4. Лехницкий С. Г. Теория упругости анизотропного тела. М. : Наука, 1977. 416 с.
5. Самарский А. А. Теория разностных схем. М. : Наука, 1977. 656 с.
6. Композиционные материалы : справочник / В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин и др. М. : Машиностроение, 1990. 512 с.

References

1. Timoshenko S. P. Ustojchivost' uprugih sistem. M. : OGIZ Gostekhizdat, 1946. P. 532.
2. Novozhilov V. V. Osnovy nelinejnoj teorii uprugosti. L.–M. : OGIZ. Gostekhizdat 1948.212 p.
3. Papkovich P. F. Stroitel'naya mekhanika korablya. CHast' II. Slozhnyj izgib, ustojchivost' stержnej i ustojchivost' plastin. L. : SUDPROMGIZ, 1941. 960 p.
4. Lekhnickij S. G. Teoriya uprgosti anizotropnogo tela. M. : Nauka, 1977. 416 p.
5. Samarskij A. A. Teoriya raznostnyh skhem. M. : Nauka, 1977. 656 p.
6. Kompozicionnye materialy: Spravochnik / V. V. Vasil'ev, V. D. Protasov, V. V. Bolotin i dr. M. : Mashinostroenie, 1990. 512 p.

© Сабиров Р. А., 2020

О ПОСТРОЕНИИ ЛИНИЙ РАЗРЫВА НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ КРУЧЕНИИ СТЕРЖНЕЙ

И. Л. Савостьянова*, В. С. Сенашов

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

*E-mail: ruppa@inbox.ru

В работе приведена задача о построении линий разрыва напряжений при пластическом кручении стержня сведена к известной задаче о разрывах скоростей для задачи Коши уравнения Хопфа.

Ключевые слова: разрывы напряжений, кручение стержней.

ON THE CONSTRUCTION OF STRESS DISCONTINUITY LINES DURING PLASTIC TORSION OF RODS

I. L. Savostyanova, V. S. Senashov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: ruppa@inbox.ru

The problem of constructing stress discontinuity lines under plastic torsion of a rod is reduced to the well-known problem of velocity discontinuities for the Cauchy problem of the Hopf equation.

Keywords: discontinuities of stresses, torsion of rods.

В литературе хорошо разработана методика построения линий разрыва для задачи Коши в случае уравнения Хопфа [1–4]:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + w \frac{\partial w}{\partial x} = 0, \quad w|_{x=0} = \phi(y), \quad (1)$$

где w – компонента вектора скорости вдоль оси x .

Менее разработан способ построения линий разрыва напряжений в задаче о пластическом кручении прямолинейных стержней [5]. Рассмотрим постановку такой задачи. Необходимо найти линии разрыва для уравнения

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right)^2 = 1, \quad \Phi|_C = 0, \quad (2)$$

где Φ – функция напряжения; C – многоугольный контур поперечного сечения стержня.

В работе показано, что задача (2) может быть сведена к задаче (1) и тем самым предложен способ построения линий разрыва для пластического кручения стержней.

Библиографические ссылки

1. Полянин А. Д., Зайцев В. Ф., Журов А. И. Методы решения нелинейных уравнений математической физики и механики. М.: Физматлит, 2005.
2. Сенашов С. И., Кондрин А. В. Разработка информационной системы для нахождения упругопластической границы стержней прокатного профиля // Вестник СибГАУ. 2014. № 4(56). С. 119–125.
3. Сенашов С. И., Черепанова О. Н., Кондрин А. В. Об упругопластическом кручении стержня // Вестник СибГАУ. 2013. № 3(49). С. 100–103.

4. Сенашов С. И., Черепанова О. Н., Кондрин А. В. Elastoplastic Torsion of a Rod with MultiplyConnected Cross-Section // J. Siberian Federal Univ. Math. & Physics. 2015. № 7(1). P. 343–351.

5. Предельное состояние деформируемых тел и горных пород / Д. Д. Ивлев, Л. А. Максимова, Р. И. Непершин и др. М.: Физматлит, 2008.

References

1. Polyanin A.D., Zaitsev V. F., Zhurov A. I. *Metody resheniya nelineynykh uravnenij matematicheskoj fiziki i mekhaniki* [Methods for solving nonlinear equations of mathematical physics and mechanics]. Moscow, Fizmatlit, 2005.
2. Senashov S. I., Kondrin A. V. Development of an information system for finding the elastic-plastic boundary of rolling profile rods // *Vestnik SibGAU*. 2014. № 4(56). P. 119–125.
3. Senashov S. I., Cherepanova O. N., Kondrin A. V. About elastic-plastic torsion of a rod // *Vestnik SibGAU*. 2013. № 3(49). P. 100–103.
4. Senashov S. I., Cherepanova O. N., Kondrin A. V. Elastoplastic Torsion of a Rod with MultiplyConnected Cross-Section // *J. Siberian Federal Univ. Math. & Physics*. 2015. № 7(1). P. 343–351.
5. *Predel'noe sostoyanie deformiruemyyh tel i gornyyh porod* [Limit state of deformable bodies and rocks] / D. D. Ivlev, L. A. Maksimova, R. I. Nepershin et al. M.: Fizmatlit, 2008.

© Савостьянова И. Л., Сенашов В. С., 2020

О ПОСТРОЕНИИ ТРЕХМЕРНЫХ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ ИДЕАЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ

С. И. Сенашов*, И. Л. Савостьянова

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

*E-mail: sen@sibsau.ru

В работе обсуждаются известные трехмерные решения, описывающие пластическое состояние идеальной среды. Корректируется задача Б. Д. Аннина о построении таких решений на основе знания группы непрерывных преобразований, допускаемой системой. Приведена система уравнений пластичности, решение которой может привести к принципиально новым интересным решениям.

Ключевые слова: трехмерные решения, идеальная пластичность.

ON THE CONSTRUCTION OF THREE-DIMENSIONAL SOLUTIONS OF IDEAL PLASTICITY EQUATIONS

S. I. Senashov*, I. L. Savostyanova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: sen@sibsau.ru

Known three-dimensional solutions describing the plastic state of an ideal medium are discussed. B. D. Annin's problem of constructing such solutions based on knowledge of the group of continuous transformations allowed by the system is corrected. A system of plasticity equations is presented, the solution of which can lead to fundamentally new interesting solutions.

Keywords: three-dimensional solutions, ideal plasticity.

Из литературы известно, что трехмерные решения стационарных уравнений пластичности построены Р. Хиллом [1], В. Прагером [2] и Д. Д. Ивлевым [3; 4]. Об этом сообщалось в обзоре [5]. Позднее решения построил М. А. Задоян [6]. Потом была вычислена алгебра Ли, допускаемая пространственной системой дифференциальных уравнений [7]. На ее основе удалось построить новые классы решений, которые описывали, в частности, спирально – винтовые течения и некоторые другие [7]. После этого стало понятно, что все построенные решения в работах [1–7] не что иное как инвариантные решения, построенные на одномерных подалгебрах. Другими словами в подходящих системах координат это будут решения, в которых три компоненты вектора скорости деформации и давление, зависят только от двух пространственных координат. Тем самым задача Б. Д. Аннина о построении может быть сформулирована так: построении инвариантных решений ранга два стационарных уравнений пластичности.

Заметим, что в последнее время удалось построить новые трехмерные решения этих уравнений [8; 9].

В заключение работы приведем вид частной системы уравнений пластичности, решение которой могут позволить построить решения, не являющиеся инвариантными, и, может быть, дать решению задачи Б. Д. Аннина новую жизнь.

Пусть

$$u = u(y, z), \quad v = v(x, z), \quad w = w(x, y), \quad p = p(x, y, z).$$

Тогда система уравнений в компонентах девиатора тензора напряжений имеет вид

$$\partial_y S_{12} + \partial_z S_{13} = \partial_x p, \quad \partial_x S_{12} + \partial_z S_{23} = \partial_y p,$$

$$\partial_x S_{13} + \partial_y S_{23} = \partial_z p,$$

$$S_{33} = S_{11} = S_{22} = 0, \quad S_{12}^2 + S_{13}^2 + S_{23}^2 = k_s^2,$$

$$2S_{12} = \lambda(\partial_x v + \partial_y u), \quad 2S_{13} = \lambda(\partial_x w + \partial_z u),$$

$$2S_{23} = \lambda(\partial_y w + \partial_z v).$$

Здесь S_{ij} – компоненты девиатора тензора напряжений, u, v, w – компоненты вектора скорости деформаций, λ – неотрицательная функция, k_s – постоянная пластичности, p – гидростатическое давление.

Эта система обладает рядом замечательных свойств и может быть использована для описания пластического кручения вокруг трех ортогональных осей. Она описывает предельное состояние пластической среды, т. е. ее решение может быть получено только в компонентах тензора напряжений.

Библиографические ссылки

1. Хилл Р. Математическая теория пластичности. М. : ГИТТЛ, 1956.

2. Прагер В. Трехмерное пластическое течение при однородном напряженном состоянии. *Механика // Сб. переводов и обзоров иностр. литературы.* 1958. № 3. С. 23–27.

3. Предельное состояние деформируемых тел и горных пород / Д. Д. Ивлев, Л. А. Максимова, Р. И. Непершин и др. М. : Физматлит, 2008.

4. Ивлев Д. Д. Теория идеальной пластичности. М. : Наука, 1966.

5. Ольшак В., Мруз З., Пежина П. Современное состояние теории пластичности. М. : Мир, 1964.

6. Задоян М. А. Пространственные задачи теории пластичности. М. : Наука, 1992.

7. Аннин Б. Д., Бытев В. О., Сенашов С. И. Групповые свойства уравнений упругости и пластичности. Новосибирск : Наука, 1983.

8. Сенашов С. И., Савостьянова И. Л. Новые трехмерные пластические течения, соответствующие однородному напряженному состоянию // *Сиб. журн. индуст. матем.* 2019. № 22:3. С. 114–117.

9. Сенашов С. И., Черепанова О. Н. Новые классы решений уравнения минимальных поверхностей // *J. Sib. Fed. Univ., Math. & Phys.* 2010. № 3(2). P. 248–255.

References

1. Hill R. *Matematicheskaya teoriya plastichnosti* [Mathematical theory of plasticity]. М. : GTTL, 1956.

2. Prager V. Three-Dimensional plastic flow at a uniform stress state. *Mekhanika. Sb. perevodov i obzorov inostr. Literatury.* 1958. № 3. P. 23–27.

3. Ivlev D. D., Maksimova L. A., Nepershin R. And etc. *Predel'noe sostoyanie deformiruemyyh tel i gornyyh porod* [Limit state of deformable bodies and rocks]. М. : Fizmatlit, 2008.

4. Ivlev D. D. *Teoriya ideal'noj plastichnosti* [Theory of ideal plasticity]. М. : Nauka, 1966.

5. Olshak V., Mruz Z., Pezhina P. *Sovremennoe sostoyanie teorii plastichnosti* [Modern state of plasticity theory]. М. : Mir, 1964.

6. Zadoyan M. A. *Prostranstvennyye zadachi teorii plastichnosti* [Spatial problems of plasticity theory]. М. : Nauka, 1992.

7. Annin B. D., Bytev V. O., Senashov S. I. Group properties of elasticity and plasticity equations. Novosibirsk : Nauka, 1983.

8. Senashov S. I., Savostyanova I. L. New three-dimensional plastic flows corresponding to a homogeneous stress state // *Sib. zhurn. indust. matem.* 2019. № 22:3. P. 114–117.

9. Senashov S. I., Cherepanova O. N. New classes of solutions to the equation of minimal surfaces. // *J. Sib. Fed. Univ., Math. & Phys.* 2010. № 3(2). P. 248–255.

© Сенашов С. И., Савостьянова И. Л., 2020

О НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ ПЛАСТИЧЕСКИ УПРОЧНЯЕМЫХ ПЛИТ

С. И. Сенашов, Е. В. Филюшина

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

В статье построены решения, описывающие сжатие пластически упрочняемой плиты жесткими и шероховатыми плитами.

Ключевые слова: сжатие, плиты, упругопластические деформации.

ABOUT THE STRESS-DEFORMED STATE OF PLASTICLY STRENGTHENED PLATES

S. I. Senashov, E. V. Filyushina

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

The article provides solutions describing the compression of a plastically hardened plate by rigid and rough plates.

Keywords: compression, plates, elastoplastic deformations.

Рассмотрены уравнения, описывающие упруго-пластические деформации тел в прямоугольных координатах $x = x_1, y = x_2, z = x_3$

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0, \quad 2\varepsilon_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i},$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

где σ_{ij} -компоненты тензора напряжений, ε_{ij} -компоненты тензора деформации, по повторяющимся индексам проводится суммирование. Закон упрочнения имеет вид

$$\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma = 2f(\varepsilon_0) \varepsilon_{ij},$$

$$\varepsilon_0 = \sqrt{\frac{2}{3}((\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2 + 6(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{23}^2 + \varepsilon_{13}^2))},$$

$$\sigma = 1/3\sigma_{ii}, \quad (2)$$

где $f(\varepsilon_0)$ - положительная, выпуклая вверх функция, определяемая, как правило, экспериментально [1–4].

Ищем решение этих уравнений в виде

$$u_1 = ax, u_2 = ay, u_3 = -2az + \psi(x, y), \sigma = \sigma(x, y). \quad (3)$$

Подставляя (3) в уравнения (1),(2) получаем

$$a \frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\partial \sigma}{\partial x}, \quad a \frac{\partial f}{\partial y} = \frac{\partial \sigma}{\partial y},$$

$$\frac{\partial(f\psi)}{\partial x} + \frac{\partial(f\psi)}{\partial y} = 0. \quad (4)$$

Если $f(\varepsilon_0) = C(\sqrt{\varepsilon_0})^{-1}$, где C – положительная постоянная, то последнее уравнение превращается в уравнение минимальных поверхностей, которое хорошо изучено [1].

Если $f(\varepsilon_0) = C\varepsilon_0^{m-1}$, где C – положительная постоянная, $0 < m < 1$, и $\psi = \psi(x)$, то уравнения (4) сводятся к обыкновенным дифференциальным уравнениями, которые решаются квадратурами.

Построенные решения можно использовать для описания напряженно – деформированного состояния упрочняющихся плит, которые сжимаются жесткими шероховатыми плитами, сближающимися с постоянной скоростью.

Библиографические ссылки

1. Предельное состояние деформируемых тел и горных пород / Д. Д. Ивлев, Л. А. Максимова, Р. И. Непершин и др. М. : Физматлит, 2008.
2. Задоян М. А. Пространственные задачи теории пластичности. М. : Наука, 1992.
3. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. М. : Наука, 1969.
4. Аннин Б. Д., Бытев В. О., Сенашов С. И. Групповые свойства уравнений упругости и пластичности. Новосибирск : Наука, 1983.
5. Сенашов С. И., Черепанова О. Н. Новые классы решений уравнения минимальных поверхностей // J. Sib. Fed. Univ., Math. & Phys. 2010. № 3(2). P. 248–255.

References

1. *Predel'noe sostojanie deformirovannyh tel i gornyh porod* [Limiting state of deformed bodies and rocks] / D. D. Ivlev, L. A. Maksimova, R. A. Nepershin et al. M. : Fizmatlit, 2008.
2. Zadojan M. A. *Prostranstvennye zadachi teorii plastichnosti* [Spatial problems of the theory of plasticity]. M. : Nauka, 1992.
3. Kachanov L.M. *Osnovy teorii plastichnosti* [Fundamentals of the theory of plasticity]. M. : Nauka, 1969.
4. Annin B. D., Bytev V. O., Senashov S. I. *Grupповые свойства уравнений упругости и пластичности* [Group properties of the equations of elasticity and plasticity]. Novosibirsk : Nauka, 1983.
5. Senashov S. I., Cherepanova O. N. [New classes of solutions to the equation of minimal surfaces] // *J. Sib. Fed. Univ., Math. & Phys.* 2010. № 3 (2). P. 248–255 (In Russ.).

© Сенашов С. И., Филюшина Е. В., 2020

ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ В ОКРЕСТНОСТИ ОСОБЫХ ТОЧЕК ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, ДЕЙСТВУЮЩЕГО НА ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ*

И. В. Смолехо, И. В. Киреев

Институт вычислительного моделирования СО РАН
 Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44
 E-mail: ismol@icm.krasn.ru, kiv@icm.krasn.ru

В работе проводится анализ влияния особенностей электрического поля при воздействии на жидкий кристалл, которые возникают в концевых точках пластин конденсатора из-за резкой смены граничных условий в этих точках.

Ключевые слова: жидкий кристалл, динамика, электрический потенциал, особенности электрического поля, уравнение Лапласа.

EXACT SOLUTION IN THE NEIGHBORHOOD OF SINGULAR POINTS OF THE ELECTRIC FIELD ACTING ON A LIQUID CRYSTAL

I. V. Smolekho, I. V. Kireev

Institute of Computational Modeling SB RAS
 50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
 E-mail: ismol@icm.krasn.ru, kiv@icm.krasn.ru

In this paper it is analysed the influence of the electric field singularities arising at the ends of the capacitor plates due to a sharp change in the boundary conditions there.

Keywords: liquid crystal, dynamics, electric potential, electric field singularities, Laplace equation.

Наука о жидких кристаллах, являясь одной из самых молодых и сложных областей физики, в последние годы нашла широкое применение в промышленности и технике. Основные свойства описаны, например, в [1]. Математическая модель, позволяющая прогнозировать поведение жидких кристаллов под действием электрического поля, предложена в [2]: рассматривается протяжённый в горизонтальном направлении слой D жидкого кристалла малой толщины под действием периодического электрического поля, создаваемого зарядами на пластинах-обкладках конденсатора (см. рисунок). Во внешней части слоя потенциал электрического поля удовлетворяет уравнению Лапласа $\Delta \varphi = 0$. Внутри D выполняется уравнение, учитывающее анизотропию среды $\nabla \cdot (\varepsilon \cdot \nabla \varphi) = 0$, где ε – симметричный тензор диэлектрической проницаемости жидкого кристалла.

Считается, что известна разность потенциалов на пластинах, а на остальных частях границы выполнены условия непрерывности электрического потенциала (между диэлектриком и воздухом) и нормальной составляющей вектора электрической индукции:

– для верхней пластины
$$\frac{\partial \varphi^+}{\partial x_2} = \varepsilon_{12} \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} + \varepsilon_{22} \frac{\partial \varphi}{\partial x_2}$$

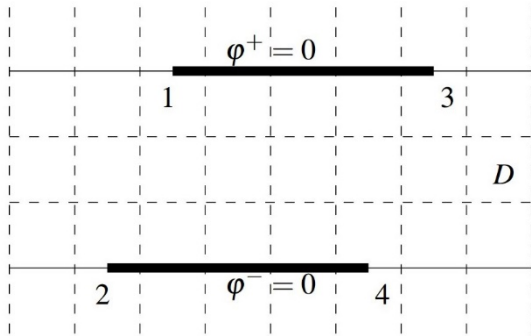
– для нижней пластины
$$\frac{\partial \varphi^-}{\partial x_2} = \varepsilon_{12} \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} + \varepsilon_{22} \frac{\partial \varphi}{\partial x_2}.$$

Для вычисления потенциала φ в [2] применялся вариационно-разностный подход. Численные расчёты показали, что из-за наличия у функции $\varphi(x_1, x_2)$ особых точек (см. рисунок), простые вычислительные схемы не приводят к удовлетворительным результатам. В данной работе проводится анализ особенностей электрического поля, возникающих на концах пластин конденсатора из-за резкой смены граничных условий в этих точках.

Решение считаем периодическим по x_1 , участок периодичности изображён на см. рисунок, на котором находятся 4 особые точки. Построим решение в окрестности первой из них.

Решение получаем методом разделения переменных в полярных координатах с полюсом в исследуемой особенности. Тогда на верхней пластине должно быть $\varphi^+ = r^\alpha \sin(\alpha\theta)$, где α – пока неизвестная постоянная, $0 < \theta < \pi$. В жидкокристаллическом слое анизотропное уравнение заменой независимых переменных $z_1 = (\varepsilon_{11}\varepsilon_{22} - \varepsilon_{12}^2)^{1/2} x_1$, $z_2 = -\varepsilon_{12}x_1 + \varepsilon_{11}x_2$, сведём к уравнению Лапласа в координатах z_1 и z_2 .

*Работа поддержана Красноярским математическим центром, финансируемым Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (Соглашение 075-02-2020-1631).



Слой жидкого кристалла:
точки 1, 2, 3, 4 – особенности электрического поля

С учётом перехода от координат z_1 и z_2 к координатам x_1 и x_2 , частное решение в слое должно выглядеть следующим образом:

$$\varphi = r^\alpha f(\theta),$$

$$f(\theta) = (\varepsilon_{11}\varepsilon_{22} \cos^2\theta - \varepsilon_{11}\varepsilon_{12} \sin 2\theta + \varepsilon_{11}^2 \sin^2\theta)^{\alpha/2} \times [C_1 \cos \alpha \xi(\theta) + C_2 \sin \alpha \xi(\theta)],$$

где C_1 и C_2 – некоторые постоянные, $\xi(\theta) = \arctg(z_2/z_1)$.

Неизвестные константы находятся из условий склейки решений:

$$\begin{aligned} \varphi(2\pi) &= 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow r^\alpha (\varepsilon_{11}\varepsilon_{22})^{\alpha/2} [C_1 \cos \alpha \xi(2\pi) + C_2 \sin \alpha \xi(2\pi)] &= 0; \\ \varphi(\pi) &= \varphi^+(\pi) \Rightarrow \\ \Rightarrow r^\alpha (\varepsilon_{11}\varepsilon_{22})^{\alpha/2} [C_1 \cos \alpha \xi(\pi) + C_2 \sin \alpha \xi(\pi)] &= r^\alpha \sin \alpha \pi; \end{aligned} \quad (1)$$

из которых следует, что $\sin \alpha \pi = 0$. Тогда полагаем $\alpha = 1$, т. к. другие значения приведут к ограниченным не особым решениям.

Условие непрерывности должно выполняться и при $\theta = \pi$. Поэтому

$$\varepsilon_{11}^2 \varepsilon_{22} \sqrt{1 - \frac{\varepsilon_{12}^2}{\varepsilon_{11}\varepsilon_{22}}} [C_1 \sin \xi(\pi) - C_2 \cos \xi(\pi)] = \varepsilon_{12}^2,$$

а константы C_1 и C_2 получаются из условий (1) и (2):

$$C_1 = \frac{\varepsilon_{12}^2 \sin \xi(\pi)}{\varepsilon_{11}(\varepsilon_{11}\varepsilon_{22})^{1/2} (\varepsilon_{11}\varepsilon_{22} - \varepsilon_{12}^2)^{1/2}},$$

$$C_2 = \frac{-\varepsilon_{12}^2 \cos \xi(\pi)}{\varepsilon_{11}(\varepsilon_{11}\varepsilon_{22})^{1/2} (\varepsilon_{11}\varepsilon_{22} - \varepsilon_{12}^2)^{1/2}}$$

Для малых окрестностей других особых точек решение может быть получено аналогично. Построенные решения дают возможность усовершенствовать численное решение задачи, позволяющей исследовать поведение жидкого кристалла под действием электрического поля. Разработан алгоритм для уточнения объемных сил и моментов, обусловленных воздействием электрического поля. Вначале краевая задача решается сквозным вычислительным методом без выделения особенностей [3]. После этого в окрестности каждой особой точки жидкокристаллического слоя выделяется небольшой прямоугольник, внутри которого решение совпадает с построенным аналитическим приближением. Распределение электрического потенциала в каждом прямоугольнике определяется с помощью условий склейки решений на границах квадрата, которые содержат достаточно большое количество узлов (вычисления производятся на достаточно малой сетке). На последней стадии алгоритма значения объёмных сил и моментов определяются в выбранном прямоугольнике на достаточно мелкой вспомогательной сетке с помощью конечных разностей. С помощью процедуры усреднения, уточнённые силы и моменты пересчитываются в ячейках более крупной сетки, на которой решаются уравнения динамики жидкого кристалла.

References

1. Blinov L. M. Structure and Properties of Liquid Crystals. Heidelberg – New York – Dordrecht – London : Springer, 2011. 439 p.
2. Sadovskii V. M., Sadovskaya O. V., Smolekko I. V. Parallel implementation of the algorithm describing the behavior of liquid crystals under the action of electric field // *AIP Conf. Proc.* 2018. Vol. 2025. P. 070005.
3. Sadovskii V. M., Sadovskaya O. V., Smolekko I. V. Numerical modeling of the dynamic processes in liquid crystals under the action of thermomechanical and electrostatic perturbations // *AIP Conf. Proc.* 2019. Vol. 2164. P. 090006.

© Смолехо И. В., Киреев И. В., 2020

О ГРУППОВЫХ СВОЙСТВАХ УРАВНЕНИЯ НЕОДНОРОДНОЙ АКУСТИКИ

Ю. В. Шанько

Институт вычислительного моделирования СО РАН
 Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44
 E-mail: shy70@mail.ru

Рассматриваются групповые свойства для одного класса линейных уравнений в частных производных. Эти уравнения связаны с двумерным уравнением неоднородной акустики.

Ключевые слова: уравнение неоднородной акустики, групповой анализ дифференциальных уравнений.

ON GROUP PROPERTIES OF THE INHOMOGENEOUS ACOUSTICS EQUATION

Yu. V. Shan'ko

Institute of Computational Modeling SB RAS
 50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
 E-mail: shy70@mail.ru

The paper considers group properties for one class of linear partial differential equations. These equations are related to the two-dimensional equation of inhomogeneous acoustics.

Keywords: inhomogeneous acoustics equation, group analysis of differential equations.

В работе исследуются групповые свойства [1] для некоторых уравнений вида

$$u_{tt} = c^2(x, y)(u_{xx} + u_{yy} - s(x, y)u), \quad (1)$$

к которым сводится двумерное уравнения распространения звука в неподвижной неоднородной среде [2]:

$$\frac{p_{tt}}{\rho c^2} = \left(\frac{p_x}{\rho} \right)_x + \left(\frac{p_y}{\rho} \right)_y.$$

Здесь давление p зависит от времени t и декартовых координат x и y . Плотность $\rho = \rho(x, y) > 0$ и скорость звука $c = c(x, y) > 0$ считаются заданными.

Задача поиска допускаемых операторов для произвольного уравнения вида (1) является достаточно сложной, поэтому мы ограничимся только теми уравнениями, которые обладают решениями с функциональным произволом [3–6].

Найденные операторы могут быть использованы для построения новых классов точных решений уравнения (1) на основе уже известных решений.

Библиографические ссылки

1. Овсянников Л. В. Групповой анализ дифференциальных уравнений. М. : Наука, 1978.
2. Бреховских Л. М., Годин О. А. Акустика слоистых сред. М. : Наука, 1989.
3. Шанько Ю. В. Обобщенные функционально-инвариантные решения двумерного неоднородного волнового уравнения. // Сиб. журн. индустр. матем. 2013. Т. 16, № 1. С. 126–137.

4. Шанько Ю. В. Обобщенные функционально-инвариантные решения двумерного волнового уравнения неоднородной акустики // Решетневские чтения : материалы XVI Междунар. науч. конф. В 2 ч. Ч. 2 / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2012. С. 553.

5. Шанько Ю. В. О точных решениях с функциональным произволом неоднородного волнового уравнения // Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 2 / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017. С. 33–34.

6. Шанько Ю. В. О решениях с функциональным произволом уравнения неоднородной акустики // Решетневские чтения : Материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 1 / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2019. С. 621–622.

References

1. Ovsyannikov L. V. *Group Analysis of Differential Equations*. M. : Nauka, 1978.
2. Brehovskih L. M., Godin O. A. *Akustika sloistyh sred* [Acoustics of layered media] M. : Nauka, 1989 (In Russ.).
2. Shan'ko Yu. V. *Obobshhennye funkcional'no-invariantnye reshenija dvumernogo neodnorodnogo volnovogo uravnenija* [Generalized functionally invariant solutions of the two-dimensional inhomogeneous wave equation] // Sib. Journ. Industr. Math. Vol. 16, № 1. P. 126–137 (In Russ.).
3. Shan'ko Yu. V. *Obobshhennye funkcional'no-invariantnye reshenija dvumernogo volnovogo uravnenija neodnorodnoj akustiki* [Generalized Functionally Invari-

ant Solutions of 2D Inhomogeneous Acoustic Wave Equation] // *Reshetnevskie chteniya : materialy XVI Mezhdunar. nauch. konf. / Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2012. P. 533 (In Russ.)*.

6. Shan'ko Yu. V. *O tochnykh resheniyakh s funktsional'nyim proizvolom neodnorodnogo volnovogo uravneniya* [Exact solutions with functional arbitrariness of inhomogeneous wave equation] // *Reshetnevskie chteniya Materialy XXI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. / Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2017. Vol. II. P. 33–34 (In Russ.)*.

6. Shan'ko Yu. V. *O resheniyakh s funktsional'nyim proizvolom uravneniya neodnorodnoj akustiki* [On solutions with functional arbitrariness of the inhomogeneous acoustics equation] // *Reshetnevskie chteniya Materialy XXIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Krasnoyarsk, 2019. Vol. I. P. 621–622 (In Russ.)*.

© Шанько Ю. В., 2020



Секция
«ХИМИЯ
И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ»

УДК 544.013; 547-304.1; 662.234.81

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВЛЕНИЯ РЕЦЕПТУР СТАРТОВЫХ СИСТЕМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ СИНТЕЗА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ЭНЕРГОЕМКИХ МАТЕРИАЛОВ

Д. В. Антишин*, Д. В. Василишин, Д. Д. Губин

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

*E-mail: andevl@yandex.ru

Рассмотрены перспективы использования смесей алифатических и ароматических нитрогуанидинов в качестве стартовых систем для высокотемпературного самораспространяющегося синтеза. Приведены основные термохимические уравнения приводящие к получению атомарного углерода, предложены компоненты смеси.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, СВС, атомарный углерод, алифатические и ароматические нитрогуанидины.

PECULIARITIES OF THE COMPOSITION OF STARTING SYSTEMS FOR SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS WHEN USING ORGANIC ENERGY CONSUMING MATERIALS

D. V. Antishin*, D. V. Vasilishin, D. D. Gubin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: andevl@yandex.ru

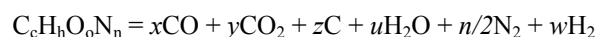
The paper considers the prospects for using mixtures of aliphatic and aromatic nitroguanidines as starting systems for self-propagating high-temperature synthesis. The basic thermochemical equations leading to the production of atomic carbon are given, the components of the mixture are proposed.

Keywords: Self-propagating high-temperature synthesis, SHS, atomic carbon, aliphatic and aromatic nitroguanidines.

Большой интерес к исследованиям в области самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) обусловлен простым и быстрым получением субмикронных неорганических порошков достаточно однородного состава [1–3]. Подробно изучено получение широкого ряда нано порошков методом азидного СВС [4], где в качестве основной энергоемкой добавки используется различные соли азотистой водородной кислоты. В монографии посвященной получению различных оксидов методом СВС уже в качестве энергоемкой добавки применялись наравне с неорганическими солями органические энергоемкие соединения, например 5-аминотетразол, мочевины, нитрогуанидин и др. [4]. Но все они характеризуются отрицательным кислородным балансом, то есть непригодны индивидуально для получения оксидов. Но стоит отметить возможность создания литевых композиций, в чем подход использования органических энергоемких соединений объективно выигрывает.

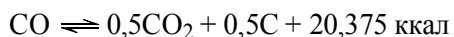
Перспективным является СВС, в котором органические соединения будут выступать не только в качестве энергоемкой добавки, но и в качестве источника одного из компонентов синтеза, например источником углерода в получении карбида кремния, или нанесении на инертную поверхность углеродного слоя.

Для этого остро стоит вопрос подбора рецептур стартовых систем СВС, в которые должны входить органические соединения, содержащие как энергоемкие группы, так и группы при разложении дающие большое количество углерода. Под это описание хорошо подходят замещенные алифатические и ароматические нитрогуанидины, которые легко могут быть получены реакцией нуклеофильного замещения, как из самого нитрогуанидина, так и из других прекурсоров [5]. Разложение любого алифатического или ароматического нитрогуанидина, а так же их смесей можно записать уравнением [6]:

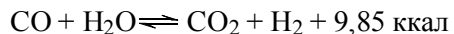


После высвобождения запасенной энергии таких систем в газовой фазе протекают различные обменные реакции между продуктами разложения, в ходе которых может образоваться атомарный углерод. При низком кислородном балансе (особенно избытке углерода как в нашем случае) вместо классических оксидов углерода, водород, азота и воды можно обнаружить метан, синильную кислоту, аммиак. Переход углерода не в твердое состояние, а в газообразные молекулы негативно отобразится на выходе синтезируемых веществ, особенно когда важна стехиометрия,

например при получении карбида кремния. Образование атомарного углерода описывается так называемым уравнением доменного газа:



На которое влияет химическое равновесие уравнения водяного газа:



Так же по принципу Ле-Шателье на уравнение доменного газа будет влиять изменение давления, для увеличения выхода атомарного углерода необходимо повышать давление, что повлечет необоснованное усложнение конструкций реакторов СВС. Поэтому основным фактором, с помощью которого возможно варьирование количества образующегося углерода является температура горения стартовой системы [6]. Но и безгранично понижать температуру так же нельзя в виду появления в продуктах реакции различных летучих ароматических и алифатических аминов, образующихся при разложении только нитрогуанильного фрагмента.

Классически при расчете параметров взрывчатого превращения сначала рассчитывают состав продуктов сгорания, по ним находя выделяющуюся теплоту, переводимую в температуру. В данном случае задача стоит обратная, через температуру ориентируясь на желаемое количество атомарного углерода подобрать соотношение в смеси замещенных нитрогуанидинов.

Таким образом, формирование стартовых систем оптимальными на первый взгляд только ароматическими нитрогуанидинами на практике же оборачивается потерями углерода в виде газообразных углеродных молекул. Оптимальными стартовыми системами для получения поверхностного слоя углерода стали смеси бензилнитрогуанидина с этилнитрогуанидином. Для увеличения температуры образующихся газов можно использовать как сам нитрогуанидин, так и обладающий положительным кислородным балансом динитрогуанидин.

Библиографические ссылки

1. Мержанов А. Г., Боровинская И. П. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез тугоплавких неорганических соединений // ДАН СССР. 1972. Т. 204, № 2. С. 366–369.
2. Мержанов А. Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: Двадцать лет поисков и находок. Черноголовка : ИСМАН, 1989. 91 с.
3. Martynenko V. M., Borovinskaya I. P. Thermodynamic analyses for silicon carbide synthesis in combustion regime // Proc. II All-Union Conf. on Combustion Technology. 1978. P. 180–182.
4. Верещагин А. Л. Препаративный самораспространяющийся синтез оксидов : монография. Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2013. 148 с.
5. McKay A. F., Nitroguanidines // Chem. Rev. 1952. V. 51, № 2. P. 301–346.
6. Андреев К. К., Беляев А. Ф. Теория взрывчатых веществ. М. : Оборонгиз, 1960. 597 с.

References

1. Merzhanov A. G., [Self-propagating high-temperature synthesis of refractory inorganic compounds] // DAN SSSR. 1972. V. 204. № 2. p. 366–369 (In Russ.).
2. Merzhanov A. G. [Self-propagating high-temperature synthesis: Twenty years of search and discovery]. Chernogolovka: ISMAN, 1989. 91 p.
3. Martynenko V. M., Borovinskaya I. P. Thermodynamic analyses for silicon carbide synthesis in combustion regime // Proc. II All-Union Conf. on Combustion Technology. 1978. p. 180–182.
4. Vereshagin A. L. [Preparative self-propagating synthesis of oxides]: monogr. Bijsk: Izd-vo Alt. gos. tehn. un-ta, 2013. 148 p. ISBN 978-5-9257-0255-0
5. McKay A. F., Nitroguanidines // Chem. Rev. 1952. V. 51. № 2. p. 301–346.
6. Andreev K. K., Beljaev A. F. [Theory of explosives]. M. : Oborongiz, 1960. 597 p.

© Антишин Д. В., Василишин Д. В.,
Губин Д. Д., 2020

УДК 547.545+547.533

СИНТЕЗ ПРОИЗВОДНЫХ N⁸-АРИЛ-5,8-ХИНОЛИНДИАМИНОВ

Д. О. Будяков, Е. Ю. Курочкина, Н. А. Гаврилова, Г. А. Субоч

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

Исследованы два способа модификации первичной аминогруппы N⁸-арилзамещенных 5,8-хинолиндиаминов: конденсация с функционализированным альдегидом и ацилирование изоникотиноилхлоридом. Получены ранее неизвестные производные N⁸-арил-5,8-хинолиндиаминов, строение которых подтверждено данными ИК-спектроскопии.

Ключевые слова: 5,8-хинолиндиамины, основания Шиффа, конденсация с карбонильными соединениями, ацилирование.

SYNTHESIS OF N⁸-ARYL-5,8-QUINOLINDIAMINES DERIVATIVES

D. O. Budyakov, E. Y. Kurochkina, N. A. Gavrilova, G. A. Suboch

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

Two methods of modification of the primary amino group of N⁸-aryl-substituted 5,8-quinolinediamines were studied: condensation with functionalized aldehyde and acylation with isonicotinoylchloride. Previously unknown derivatives of N⁸-aryl-5,8-quinolinediamines were obtained, the structure of which was confirmed by confirmed by IR spectroscopy data.

Keywords: 5,8-quinolinediamines, Schiff bases, condensation with carbonyl compounds, acylation.

Ароматические и гетероароматические амины широко используются в химической промышленности качестве полупродуктов для синтеза антиоксидантов полимерных композиций, присадок к моторным топливам и смазочным маслам, красителей, пестицидов и лекарственных препаратов. Одним из способов модификации первичных аминов является конденсация с карбонильными соединениями, в результате чего образуются основания Шиффа, которые в последнее время привлекают внимание исследователей не только как стабилизирующие присадки к моторным топливам [1] и полимерным композициям [2], но и как соединения с широким спектром биологической активности. Среди оснований Шиффа найдены соединения, обладающие противогрибковой, антибактериальной и противомаларийной активностью [3]. Для создания лекарственных препаратов также часто используется другой способ модификации аминогруппы – ацилирование. Например, среди ацилированных производных аминохинолинов найдены соединения с высокой противогриппозной активностью, сосудорасширяющим и противовоспалительным действием [4; 5].

Ранее мы сообщали о синтезе N⁸-арилзамещенных 5,8-хинолиндиаминов (1, 2) (рис. 1, 2) [6].

С целью изучения реакционной способности полученных хинолиндиаминов (1, 2) и создания новых соединений на их основе мы исследовали взаимодей-

ствие N⁸-арилзамещенных 5,8-хинолиндиаминов с функционализированным карбонильным соединением – 2-гидроксиимино-3-оксобутаналем (3) и с хлорангидридом изоникотиновой кислоты (4) в качестве ацилирующего агента.

Взаимодействие хинолиндиамина (1) с альдегидокетоном (3) проходит в мягких условиях в 50 % водном растворе метанола при температуре 15–18 °С. Образовавшееся в результате основание Шиффа представляет собой кристаллическое вещество тёмно-красного цвета с т.пл. 97–98 °С. Ацилирование хинолиндиамина (2) осуществляли 2-х кратным избытком хлорангидрида изоникотиновой кислоты (4) при кипячении в толуоле в присутствии триэтиламина. После выделения и очистки получили кристаллическое вещество желтого цвета с т.пл. 197–198 °С.

Строение полученных производных 5,8-хинолиндиамина (5, 6) подтверждают данные ИК спектроскопии. Сравнение ИК спектров соединения (5) и исходного хинолиндиамина (1) показывает, что в спектре основания Шиффа (5) наблюдается полоса валентных колебаний N-H связи вторичной ароматической аминогруппы при 3377,57 см⁻¹, а полоса поглощения первичной ароматической аминогруппы отсутствует. В тоже время появилась новая полоса при 1690 см⁻¹, которая характерна для валентных колебаний C=O группы сопряженных карбонильных соединений.

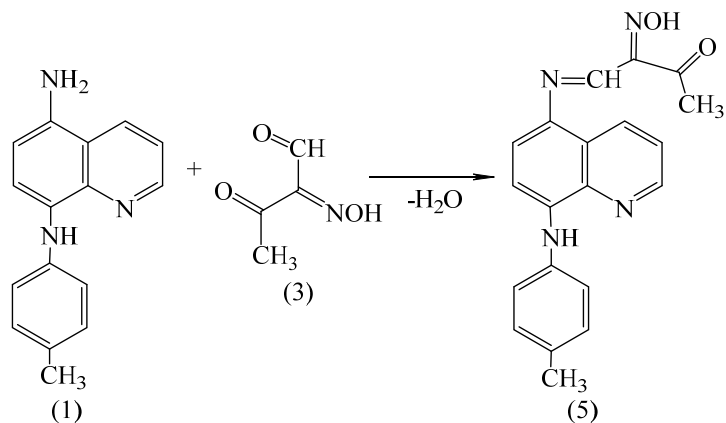


Рис. 1. Взаимодействие 5,8-хинолиндиамина (1) с 2-гидроксиимино-3-оксобутаналем (3)

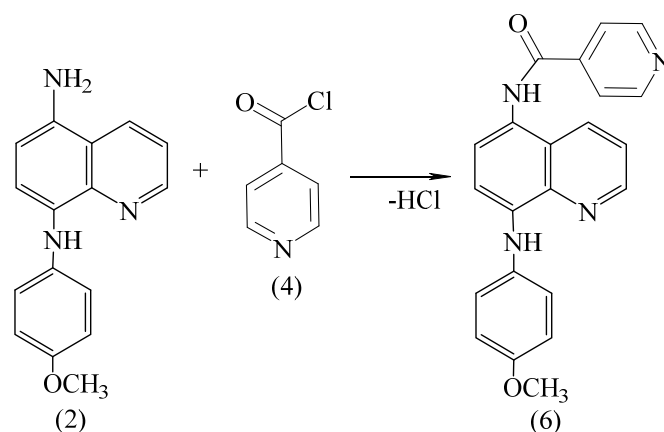


Рис. 2. Взаимодействие 5,8-хинолиндиамина (2) с изоникотиноилхлоридом (4)

Валентные колебания связи C-N вторичной ароматической аминогруппы наблюдаются при 1364 см^{-1} . Валентные колебания C-C и C-N хинолинового фрагмента и бензольного кольца дают полосы поглощения при 1528 см^{-1} и 1584 см^{-1} , а в области $750\text{--}806\text{ см}^{-1}$ наблюдаются полосы поглощения внеплоскостных деформационных колебаний C-H связей ароматических фрагментов.

В ИК-спектре соединения (6) наблюдаются полосы валентных колебаний N-H связи вторичных ароматических аминогрупп: узкие полосы вторичных N-H групп в области 3360 см^{-1} и 3420 см^{-1} соответственно. При частоте $1648,97\text{ см}^{-1}$ наблюдается полоса поглощения, характерная для симметричных валентных колебаний C=O группы. Валентные колебания связи C-N двух вторичных ароматических аминогрупп наблюдаются в области частот $1368,10\text{ см}^{-1}$ в виде двух узких линейных полос. Валентные колебания C-C и C-N хинолинового и пиридинового кольца дают полосы поглощения при $1507,59\text{ см}^{-1}$ и $1573,57\text{ см}^{-1}$ соответственно. В области $817\text{--}736\text{ см}^{-1}$ наблюдаются полосы поглощения внеплоскостных деформационных колебаний C-H связей ароматических фрагмен-

тов, а на частоте $1488,74\text{ см}^{-1}$ наблюдаются валентные колебания.

Таким образом, в результате модификации первичной аминогруппы, получены новые производные N⁸-арилзамещенных 5,8-хинолиндиаминов, которые являются перспективным соединением для создания лекарственных препаратов, а также стабилизирующих присадок к моторным топливам, смазочным маслам и полимерным композициям.

Библиографические ссылки

1. Дорочинская В. А., Данилов А. М., Тонконогов Б. П. Присадки к топливам и смазочным материалам: учебное пособие. М.: Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина, 2017. 290 с.
2. Маслова И. П., Золотарева К. А., Глазунова Н. А. Химические добавки к полимерам: справочник. М.: Химия, 1973. 271 с.
3. Schiff Bases: A Short Survey on an Evergreen Chemistry Tool / Wenling Qin, Sha Long, Mauro Panunzio, Stefano Biondi // *Molecules*. 2013. № 18. P. 12264–12289.

4. Synthesis and Structure-activity Relationship of piperidine-derived non-urea and soluble epoxide hydrolase inhibitors / Stevan Pekic, Svetlana Pakhomova, Marcia E. end etc. // *Bioorg Med Chem Lett.* 2013. № 23(2). P. 417–421.

5. Quinoline: A Versatile Heterocyclic / Akranth Marella, Om Prakash Tanwar, Rikta Saha end etc. // *Saudi Pharmaceutical Journal.* 2013. № 21. P. 1–12.

6. Курочкина Е. Ю. N⁸-арил-5,8-хинолиндиамины // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки : материалы Всерос. науч.-практич. конф. 2019. С. 437–438.

References

1. Dorochinskaya V. A., Danilov A. M., Tonkonogov B. P. *Prisadki k toplivam i smazochnym materialam* [Additives to fuels and lubricants]. М. : Rossiyskiy gosudarstvennyy institut nefti gaza imeni I. M. Gubkina, 2017. 290 p.

2. Maslova I. P., Zolotareva K. A., Glazunova N. A. *Himicheskie dobavki k polimeram* [Chemical additives to polymers]. М. : Himiya Publ., 1973. 271 p.

3. Schiff Bases: A Short Survey on an Evergreen Chemistry Tool / Wenling Qin, Sha Long, Mauro Panunzio, Stefano Biondi // *Molecules.* 2013. № 18. P. 12264–12289.

4. Synthesis and Structure-activity Relationship of piperidine-derived non-urea and soluble epoxide hydrolase inhibitors / Stevan Pekic, Svetlana Pakhomova, Marcia E. end etc. // *Bioorg Med Chem Lett.* 2013. № 23(2). P. 417–421.

5. Quinoline: A Versatile Heterocyclic / Akranth Marella, Om Prakash Tanwar, Rikta Saha end etc. // *Saudi Pharmaceutical Journal.* 2013. № 21. P. 1–12.

6. Kurochkina E. Y. [N⁸-Aryl-5,8-quinolinamines] // *Molodye uchenye v reshenii aktualnyh problem nauki : materialov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferencyi* [Materials of the all-Russian scientific and practical conference: Young scientists in solving actual problems of science.]. 2019. P. 437–438. (In Russ.).

© Будяков Д. О., Курочкина Е. Ю.,
Гаврилова Н. А., Субоч Г. А., 2020

УДК 547.821

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ 3(5)-МЕТИЛ-4-АМИНО-5(3)-ПИРИДИН-4-ИЛ-1Н-ПИРАЗОЛА

Д. С. Волкова*, Е. В. Роот, А. А. Кукушкин, Г. А. Субоч

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

*E-mail: dasha_21_dasha@mail.ru

Применение масс-спектрометрического метода для подтверждения структуры ранее синтезированного 3(5)-метил-4-амино-5(3)-пиридин-4-ил-1Н-пиразола.

Ключевые слова: 4-нитропиразол, 4-аминопиразол, гамма-пиридиновый фрагмент, метильный заместитель, восстановление, масс-спектрометрия, идентификация.

USAGE MASS SPECTROMETRY FOR IDENTIFICATION 3(5)-METHYL-4-AMINO-5(3)-PYRIDINE-4-YL-1H-PYRAZOLE

D. S. Volkova*, E. V. Root, A. A. Kukushkin, G. A. Suboch

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: dasha_21_dasha@mail.ru

Usage of a mass spectrometric method to confirm the structure of the previously synthesized 3(5)-methyl-4-amino-5(3)-pyridine-4-yl-1H-pyrazole.

Keywords: 4-nitrosopyrazole, 4-aminopyrazole, gamma-pyridine fragment, methyl substituent, reduction, mass-spectrometry, identification.

В последнее время исследователи в области органической химии проявляют больший интерес к производным аминопиразолов за счет их реакционной способности и биологической активности. Ранее были получены 4-аминопиразолы с γ -пиридиновым фрагментом, структура которых не была подтверждена [1–3].

Целью данной работы является идентификация 3(5)-метил-4-амино-5(3)-пиридин-4-ил-1Н-пиразола методом масс-спектрометрии.

Регистрация масс-спектров проводилась на приборе Shimadzu LC/MS-2020 с колонкой RAPTOR ARC-

18 100. Хроматографирование проводили в изократическом режиме, при температуре 35°C в термостатируемой колонке.

Масс-спектры получали прямым вводом образца и элюата, подаваемого хроматографом со скоростью 0,001 см³/мин, с ионизацией на электронапылителем источнике (ESI) [4].

В масс-спектре 3(5)-метил-4-амино-5(3)-пиридин-4-ил-1Н-пиразола имеются пик 174 m/z, соответствующий предполагаемому (рис. 1).

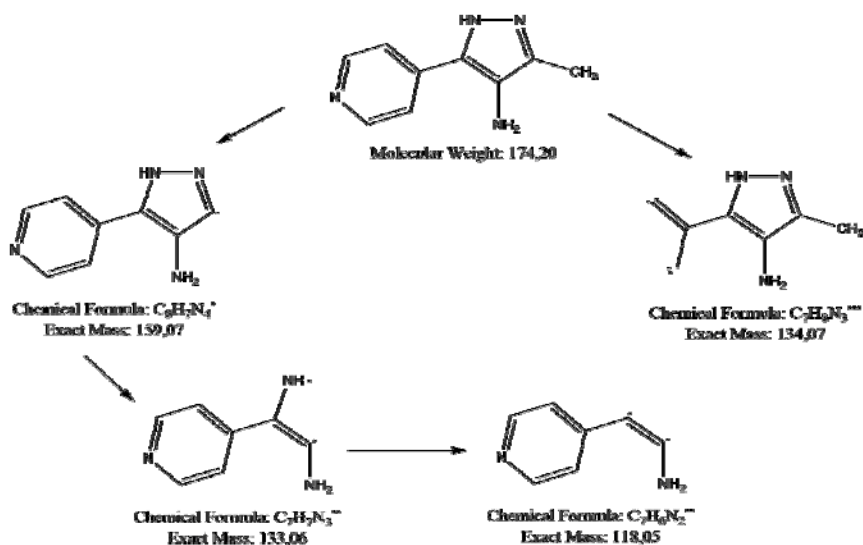


Рис. 1. Фрагментационный распад 3(5)-метил-4-амино-5(3)-пиридин-4-ил-1Н-пиразола

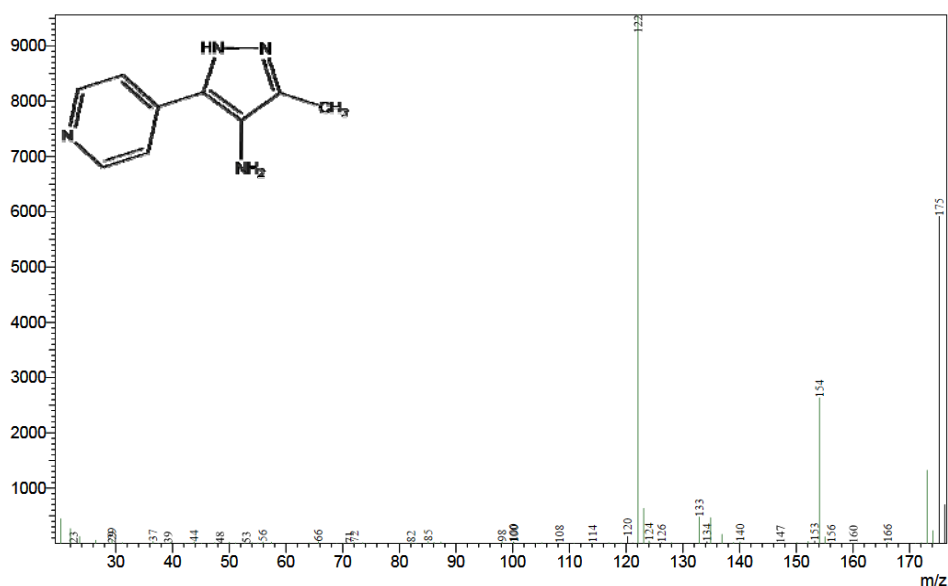


Рис. 2. Масс-спектр 3(5)-метил-4-амино-5(3)-пиридин-4-ил-1Н-пиразола

Основываясь на «азотном правиле», четная молекулярная масса соединения свидетельствует о наличии четного количества атомов азота в структуре. Ион (M+1) с интенсивностью 62,5% от молекулярного пика подтверждает наличие в молекуле 9 атомов углерода и 4 атомов азота, что соответствует структуре исследуемого соединения (рис. 2) [5].

Таким образом, масс-спектрометрическим методом был идентифицирован полученный ранее 3(5)-метил-4-амино-5(3)-пиридин-4-ил-1Н-пиразол.

Библиографические ссылки

1. Заборцева Ю. А., Босая Н. С., Рот Е. В. Восстановление 3(5)-фенил-4-нитрозо-5(3)-пиридин-4-ил-1Н-пиразола гидразин гидратом // Актуальные проблемы науки и техники-2019 : XII Междунар. науч.-практич. конф. молодых ученых. 2019. 386 с.
2. Заборцева Ю. А., Босая Н. С., Рот Е. В. Синтез 3(5)-метил-4-амино-5(3)-пиридин-4-ил-1Н-пиразола // Междисциплинарные исследования. Современное состояние и перспективы развития : сб. статей XXXV Междунар. студенческой науч.-практич. конф. Екатеринбург : Изд-во «ИМПУВ», 2019. С. 54–56.
3. Синтез 3(5)-(4-хлорфенил)-4-амино-5(3)-пиридин-4-ил-1Н-пиразол / Д. И. Персидская, Н. С. Босая, А. А. Кукушкин, Е. В. Рот // XXII Всероссийская конф. молодых учёных-химиков, тезисы докладов. Нижний Новгород : Изд-во ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2019. 577 с.
4. Яшин Я., Яшин А. Основные тенденции развития хроматографии после 110-летия со дня ее открытия М. С. Цветом. М. : ООО «Интерлаб», 2014. С. 11.

5. Бочкарев В. Н., Поливанов А. Н., Фалько В. С. Масс-спектры положительных и отрицательных ионов линейных метил фенилсилоксанов // Журнал общей химии. 1978. Т. 48. С. 858–861.

References

1. Zaborceva Ju. A., Bosaja N. S., Root E. V. Vosstanovlenie 3(5)-fenil-4-nitrozo-5(3)-piridin-4-il-1N-pirazola gidrazin gidratom // Aktual'nye problemy nauki i tehniki-2019 : XII Mezhdunar. nauchno-prakticheskaja konf. molodyh uchenyh. 2019. 386 p.
2. Zaborceva Ju. A., Bosaja N. S., Root E. V. Sintez 3(5)-metil-4-amino-5(3)-piridin-4-il-1n-pirazola // Mezhdisciplinarnye issledovanija. Sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitija : sbornik statej XXXV Mezhdunar. studencheskoj nauchno-prakticheskij konf. Ekaterinburg : Izdatel'stvo «IMPRUV», 2019. P. 54–56.
3. Sintez 3(5)-(4-hlorfenil)-4-amino-5(3)-piridin-4-il-1N-pirazol / D. I. Persidskaja, N. S. Bosaja, A. A. Kukushkin, E. V. Root // HHII Vserossijskaja konf. molodyh uchjonyh-himikov, tezisy dokladov. Nizhnij Novgorod : Izd-vo NNGU im. N. I. Lobachevskogo, 2019. 577 p.
4. Jashin Ja., Jashin A. Osnovnye tendencii razvitija hromatografii posle 110-letija so dnja ee otkrytija M. S. Cvetom. M. : ООО «Interlab», 2014. P. 11.
5. Bochkarev V. N., Polivanov A. N., Fal'ko V.S. Mass-spektry polozhitel'nyh i otricatel'nyh ionov linejnyh metil fenilsiloksanov // Zhurnal obshej himii. 1978. T. 48. P. 858–861.

© Волкова Д. С., Рот Е. В.,
Кукушкин А. А., Субоч Г. А., 2020

УДК 541.127:547.8

ТЕРМИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ 3-НИТРО-1,2,4-ТРИАЗОЛАТА ГИДРАЗИНИЯ

Л. А. Круглякова*, К. В. Пехотин, М. А. Попов

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

*E-mail: lakruglyakova@sibsau.ru

Термическое разложение 3-нитро-1,2,4-триазолат гидразиния, возможного компонента смесевых твердых ракетных топлив, в неизотермических условиях протекает в три стадии с первичной диссоциацией на исходный гидразин и 3-нитро-1,2,4-триазол.

Ключевые слова: термическое разложение, 3-нитро-1,2,4-триазолат гидразиния, 3-нитро-1,2,4-триазол термическая стойкость.

THERMAL DECOMPOSITION OF HYDRAZINIUM 3-NITRO-1,2,4-TRIAZOLATE

L. A. Kruglyakova*, K. V. Pekhotin, M. A. Popov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: lakruglyakova@sibsau.ru

Thermal decomposition of hydrazinium 3-nitro-1,2,4-triazolate, a possible component of mixed solid rocket propellants, in non-isothermal conditions proceeds in three stages with primary dissociation for the original hydrazine and 3-nitro-1,2,4-triazole.

Keywords: thermal decomposition, hydrazinium 3-nitro-1,2,4-triazolate, 3-nitro-1,2,4-triazole, thermal stability.

Введение. Известно, что перхлорат аммония является классическим окислителем в составах смесевых твердых ракетных топлив. Замена иона аммония ионом гидразиния приводит к повышению теплоты горения и энергоэффективности состава [1]. Однако продукты горения топлива с перхлоратами содержат токсичные соединения хлора, поэтому ведутся исследования других экологически безопасных активных солей аммония и гидразиния. Кроме этого ион гидразиния, в отличие от иона аммония, термически неустойчив и при нагревании превращается в аммиак и продукты взаимодействия иона гидразиния с анионом. В этой связи изучение термической стабильности различных солей гидразиния является актуальным.

Результаты и их обсуждение. Нами изучено термическое разложение гидразиниевой соли 3-нитро-1,2,4-триазола в неизотермических условиях. Исследование проводилось на дериватографе Q-1500 D в температурном интервале 20–350 °С при скорости нагревания 5 град/мин. Масса образца составляла 10 мг.

Термограмма процесса представлена на рис. 1. Как видно из рис. 1, нагревание образца не сопровождается плавлением, о чем свидетельствует отсутствие эндотермического пика на кривой ДТА до начала разложения. Термическое разложение образца в изученном температурном диапазоне протекает в три основные стадии, различающиеся по скорости и интенсивности тепловыделения.

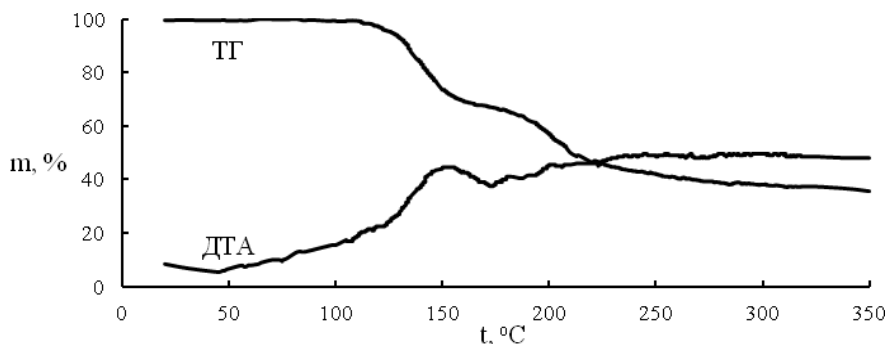


Рис. 1. Термограмма 3-нитро-1,2,4-триазолат гидразиния, скорость нагревания 5 град/мин

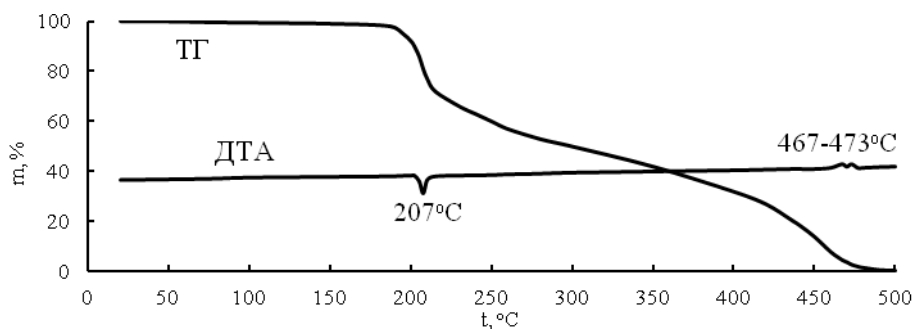
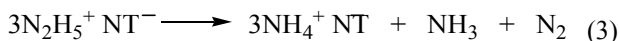
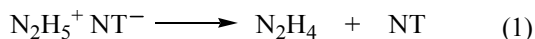


Рис. 2. Термограмма 3-нитро-1,2,4-триазола, скорость нагревания 5 град/мин

Первая стадия начинается, примерно, при температуре 120–122 °С, сопровождается интенсивным тепловыделением с максимумом при температуре 151 °С и практически завершается по достижении температуры 160–162 °С. Потеря массы образца на этой стадии составляет ~28 %.

Для всех ранее изученных солей аммония и гидразиния в качестве первичной стадии термораспада постулируется реакция диссоциации на аммиак (гидразин) и соответствующую кислоту [1]. Поэтому в случае гидразиниевой соли нитротриазола, с учетом нестабильности образующегося гидразина, процесс, протекающий на первой стадии, можно представить реакциями:



где NT – 3-нитро-1,2,4-триазол.

Вторая стадия потери массы образца (при температурах 178–210 °С) не сопровождается заметным тепловыделением. Здесь, вероятно, происходит термическое разложение образовавшегося на первой стадии 3-нитро-1,2,4-триазола с деструкцией цикла и удалением летучих продуктов. Полное разложение и испарение жидких и летучих продуктов, структурирование конденсированного остатка происходит на третьей стадии (при температурах выше 250 °С).

Ранее было показано, что термическое разложение 3-нитро-1,2,4-триазола в аналогичных условиях начинается с плавления при температуре 207 °С (рис. 2) [2]. Быстрая потеря массы, связанная с разрушением гетероцикла, наблюдается в температурном интервале 210–215 °С.

Вероятно, в случае гидразиниевой соли основной катализ продуктами распада исходной соли приводит к снижению температуры начала разложения 3-нитро-

1,2,4-триазола, следствием этого является также отсутствие на дериватограмме пика плавления 3-нитротриазола.

В целом, термическая стойкость 3-нитро-1,2,4-триазола гидразиния ниже, чем перхлората гидразиния [3], что ограничивает возможность его использования в качестве компонента СТРТ.

Библиографические ссылки

1. Термическое разложение и горение порохов и взрывчатых веществ / Г. Б. Манелис, Г. М. Назин, Ю. И. Рубцов, В. А. Струнин. М.: Наука, 1996. 223 с.
2. Степанов Р. С., Круглякова Л. А., Степанова М. А. Термическое разложение нитропроизводных 1,2,4-триазола ниже точки плавления // Журн. общ. химии. 1997. Т. 67, вып. 2. С. 324–328.
3. Коробан В. А., Смирнова Т. И., Светлов Б. С. Кинетика и механизм термического разложения перхлората гидразина и гидроксилamina // Химическая физика процессов горения и взрыва: Кинетика химических реакций. Черногловка: ОИХФ, 1077. С. 67–71.

References

1. Thermal decomposition and combustion of explosives and powders / G. B. Manelis, G. M. Nazin, Yu. I. Rubtsov, V. A. Strunin. M.: Science, 1996. 223 p. (In Russ.).
2. Stepanov R. S., Kruglyakova L. A., Stepanova M. A. Kinetics and mechanism of thermal decomposition of 2-substituted 5,5-dinitro-1,3-dioxanes // Rus. J. of Gen. Chem. 2004. Vol. 74, № 10. P. 1579–1582.
3. Koroban V. A., Smirnova T. I., Svetlov B. S. Kinetics and mechanism of thermal decomposition of hydrazine and hydroxyl amine perchlorate // Chemical Physics of processes of combustion and explosion: Kinetics of chemical reactions. Chernogolovka: DICHPh, 1977. P. 67–71.

© Круглякова Л. А., Пехотин К. В.,
Попов М. А., 2020

СИНТЕЗ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО УГЛЕРОДНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ ИЗ ГРАФИТА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

А. В. Купряшов*, И. Я. Шестаков

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

*E-mail: KupryashovAndrey@yandex.ru

Настоящее исследование посвящено синтезу нового основного компонента многофункциональных покрытий, используемых в ракетно-космической технике – мелкодисперсного углеродного наполнителя, на основе графита, получаемого электролизом. Доказательство строения осуществляли, с помощью оптического визуального метода и исследования структуры цифровым микроскопом.

Ключевые слова: многофункциональное покрытие, углеродный мелкодисперсный наполнитель, графитовый порошок, электрохимическое воздействие, молекулярный кислород.

SYNTHESIS OF A FINE CARBON FILLER FROM GRAPHITE BY THE ELECTROCHEMICAL METHOD

A. V. Kupryashov*, I. Y. Shestakov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: KupryashovAndrey@yandex.ru

This study is devoted to the synthesis of a new main component of multifunctional coatings used in rocket and space technology – a finely dispersed carbon filler based on graphite obtained by electrolysis. We carried out the proof of the structure using an optical sighting method and studying the structure with a digital microscope.

Keywords: multifunctional coating, fine carbon filler, graphite powder, electrochemical action, molecular oxygen.

Основное назначение многофункционального покрытия в ракетно-космической технике состоит в защите наружных поверхностей и частей летательного аппарата от агрессивного внешнего воздействия (ионизирующего, электромагнитного и радиоизлучения, отражение лазерного раздражения), а также в защите от коррозии и эрозии, теплозащите.

Многофункциональное покрытие имеет сложный состав и структуру. По сути оно является пакетом слоёв, наносимых на поверхность изделия газодинамическим напылением. Основа распыляемой смеси состоит из 4-х основных компонентов: катализатор, флуороновый краситель, низкомолекулярный полимер и дисперсный наполнитель [1–2]. Полученная смесь разводится до нужного для нанесения состояния толуолом.

Основным компонентом покрытия является дисперсный наполнитель – микростеклосферы модифицированные вольфрамом, то есть полые частицы микростеклосфер, на поверхность которых нанесено вольфрамовое покрытие. Частицы микростеклосфер имеют разнообразную форму: сфера, куб, параллелепипед, чешуйка, цилиндр, шестиугольник, различные волокна и т. д. [3].

Многофункциональное покрытие состоящие из компонентов описанных выше активно применяется сегодня в аэрокосмической технике, но оно имеет ряд недостатков: опасный и вредный компонент Родамин

6Ж [4], высокая стоимость основного компонента, большие трудовые затраты на получения композиционной смеси, неоднородность слоёв покрытия (из-за разнообразия форм дисперсного наполнителя), которое влечёт за собой дополнительные операции механической обработки для получения слоя многофункционального покрытия заданной толщиной.

Данные недостатки могут быть устранены путём использования дисперсного углеродного наполнителя [5], изготовленного на основе графита с гексагональной кристаллической структурой.

Графитовый порошок был получен электрохимическим методом – электролизом из графита высокопрочного мелкодисперсного плотного. Специально для этого было создано специальное устройство – диафрагменный электролизёр. Основой устройства являются 2 электрода: анод из графита, катод из нержавеющей стали, электролитом служит специально подготовленная вода.

При погружении в воду электродов и подводе к ним достаточного напряжения начинается процесс переноса электрического тока движущимися к электродам ионами в электролите, которым является вода, и электронами во внешней цепи. Под действием электрического поля, положительно заряженные ионы мигрируют к катоду, а отрицательно заряженные ионы – к аноду. На электродах происходит переход электронов. Катод отдает электроны в раствор и в

приэлектродном пространстве происходят процессы восстановления. В околоанодном пространстве протекают процессы переноса электронов от реагирующих частиц к электроду – окисление [6].

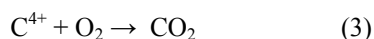
Анодное окисление и катодное восстановление создают базу процесса электролиза, протекающего в электролизере. В начале процесса прохождения электрического тока через анод, протекает мгновенная реакция образования иона C^{4+} из атомов углерода [7]:



Вблизи ионов C^{4+} образуется гидратная оболочка. Сформированные гидратированные ионы сохраняются в воде:



Последующее прохождение электрического тока через систему устройства создаёт условия образования молекулярного кислорода O_2 из гидроксид-ионов в околоанодном пространстве. Молекулярный кислород вступает в реакцию с ионами углерода C^{4+} с образованием углекислого газа CO_2 [8]:



После окончания реакции был получен нужный продукт – слой водного раствора с чёрным осадком. Органический слой специально сушили, в результате извлечён сухой остаток – графитовый порошок. Дальнейшее исследование полученного графитового порошка проводилось с помощью оптического визирного метода и цифрового микроскопа.

В результате исследования было выявлено, что частицы полученного порошка достигают нужного нам размера 0,004 мм. Следовательно, полученный продукт можно использовать при разработке нового состава мультифункционального покрытия, используемого в ракетно-космической технике.

Библиографические ссылки

1. Пат. 2404087 С1 Рос. Федерация. Термоэмиссионный способ тепловой защиты частей летательных аппаратов при их аэродинамическом нагреве / Керножицкий В. А., Кольчев А. В., Охочинский Д. М. ; № 2009140802/11 ; заявл. 03.11.2009 ; опубл. 20.11.2010, Бюл. № 32. 7 с.

2. Шайдурова Г. И., Васильев И. Л., Карманова Л. И. Разработка и подтверждение работоспособности ремонтного состава для наружного теплозащитного покрытия // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2014. № 36. С. 49–63.

3. Наполнители для полимерных композиционных материалов : справ. пособие ; перевод с англ. / под ред. П. Г. Бабаевского. М. : Химия, 1981. 736 с.

4. Спектроскопическое родамина 6Ж и изучение состояния молекул неполярных растворителях / Ю. А. Митцель, Л. В. Лёвшин, А. П. Головина и др. // Вестник Московского ун-та. 1968. № 1. С. 74–79.

5. Леонов Д. В. Разработка полиамида-6 функционального назначения, модифицированного окисленным графитом : дис. ... канд. техн. наук: 05.17.06. Саратов, 2018. 163 с.

6. Chen G. Electrochemical technologies in wastewater treatment // Separation and Purification Technology. 2004. № 38. P. 11–41.

7. Stolten D., Emonts B. Fuel Cell Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology // John Wiley & Sons. 2012. 1268 p.

8. Якименко Л. М. Электродные материалы в прикладной электрохимии. М. : Химия, 1977. 264 с.

References

1. pat. 2404087 C1 Ros. Federatsiya. Termoemissionnyi sposob teplovoi zashchity chastei letatel'nykh apparatov pri ikh aerodinamicheskom nagreve / Kernozhitskii V. A., Kolychev A. V., Okhochinskii D. M. ; № 2009140802/11 ; zayavl. 03.11.2009 ; opubl.: 20.11.2010, Byul. № 32. 7 p.

2. Shaidurova G. I., Vasil'ev I. L., Karmanova L. I. Razrabotka i podtverzhdenie rabotosposobnosti remontnogo sostava dlya naruzhnogo teplozashchitnogo pokrytiya // Vestnik PNIPIU. Aerokosmicheskaya tekhnika. 2014. № 36. P. 49–63.

3. Napolniteli dlya modifikatsii sovremennykh polimernykh kompozitsionnykh materialov / A. S. Kolosova, M. K. Sokol'skaya, I. A. Vitkalova et al. // Fundamental'nye issledovaniya. 2017. № 10. P. 459–465.

4. Spektroskopicheskoe rodamina 6G i izuchenie sostoyaniya molekul nepolyarnykh rastvoritelyakh / Yu. A. Mittsel', L. V. Levshchin, A. P. Golovina et al. // Vestnik Moskovskogo Universiteta. 1968. № 1. P. 74–79.

5. Leonov D. V. Razrabotka poliamida-6 funktsional'nogo naznacheniya, modifitsirovannogo okislennym grafitom : dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.17.06. Saratov, 2018. 163 p.

6. Chen G. Electrochemical technologies in wastewater treatment // Separation and Purification Technology. 2004. № 38. P. 11–41.

7. Stolten D., Emonts B. Fuel Cell Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology // John Wiley & Sons. 2012. 1268 p.

8. Yakimenko L. M. Elektrodnye materialy v prikladnoi elektrokhemii. M. : Khimiya, 1977. 264 p.

© Купряшов А. В., Шестаков И. Я., 2020

УДК 678:621.315.61

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ С ПОВЫШЕННОЙ ТЕПЛОСТОЙКОСТЬЮ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ РЕЗИН

С. И. Левченко*, В. Р. Пен, К. А. Коляда

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: levchenko167@inbox.ru

Исследованы различные вулканизирующие системы и наполнители для производства теплостойких электроизоляционных композиций на основе этилен-пропиленовых каучуков.

Ключевые слова: изоляция проводов и кабелей, этилен-пропиленовые каучуки, вулканизирующая группа, наполнители, теплостойкость.

OPTIMIZATION OF ELASTOMERIC COMPOSITIONS WITH INCREASED HEAT RESISTANCE FOR ELECTRICAL INSULATING RUBBER PRODUCTION

S. I. Levchenko*, V. R. Pen, K. A. Kolyada

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: levchenko167@inbox.ru

Various vulcanizing systems and fillers were investigated to obtain heat-resistant electrical insulating elastomeric compositions based on ethylene-propylene rubbers.

Keywords: insulation of wires and cables, ethylene-propylene rubbers, vulcanizing group, fillers, heat resistance.

Развитие современной техники, средств связи, транспорта, энергоснабжения неразрывно связано с выпуском кабельной продукции. Особое применение в промышленности получили силовые кабели с резиновой изоляцией, основным преимуществом которых является возможность при эксплуатации допускать малые радиусы изгибов. Температурные пределы практического использования кабельных резин во многом определяются их стойкостью к различным видам старения, в том числе и к действию высоких температур [1; 2].

В настоящее время в качестве изоляции таких кабелей используются резиновые смеси на основе этиленпропиленовых каучуков (РТЭПИ-1), которые обладают исключительной стойкостью к окислению, высокой озоно- и теплостойкостью, ударопрочностью, а также устойчивостью к ряду агрессивных сред. [3–5].

Расширение температурных режимов эксплуатации резин на основе этиленпропиленовых каучуков возможно за счет повышения термостойкости эластомерных материалов путем создания теплостойкой пространственной структуры вулканизата и введения различных активных добавок и наполнителей.

Целью работы являлось исследование влияния типа вулканизирующей системы на диэлектрические, физико-механические свойства резин, а также влияния наполнителей (белая сажа, каолин) на стойкость к термическому старению резины типа РТЭПИ-1, полученной на основе этилен-пропиленового каучука марки DUTRAL TER 4044. Резиновые смеси изготов-

ливали на лабораторных вальцах при температуре 70 °С. Технологические и технические свойства резиновых смесей и резин оценивали стандартными методами (ГОСТ 23016–78, ГОСТ 263–75, ГОСТ 69–50, ГОСТ 270–75).

Были исследованы наиболее распространенные для кабельной изоляции вулканизирующие системы (серная, перекисная – пероксимон F-40, хиноидная – хиноловый эфир *n*-бензохинондиоксида (ЭХ-1), способные вызывать образование различных по своей природе химических поперечных связей.

Для сравнения исследовались резины типа РТЭПИ повышенной теплостойкости на основе этиленпропиленовых каучуков для изоляции токопроводящих жил кабелей.

В результате проведенных исследований (см. таблицу) установлено, что применение хинолового эфира как самостоятельного вулканизирующего агента, так и совместно с пероксимоном F-40, позволяет в 1,2–2 раза увеличить скорость вулканизации резиновых смесей.

Появляется возможности снизить температуру вулканизации, повысить в 1,2–1,3 раза условную прочность при разрыве и в 1,4 раза электрическую прочность резин на основе СКЭПТ. Можно в 2–4 раза сократить использование пероксимона F-4, и даже полностью исключить его из состава электроизоляционных резиновых смесей. Исключение же серы из предлагаемых рецептур изоляционных эластомерных композиций способствует уменьшению коррозии медных токоведущих частей.

Технологические и технические свойства изоляционных резин

Компоненты резиновой смеси					
Вулканизирующая группа	Сера+ пероксисимон F-40	Перокси-мон F-40	Хиоловый эфир+ пероксисимон F-40	Хиоловый эфир	Стандартная смесь
Наполнитель	Мел+ Тальк	Каолин	Мел+ Тальк	Мел+ белая сажа БС-50	–
Показатели резиновых смесей и резин					
Пластичность по Карреру:					
– исходная	0,52	0,50	0,48	0,51	≥ 45
– после прогрева при 100 °С в течении 30 минут	0,56	0,55	0,53	0,56	≥ 50
50 минут	0,57	0,58	0,56	0,59	≥ 50
Условная прочность при растяжении, МПа	3,9	4,3	6,0	6,8	3,72
Относительное удлинение при разрыве, %	560	500	500	520	≥ 300
Снижение показателя после термического старения					
при 125 °С, 168 часов:					
– прочности, %	18	10	9	4	≤ 50
– относительного удлинения, %	29	22	20	8	≤ 60
при 135 °С, 168 часов:					
– прочности, %	12	9	8	6	≤ 30
– относительного удлинения, %	37	15	10	7	≤ 50

В работе были также проведены исследования по влиянию типа наполнителя (мела, белой сажи, каолина, микроталька) на свойства резиновых смесей и резин.

Анализ полученных результатов эксперимента показал, что резина, содержащая в качестве наполнителя белую сажу, обладает более высокими показателями коэффициентов термического старения по прочности и относительному удлинению. При этом электроизоляционные свойства изучаемых резин находились в пределах нормативных показателей. Выбраны наиболее эффективной системы вулканизации и наполнения для электроизоляционных резин, проведена работа по оптимизации соотношения компонентов в рецептурах.

На основе данных, приведенных в работе, можно сделать вывод, что применение этиленпропиленовых каучуков при создании электроизоляционных резин позволяет получить материалы с хорошим набором специальных характеристик. С учетом того, что данные полимеры относятся к числу наименее дорогих каучуков специального назначения, использование результатов приведенного исследования позволит расширить возможности их применения в кабельной промышленности, повысить надежность эксплуатации и срок службы кабелей с теплостойкой изоляцией за счет повышения прочности и диэлектрических характеристик изоляционных покрытий.

Библиографические ссылки

1. Глупушкин П. М., Саакян А. Е., Щербак Д. П. Кабельные резины. М.: Энергия, 1986. 356 с.
2. Григорьян А. Г., Дикерман Д. Н. Технология производства кабелей и проводов с применением пластмасс и резин. М.: Машиностроение, 2011. 367 с.

3. Кабели с изоляцией из этиленпропиленовой резины // Мир современных материалов [Электронный ресурс]. М., 2014. URL: <http://worldofmaterials.ru/spravochnik/primenenie/28-silovye-kabeli/65-kabelis-izolyatsiej-izetilenpropilenovoj-reziny> (дата обращения: 01.04.2015).

4. Жданов Ю. С., Попов О. А. Применение этиленпропиленовых резин в кабельной технике // Вестник ПНИПУ. 2014. № 10. С. 70–79.

5. Генкина Ю. М. Этилен-пропиленовые каучуки KELTAN – новые технологии, отвечающие современным требованиям // Каучук и резина. 2010. № 2. С. 8–11.

References

1. Glupushkin P. M., Sahakyan A. E., Shcherbakov D. P. *Kabel'nye reziny*. [Cable rubber]. M.: Energiya, 1986, 356 p.
2. Grigoryan A. G., Dikerman D. N. *Tekhnologiya proizvodstva kabelej i provodov s primenением plastmass i rezin* [Technology of cable and wire production using plastics and rubbers]. M.: Mashinostroenie, 2011, 367 p.
3. *Kabeli s izolyaciej iz etilenpropilenovoj reziny // Mir sovremennyh materialov* [Electronic resource]. M., 2014. URL: <http://worldofmaterials.ru/spravochnik/primenenie/28-silovye-kabeli/65-kabelis-izolyatsiej-izetilenpropilenovoj-reziny/> (access: 01.04.2015).
4. Zhdanov Yu. S., Popov O. A. [The use of ethylene-propylene rubber in cable technology] // *Vestnik PNIPU*. 2014. № 10. P. 70–79. (In Russ.)
5. Genkina Yu. M. [Ethylene-propylene rubbers KELTAN – new technologies that meet modern requirements] // *Kauchuk i rezina*. 2010. № 2. P. 8–11. (In Russ.)

© Левченко С. И., Пен В. Р., Коляда К. А., 2020

**О КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ХИМИЧЕСКИМИ СДВИГАМИ СИГНАЛОВ ГРУПП
В ЯМР 1H СПЕКТРАХ И СИГМА-КОНСТАНТАМИ РАЗЛИЧНЫХ ЗАМЕСТИТЕЛЕЙ
В БЕНЗОЛЬНОМ КОЛЬЦЕ**

Н. А. Моргунова, М. С. Товбис

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: Nadya3024@yandex.ru

Целью работы является выявление корреляции между химическими сдвигами сигналов групп в ЯМР¹H спектрах с сигма-константами различных заместителей в бензольном кольце. Рассматриваются сигма-константы Гаммета и Тафта и их связь с химсдвигами сигналов различных заместителей в бензольном кольце.

Ключевые слова: корреляция, химсдвиги, ЯМР¹H спектр, заместители, зависимость, сигма-константы Гаммета и Тафта.

**CORRELATION BETWEEN CHEMICAL SHIFTS OF GROUP SIGNALS IN 1H NMR SPECTRA
AND SIGMA CONSTANTS OF VARIOUS SUBSTITUTES IN THE BENZENE RING**

N. A. Morgunova, M. S. Tovbis

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: Nadya3024@yandex.ru

The aim of this work is to reveal the correlation between the chemical shifts of group signals in 1H NMR spectra with sigma constants of various substituents in the benzene ring. The paper considers the sigma constants of Hammett and Taft and their relationship with chemical shifts and signals of various substituents in the benzene ring.

Keywords: correlation, chemical shifts, 1H NMR spectrum, substituents, dependence, Hammett and Taft sigma constants.

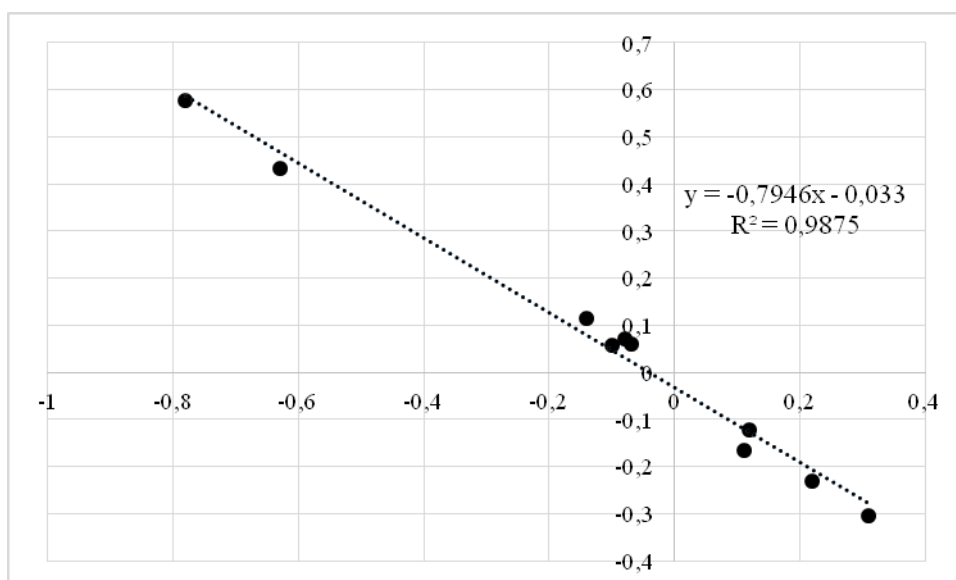
Известно, что химические сдвиги сигналов протонов бензольного кольца в ЯМР¹H спектрах зависят от характера различных заместителей в бензоле [1]. Электроноакцепторные заместители сдвигают сигналы протонов кольца в область слабого поля, а электронодонорные – в сильное поле. Это явление объясняется экранированием или дезэкранированием протонов под действием заместителей [2–4].

Мы провели анализ спектров ЯМР 1H для ряда нитрозо- и аминафенолов, а также нитрозо- и аминопиразолов и сопоставили химические сдвиги заместителей с сигма-константами Гаммета и Тафта [5].

Значения химических сдвигов δ_{H} и $\delta_{\text{M}}^{\text{H}}$ вместе с сигма-константами Гаммета и Тафта приведены в таблице.

Расчёт δ_{H} и $\delta_{\text{M}}^{\text{H}}$ для нахождения коэффициента множественной корреляции

Группа	σI	σR	δ_{H}	$\delta_{\text{M}}^{\text{H}}$	$\delta_{\text{H}} - \delta_{\text{M}}^{\text{H}}$
NH2	0,12	-0,78	0,9052	0,3274	0,5778
COOC2H5	0,32	0,22	-0,3628	-0,1326	-0,2302
CH3	-0,04	-0,07	0,1076	0,0461	0,0615
OH	0,27	-0,63	0,6742	0,2404	0,4338
NHSO2C6H4NHCOCH3	0,42	0,11	-0,2648	-0,1003	-0,1645
n-C4H9	-0,05	-0,08	0,123	0,0519	0,0711
NO	0,34	0,31	-0,4776	-0,1743	-0,3033
C2H5	-0,03	-0,14	0,1882	0,0747	0,1135
C10H7	0,1	-0,1	0,096	0,038	0,058
NO-n-C4H9	0,15	0,12	-0,185	-0,0641	-0,1209

График зависимости $\delta_{\text{H}}^{\text{H}} - \delta_{\text{H}}^{\text{M}} = f(\sigma_R)$

На основании данных таблицы был построен график зависимости разности химических сдвигов протонов в пара- и мета-положениях от сигма-констант Гаммета, который представлял собой линейную зависимость с высоким коэффициентом корреляции (см. рисунок).

Таким образом, нам удалось показать, что химические сдвиги сигналов заместителей в ЯМР ^1H спектрах замещённых нитрозо- и аминопиразолов, нитрозо- и аминифенолов тесно связаны с сигма-константами Гаммета, что подтверждает электронную природу влияния заместителей на экранирование и дезэкранирование протонов указанных соединений.

Библиографические ссылки

1. Silverstein R. M., Webster F. X., Kiemle D. J. Spectrometric identification of organic compounds / tr. from English. M. : BINOM. Knowledge Laboratory, 2014. 557 p. (Methods in chemistry).
2. Breitmaier E. Structure elucidation by NMR in organic chemistry: practical guide. 3rd revised ed., New York: Wiley, 2002.
3. Claridge T. D. W. High-resolution NMR techniques in organic chemistry. Elsevier science. Oxford, UK, 1999.

4. Becker E. D. High-resolution NMR: theory and chemical applications. 3rd ed. New York : Academic press, 1999.

5. Жданов Ю. А., Минкин В. И. Корреляционный анализ в органической химии. М. : Издат. ин. лит., 1966. 472 с.

References

1. Silverstein R. M., Webster F. X., Kiemle D. J. Spectrometric identification of organic compounds / tr. from English. M. : BINOM. Knowledge Laboratory, 2014. 557 p. (Methods in chemistry).
2. Breitmaier E. Structure elucidation by NMR in organic chemistry: practical guide. 3rd revised ed., New York: Wiley, 2002.
3. Claridge T. D. W. High-resolution NMR techniques in organic chemistry. Elsevier science. Oxford, UK, 1999.
4. Becker E. D. High-resolution NMR: theory and chemical applications. 3rd ed. New York : Academic press, 1999.
5. Zhdanov Y. A., Minkin V. I. Correlation analysis in organic chemistry. M. : Publishing house in literature, 1966. 472 p.

© Моргунова Н. А., Товбис М. С., 2020

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ КИНЕТИКИ ВЫСОКОЭЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. Р. Пен, С. И. Левченко*, К. А. Коляда

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: levchenko167@inbox.ru

Показано, что механические модели кинетики высокоэластической деформации эластомеров могут быть переформулированы в формализме теории автоматического управления.

Ключевые слова: технология эластомеров, механическая модель, передаточная функция, идентификация систем

ESTIMATION OF THE PARAMETERS OF A MECHANICAL MODEL IN STUDYING THE KINETICS OF HIGH ELASTIC DEFORMATION OF POLYMERIC MATERIALS

V. R. Pen, S. I. Levchenko*, K. A. Kolyada

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: levchenko167@inbox.ru

It is shown that the mechanical models of the kinetics of the highly elastic deformation of elastomers can be reformulated in the formalism of the theory of automatic control.

Keywords: elastomer technology, mechanical model, transfer function, identification of systems.

Полимеры применяют для изготовления деталей и конструкций, работающих при самых разных механических воздействиях. Изучение механических свойств эластомеров и установление их связи со структурой занимает одно из центральных мест в исследовании высокомолекулярных соединений.

Для наглядного описания поведения полимеров в условиях механических нагрузжений применяется метод механической аналогии. Стандартная модель предполагает, что зависимость между напряжением, деформацией и временем для высокомолекулярных систем может быть описана уравнением вида:

$$a_0\sigma + a_1 \frac{d\sigma}{dt} + \dots + a_n \frac{d^n\sigma}{dt^n} = b_0\gamma + b_1 \frac{d\gamma}{dt} + \dots + b_m \frac{d^m\gamma}{dt^m}, \quad (1)$$

где σ – напряжение; γ – деформация; a_n, b_m – постоянные коэффициенты, определяющие механические свойства полимера [1; 2].

Это уравнение справедливо для механических моделей Максвелла, Кельвина-Фойгта, обобщенной модели Максвелла-Кельвина-Фойгта. Задачей экспериментатора является определение по заданной экспериментальной кривой (рис. 1) величин, характеризующих полимерную систему.

В проведенном исследовании применен метод аналогий с теорией автоматического управления [3].

Полагая, что задающим воздействием будет ступенчатая функция $\sigma_0 1(t)$ и используя преобразование Лапласа при нулевых начальных условиях, получим передаточную функцию

$$W = \frac{N(p)}{L(p)}, \quad (2)$$

описывающую динамику деформаций и напряжений эластомеров.

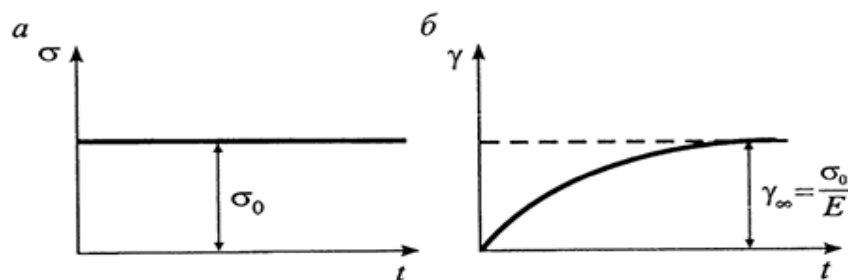


Рис. 1. Экспериментальная кривая зависимости напряжения и деформации от времени

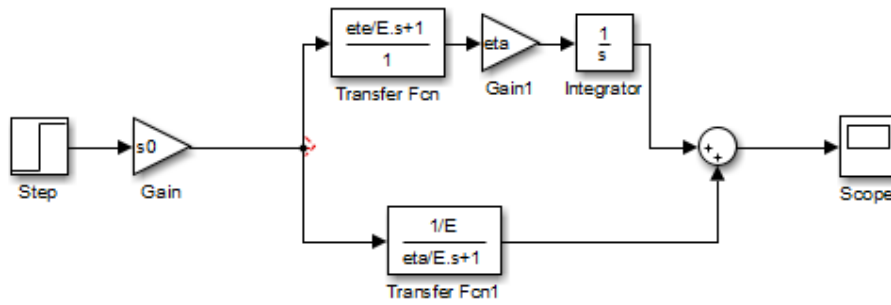


Рис. 2. Имитационная модель

Рассмотрим стандартные модели теории [4; 5]. Для модели Максвелла, как известно, состоящей из пружины и демпфера, уравнение динамики имеет вид

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} \sigma, \quad (3)$$

где E – модуль упругости; η – вязкость. Соответственно имеем передаточную функцию вида

$$W_1 = \frac{\eta}{p} \left(\frac{\eta}{E} p + 1 \right). \quad (4)$$

То есть произведение форсирующего звена, в котором η имеет смысл коэффициента усиления, а η/E – постоянной времени, на интегрирующее звено.

Для модели Кельвина–Фойгта

$$\eta \frac{d\gamma}{dt} + E\gamma = \sigma. \quad (5)$$

Соответственно передаточная функция

$$W_2 = \frac{1}{\frac{\eta}{E} p + 1}, \quad (6)$$

что соответствует аperiodическому звену первого порядка, где $1/E$ есть коэффициент усиления, а η/E – постоянная времени.

Для модели Максвелла–Кельвина – Фойгта:

$$\gamma = \gamma_{\text{упр}} + \gamma_{\text{в.эл}} + \gamma_{\text{пл}} \quad (7)$$

Соответственно передаточная функция такой системы W

$$W = W_1 + W_2. \quad (8)$$

Имитационная модель в MATLAB представлена на рис. 2.

Параметры модели легко определяются в системе MATLAB в System Identification Toolbox.

Таким образом, использование представленного подхода позволяет установить закономерности влияния природы полимера, структуры вулканизационных сеток на реологические и физико-механические свойства получаемых эластомерных композиций, ре-

шать задачу определения E , η и других параметров из экспериментальных данных с помощью мощного инструментария системы MATLAB.

Библиографические ссылки

1. Новаков И. А. Реологические и вулканизационные свойства эластомерных композиций. М. : ИКЦ «Академкнига», 2006. 332 с.
2. Кленин В. И., Федусенко И. В. Высокомолекулярные соединения. СПб. : Лань, 2013. 499 с.
3. Пупков К. А. Методы современной теории автоматического управления. Т. 1. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 782 с.
4. Гуль В. Е., Кулезнев В. Н. Структура и механические свойства полимеров. М. : Высш. шк., 1989. 352 с.
5. Бартенев Г. М., Бартенева А. Г. Релаксационные свойства полимеров. М. : Химия, 1992. 383 с.

References

1. Novakov I. A. Novakov I. A. *Reologicheskie i vulkanizacionnyye svoystva elastomernykh kompozicij* [Rheological and cyclonic properties of elastomeric compositions]. M. : ICC “Akademkniga”, 2006. 332 p.
2. Klenin V. I., Fedusenko I. V. *Vysokomolekulyarnyye soedineniya* [High-molecular compounds]. SPb. : Lan, 2013. 499 p.
3. Pupkov K. A. *Metody sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of the modern theory of automatic control]. Vol. 1. M. : Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Bauman, 2004. 782 p.
4. Gul' V. E., Kuleznev V. N. *Struktura i mekhanicheskie svoystva polimerov* [Structure and mechanical properties of polymer]. M. : Vysshaya shkola, 1989. 352 p.
5. Bartenev G. M., Barteneva A. G. *Relaksacionnyye svoystva polimerov* [Relaxation properties of polymers]. M. : Himiya, 1992. 383 p.

© Пен В. Р., Левченко С. И., Коляда К. А., 2020

УДК 547.821

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО СТРОЕНИЯ 3(5)-ХЛОРФЕНИЛ-4-АМИНО-5(3)-ПИРИДИН-3-ИЛ-1Н-ПИРАЗОЛА МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

И. С. Пономарев*, А. С. Косицына, А. А. Кукушкин, Е. В. Роот

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

*E-mail: il.ponomarew@yandex.ru

Доказательство строения 4-аминопиразола, с пара-хлорфенильным заместителем, содержащего пиридиноый фрагмент масс-спектрометрическим методом.

Ключевые слова: 4-нитропиразол, 4-аминопиразол, бета-пиридиновый фрагмент, пара-хлорфенильный заместитель, восстановление, масс-спектрометрия.

PROOF OF THE STRUCTURE OF 3 (5) -CHLOROPHENYL-4-AMINO-5 (3) -PYRIDIN-3-IL-1H-PYRAZOLE BY MASS SPECTROMETRY

I. S. Ponomarev *, A. S. Kositsyna, A. A. Kukushkin, E. V. Root

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: il.ponomarew@yandex.ru

Proof of the structure of 4-aminopyrazole, with a para-chlorophenyl substituent, containing a pyridine moiety by mass spectrometry.

Keywords: 4-nitrosopyrazole, 4-aminopyrazole, beta-pyridine fragment, para-chlorophenyl substituent, reduction, mass-spectrometry.

Производные пиразолов успешно и давно используются в различных областях химической промышленности. В том числе, данный класс соединений является основой для многих лекарственных средств [1]. Так, например, 4-аминопиразолы входят в состав препаратов, которые применяются в качестве болеутоляющих, жаропонижающих и противовоспалительных средств.

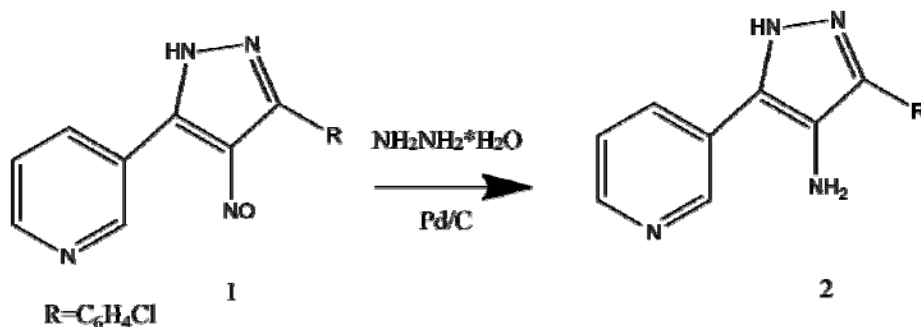
Введение в пиразол пиридинового фрагмента, который играет ключевую роль в некоторых биологических процессах, может положительно повлиять на потенциальную биологическую активность соединений [2].

Ранее на кафедре ОХТ СибГУ им. М.Ф. Решетнева был получен 3(5)-(4-хлор)фенил-4-нитрозо-5(3)-пиридин-3-ил-1Н-пиразол(2), который восстанавлива-

ли двукратным избытком гидразин гидрата в присутствии катализатора палладий на угле [3] (см. рисунок).

В результате был получен в виде светло-желтых кристаллов 4-аминопиразол, содержащий одновременно β-пиридиновый фрагмент и хлорфенильный заместитель. Структура полученного соединения не была подтверждена физико-химическими методами, поэтому целью данной работы является исследование 3(5)-(4-хлор)фенил-4-нитрозо-5(3)-пиридин-3-ил-1Н-пиразол масс-спектрометрическим методом [4].

Регистрация масс-спектра проводилась на квадрупольном приборе Shimadzu LC/MS-2020 с колонкой RAPTOR ARC-18 100 (диаметр 2,1 мм, зернистость 0,1 мм, длина 100 мм) в изократическом режиме при температуре 35 °С в термостатируемой колонке.



Восстановление 4-нитропиразола до аминопиразола

Масс-спектры записывали при прямом вводе образца с концентрацией 0,02 мг/мл в метиловом спирте и элюата, подаваемого хроматографом со скоростью 0,001 см³/мин. Для получения интенсивного пика были подобраны следующие условия масс-детектирования: положительная и отрицательная поляризации, напряжение электроспрея 6000 В, потенциал декластеризации и потенциал ввода – 60 В при давлении газа завесы 5,0 л/мин и газа распыления 5,0 л/мин. Диапазон сканирования составлял 20–500 Да.

В масс-спектре был обнаружен молекулярный ион с m/z 270. Согласно «азотному правилу» четная молекулярная масса подтверждает наличие в молекуле четного количества атомов азота. По интенсивности изотопного пика ($M+2$), более 3% по сравнению с интенсивностью пика молекулярного иона, можно сделать вывод о наличии галогена в исследуемом соединении. Это так же подтверждается нахождением в масс-спектре ионов с m/z 112 и 114, что характерно для хлорфенильного фрагмента [5]. Учитывая вклад изотопов некоторых элементов в величину пика ($M+1$) и ($M+2$), делаем вывод о том, что в молекуле содержится 14 атомов углерода, 11 атомов водорода, 4 атома азота, 1 атом хлора. На основании анализа масс-спектра пиразола (2) была подтверждена предполагаемая брутто-формула $C_{14}H_{11}ClN_4$.

Ранее методом масс-спектрометрии был исследован исходный нитрозопиразол (1) в спектре которого были обнаружены осколочные ионы m/z : 77, 64, 50, они также были обнаружены в масс-спектре изучаемого 4-аминопиразола, что может является косвенным доказательством его строения и указывают на наличие пиридинового кольца.

Библиографические ссылки

1. Машковский М. Д. Лекарственные вещества. Пособие по фармакологии для врачей. М. : Медицина, 1985. 620 с.

2. Глущенко Н. Н., Плетенева Т. В., Попков В. А. Фармацевтическая химия : учебник. М. : Академия, 2004. 384 с.

3. Синтез 4-нитрозопиразолов, содержащих β -пиридиновый фрагмент / А. А. кукушкин, Е. В. Рот, Е. В. Гончаров, Г. А. Субоч // Молодёжь, наука и инновации : Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Махачкала, 2009. 413 с.

4. Бочкарев В. Н., Поливанов А. Н., Фалько В. С. Масс-спектры положительных и отрицательных ионов линейных метил фенилсилоксанов // Журнал общей химии 1978. Т. 48. С. 858–861.

5. Будзикович Г., Джерасси К., Уильямс Д. Интерпретация масс-спектров органических соединений. М. : Мир, 1966. 169 с.

References

1. Mashkovskiy M. D. Lekarstvennyye veshchestva. Posobiye po farmakologii dlya vrachey. M. : Meditsina, 1985. 620 p.

2. Glushchenko N. N., Pleteneva T. V., Popkov V. A. Farmatsevticheskaya khimiya : uchebnik. M. : Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2004. 384 p.

3. Sintez 4-nitrozopirazolov, soderzhashchikh β -piridinovyy fragment / A. A. kukushkin, Ye. V. Root, Ye. V. Goncharov, G. A. Suboch // Molodozh', nauka i innovatsii : Vseros. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykhuchenykh. Makhachkala, 2009. 413 p.

4. Bochkarev V. N., Polivanov A. N., Fal'ko V. S. Mass-spektry polozhitel'nykh i otritsatel'nykh ionov lineynykh metil fenilsiloksanov // Zhurnal obshchey khimii 1978. T. 48. P. 858–861.

5. Budzikiewicz H., Djerassi C., Williams H. Interpretation of mass spectra of organic compounds. M. : Mir, 1966. 169 p.

© Пономарев И. С., Косицына А. С.,
Кукушкин А. А., Рот Е. В., 2020

УДК 547.772.1

**МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИНТЕЗА
3(5)-ФЕНИЛ-4-АМИНО-5(3)-ПИРИДИН-4-ИЛ-1Н-ПИРАЗОЛА***

П. С. Рибий*, А. А. Кукушкин, Е. В. Рюот

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

*E-mail: polyariby@gmail.com

Приведены результаты масс-спектрометрического анализа синтеза 3(5)-фенил-4-амино-5(3)-пиридин-4-ил-1Н-пиразола. Известно, что пиразолы аналогичного строения успешно используются в качестве химического ракетного топлива.

Ключевые слова: пиразол, 4-аминопиразол, γ -пиридиновый заместитель, фенильный заместитель, масс-спектрометрия, идентификация.

**MASS SPECTROMETRIC ANALYSIS OF THE SYNTHESIS
OF 3(5)-PHENYL-4-AMINO-5(3)-PYRIDIN-4-IL-1H-PYRAZOLE**

P. S. Ribiy*, A. A. Kukushkin, E. V. Root

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: polyariby@gmail.com

This paper presents the results of mass spectrometric analysis of the synthesized previously 3(5)-phenyl-4-nitroso-5(3)-pyridin-4-yl-1h-pyrazole. It is known that similar pyrazoles are successfully used as chemical rocket fuel.

Keywords: pyrazole, 4-aminopyrazole, γ -pyridine substituent, phenyl substituent, mass spectrometry, identification.

Ранее на кафедре ОХТ СибГУ им. М. Ф. Решетнева была проведена циклоконденсация 2-гидроксиимино-1-фенил-3-пиридин-4-ил-пропан-1,3-диона с гидразин гидратом [1]. Полученный 3(5)-фенил-4-нитрозо-5(3)-пиридин-4-ил был восстановлен до соответствующего амина (рис. 1). До настоящего времени синтез 3(5)-фенил-4-амино-5(3)-пиридин-4-ил-1Н-пиразола не был изучен с помощью метода масс-спектрометрии. Поэтому целью нашей работы было выбрано применение масс-спектрометрического метода для исследования данной реакции.

Регистрация 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).

Исследуемый образец готовили с концентрацией 0,01 мг/мл в метаноле, запись проводили в изократическом режиме, при $t = 35\text{ }^\circ\text{C}$ в термостатируемой колонке [2–3].

В масс-спектре 3(5)-фенил-4-амино-5(3)-пиридин-4-ил-1Н-пиразола (рис. 2) имеется молекулярный ион (m/z 236) интенсивностью 100 %, соответствующий рассчитанному.

Анализируя спектральные данные, можно отметить, что все пики полученного 4-аминопиразола ($M^+=105, 77, 64, 50$) аналогичны соответствующим пикам пиридилсодержащего 4-нитрозопиразола (рис. 3), что свидетельствует о прохождении реакции восстановления только по нитрозогруппе, не нарушая пиридиновый цикл [4].

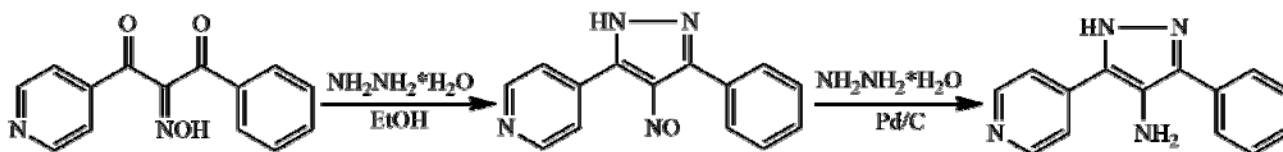


Рис. 1. Схема синтеза 3(5)-фенил-4-амино-5(3)-пиридин-4-ил-1Н-пиразола

*Работа выполнена на базе СКБ «Молекулярный дизайн», СибГУ им. М. Ф. Решетнева

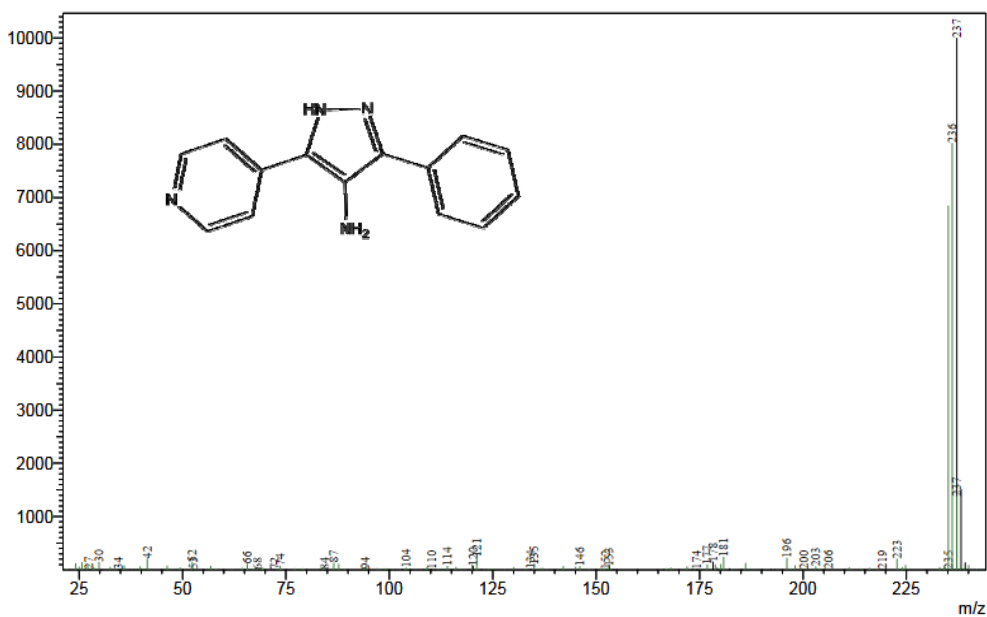


Рис. 2. Масс-спектр 3(5)-фенил-4-амино-5(3)-пиридин-4-ил-1Н-пирозола

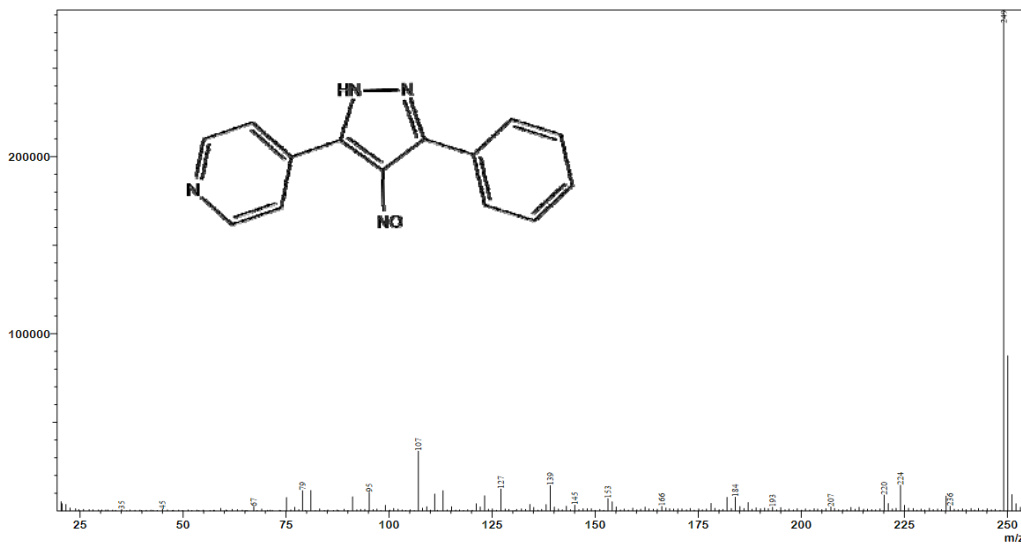


Рис. 3. Масс-спектр 3(5)-фенил-4-нитрозо-5(3)-пиридин-4-ил-1Н-пирозола

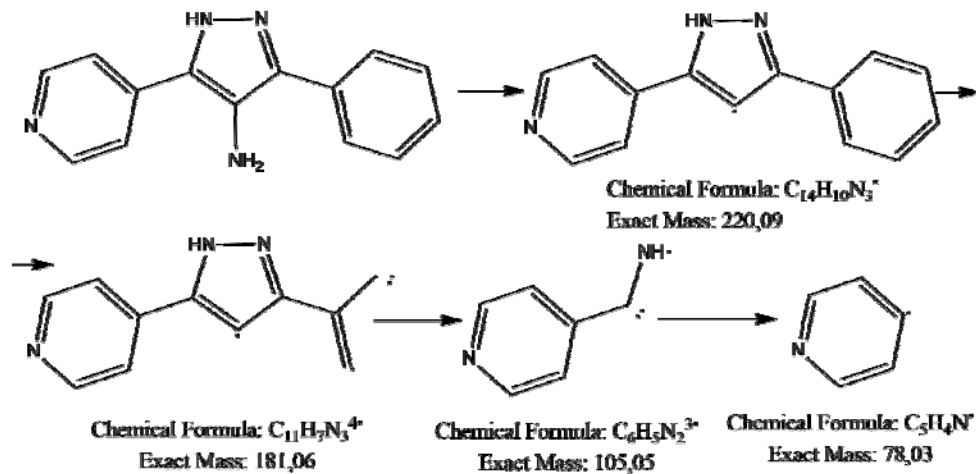


Рис. 4. Схема фрагментации 3(5)-фенил-4-амино-5(3)-пиридин-4-ил-1Н-пирозола

На основе имеющихся данных масс-спектрометрии можно предположить следующую схему фрагментации, [5] представленную на рис. 4.

Таким образом, образование целевого продукта, 3(5)-фенил-4-амино-5(3)-пиридин-4-ил-1Н-пиразола, в ходе исследуемой реакции подтверждено методом масс-спектрометрии: m/z 236[M⁺], 220, 181, 105, 77, 64, 50

Библиографические ссылки

1. Кукушкин А. А., Рот Е. В., Субоч Г. А. и др. // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2012. Т. 55, вып. 8. С. 124–125.
2. Гордон А., Р. Форд Спутник химика. Физико-химические свойства, методики, библиография : справ. пособие / пер. с англ. Е. Л. Розенберга, С. И. Коппель. М. : Мир, 1976. 542 с.
3. Сильверстейн Р., Вебстер Ф., Кимл Д. Спектрометрическая идентификация соединений : пер. с англ. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. 557 с.
4. Тахистов В. В. Органическая масс-спектрометрия. Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1990. 222 с.

5. Винарский В. А., Юрченко Р. А. Масс-спектрометрия и хромато-масс-спектральный анализ : пособие. Минск : БГУ, 2013. 135с.

References

1. Kukushkin A. A., Root E. V., Suboch G. A. et al. // News of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology. 2012. Vol. 55, № 8. P. 124–125.
2. Gordon A., Ford R. Companion of the chemist. Physical and chemical properties, techniques, bibliography : reference. manual / per. from english. E. L. Rosenberg, S. I. Koppel. M. : Mir, 1976. 542 p.
3. Silverstein R., Webster F., Kiml D. Spectrometric identification of compounds: trans. from English. M. : BINOM. Knowledge Laboratory, 2014. 557 p.
4. Takhistov V. V. Organicheskaya mass-spektrometriya [Organic mass spectrometry]. Leningrad : Science, 1990. 222 p.
5. Vinarsky V. A., Yurchenko R. A. Mass spectrometry and chromatography-mass spectral analysis : manual. Minsk : BSU, 2013. 135 p.

© Рибий П. С., Кукушкин А. А., Рот Е. В., 2020

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ СКИПИДАРА НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Т. А. Рябцева, О. А. Есякова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
 Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
 E-mail: Olga-LA83@mail.ru

Проведена оценка воздействия процесса очистки скипидара на окружающую среду. Рассмотрены основные существующие технологические решения природоохранного назначения в химической промышленности. Проанализированы их достоинства и недостатки. Предложены альтернативные варианты осуществления очистки скипидара с учетом оптимизации процесса.

Ключевые слова: сульфитный скипидар, химическая промышленность, экологичность, очистка.

THE IMPACT OF THE TURPENTINE PURIFICATION PROCESS ON THE ENVIRONMENT

Т. А. Ryabtseva, O. A. Esyakova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
 31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
 E-mail: Olga-LA83@mail.ru

The impact of the turpentine purification process on the environment has been assessed. The main existing technological solutions for environmental protection in the chemical industry are considered. Their advantages and disadvantages are analyzed. Alternative options for turpentine purification are proposed, taking into account the optimization of the process.

Keywords: sulfite turpentine, chemical industry, environmental friendliness, purification process.

Химическая промышленность, в частности производство дешевых органических растворителей, базируется на применении продуктов нефтехимического синтеза, и приводит к потенциальной угрозе загрязнения окружающей среды на всех этапах жизненного цикла нефти [1]. В связи с этим, актуальной остается проблема получения растворителей, отвечающих эксплуатационным характеристикам и безопасными в народном потреблении.

Эксплуатируемые на сегодняшний день целлюлозно-бумажные комбинаты по-прежнему в результате сульфатной варки целлюлозы сжигают побочные продукты, в том числе сульфатный скипидар, что является причиной залповых выбросов серосодержащих соединений в атмосферный воздух. Переход на комплексную переработку и рациональное использование скипидара способствует безотходному производству

и получению товарной продукции с достижением экономического и экологического эффектов.

Главным препятствием усовершенствования процесса переработки скипидара является отсутствие селективности превращений его основных компонентов и возможности их разделения. По этой причине скипидар находит свое применение лишь в лакокрасочной промышленности и требует особые условия использования в связи с опасными токсичными свойствами.

Однако, химический состав сульфатного скипидара (α - и β -пинены, α -терпинен, β -мирцен, 3-карен, камфен, трициклен и др.) при соответствующей очистке позволяет значительно расширить сферу потребления терпенов и их производных. На рис. 1 представлен состав основных монотерпеновых компонентов сульфатных скипидаров.

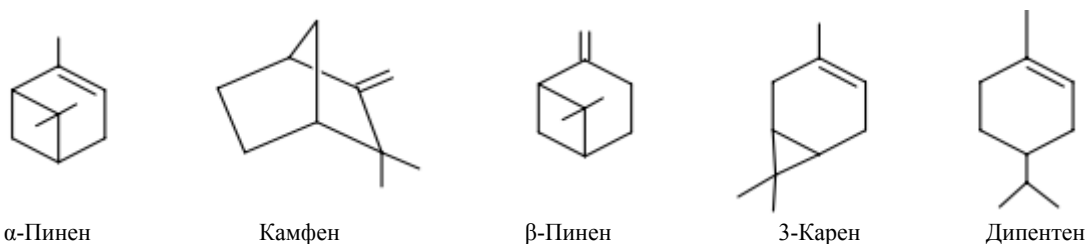


Рис. 1. Основные монотерпены сульфатного скипидара

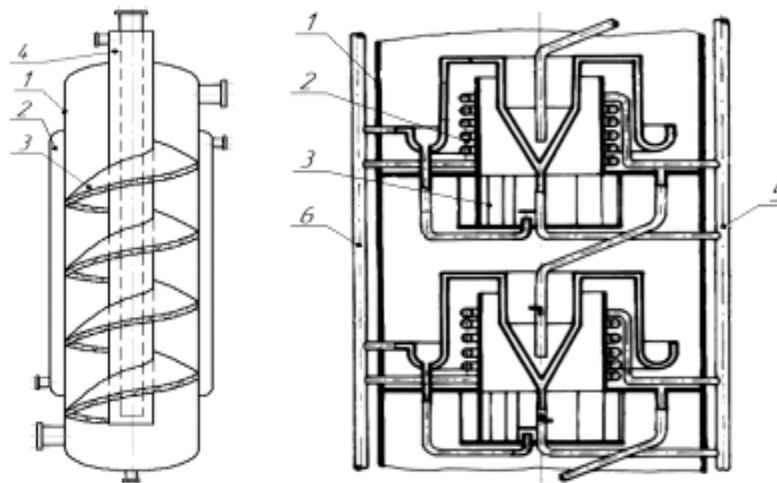
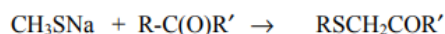
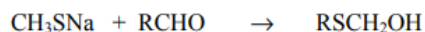
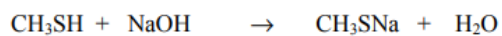


Рис. 2. Схема термической ректификационной колонны:
1 – корпус; 2 – теплообменник; 3 – контактное устройство;
4 – конденсатор; 5 – подвод пара; 6 – отвод конденсата

Отличительной особенностью состава сульфатного скипидара является наличие сернистых соединений – CH_3SH , $(\text{CH}_3)_2\text{S}$, $(\text{CH}_3\text{S})_2$ и высококипящих сероорганических соединений. Общее содержание серы в составе скипидара-сырца может варьировать от 0,5 до 1,5 масс. %. Однако, даже незначительное количество серы ограничивает использование скипидара в органическом синтезе, поскольку высока вероятность «отравления» используемых в каталитических процессах катализаторов.

Очищенный от примесей сернистых соединений сульфатный скипидар может успешно конкурировать с живичным во многих отраслях промышленности.

Осуществление десульфирования возможно посредством реакции тиоалкилирования карбонильных соединений и одновременной обработкой скипидара-сырца водным раствором щелочи [2], в результате чего образуется тиоспирт и кетосульфид:



Дальнейшая ректификация позволяет снизить содержание общей серы до 0,001 масс.%. Процесс ведут при глубоком вакууме в колоннах непрерывного действия, при противоточном взаимодействии стекающей жидкости с поднимающимся паром. В результате образование пара происходит за счет испарения стекающей по контактными ступеням в куб колонны флегмы, созданной из пара в дефлегматоре, а получение дополнительной флегмы при конденсации части паров разделяемых компонентов по высоте колонны реализуется на охлаждаемой поверхности [3; 4]. Схема ректификационной колонны представлена на рис. 2.

Терпены и их производные при реализации селективной очистки от сернистых соединений находят широкое применение [5] в органическом синтезе биологически активных веществ, гербицидов, пестицидов, антиоксидантов, в парфюмерной промышленности для получения душистых веществ (цитронеллол, гераниол, нерол, и др.), для синтеза соединений, обладающих инсектицидной, репеллентной, противовоспалительной, антимикробной и другими видами биологической активности, а выделенные серосодержащие соединения могут применяться в органическом синтезе для получения растворителей, красителей, ионообменных смол, в синтезе моющих средств и реагентов для химической промышленности (тиолсульфонатов, сульфоксидов).

Библиографические ссылки

1. Экологические проблемы лесной, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности и пути их решения [Электронный ресурс]. URL: https://studopedia.su/5_20775_ekologicheskie-problemi-lesnoy-derevoobrabativayushchey-itsellyulozno-bumazhnaya-promishlennosti-i-puti-ih-resheniya.html (дата обращения: 04.05.2020).
2. Кутчин А., Карманова Л., Рубцова С., Загрязнение окружающей среды целлюлозно-бумажной промышленности. Серно-органические соединения сульфат-турпетин // Загрязнение окружающей среды (ICER'95) : Междунар. совместная конф. 1995. СПб., 1995. С. 31.
3. Пат. 2437698 Российская Федерация, МПК В01D3/14 С1. Способ ректификации / Войнов Н. А., Паньков В. А., Войнов А. Н. ; заяв. № 2010118012/05 ; заявл. 04.05.2010 ; опубл. 27.12.2011, Бюл. № 36. 7 с.
4. Войнов Н. А., Жукова О. П., Войнов А. Н. Колонна с высокой разделяющей способностью на основе термической ректификации // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сы-

рья : материалы науч.-практич. конф. Барнаул : Барнаул. изд-во Алтайский гос. технологич. ун-т, 2012. С. 433–434.

5. Золин Б. А. Технология получения новых продуктов на основе скипидара (опыт внедрения). М. : Наука, 1999. 20 с.

References

1. Ecological problems of the forest, woodworking and pulp and paper industry and ways to solve them [Electronic resource]. URL: https://studopedia.ru/5_20775_ekologicheskie-problemi-lesnoy-derevoobrabativayushchey-i-tsellyulozno-bumazhnaya-promishlennosti-i-puti-ih-resheniya.html (access: 04.05.2020)

2. Kutchin A., Karmanova L., Rubtsova S., Environmental pollution of pulp-and-paper industry Sulphur-organic compounds of sulphate-turpetine //

Environmental Pollution (ICEP'95) The 1995 International co-conferences. SPb., 1995. P. 31.

3. Pat. 2437698 Russian Federation, IPC B01D3/14 C1. Method of rectification / Voynov N. A., Pankov V. A., Voynov A. N. ; applicant № 2010118012/05 ; application 04.05.2010 ; publ. 27.12.2011, Bul. № 36. 7 p.

4. Voynov N. A., Zhukova O. P., Voynov A. N. Column with high separation capacity based on thermal rectification // New achievements in chemistry and chemical technology of plant raw materials : materials of scientific and practical conference Barnaul, 24.04.2012.- Barnaul, publishing house of the Altai state technological University, 2012. P. 433-434.

5. Zolin B. A. Technology of obtaining new products based on turpentine (introduction experience.). М. : Science. 1999. 20 p.

© Рябцева Т. А., Есякова О. А., 2020

УДК 621.6.09:534.01

АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

А. А. Снежко, С. А. Плотников, А. Ю. Семенова, Е. А. Карелина, Т. А. Пчелкина

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

При производстве ракетной техники и летательных аппаратов особое значение приобретает контроль качества, в том числе, контроль фактического состава материала, выступающий гарантом повышения ресурса работы космических аппаратов в критических условиях. Проведен анализ эффективности методов химического состава металлов и сплавов.

Ключевые слова: качество деталей, методы контроля, химический состав.

ANALYSIS OF CHEMICAL COMPOSITION CONTROL METHODS METALLIC MATERIAL

A. A. Snezhko, S. A. Plotnikov, A. Yu. Semyonova, E. A. Karelina, T. A. Pchelkina

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

In the production of rocket technology and aircraft, quality control is of particular importance, including control of the actual composition of the material, which acts as a guarantee of increasing the service life of spacecraft in critical conditions. The paper analyzes the effectiveness of methods for the chemical composition of metals and alloys.

Keywords: quality of parts, control methods, chemical composition.

Химический анализ материала может быть использован при определении режимов резанья при физико-химической обработке в части образования жидкой и газообразной фазы.

Наличие протокола фактического состава материала позволяет гарантировать повышение ресурса работы космических аппаратов в критических условиях.

Стоимость выполнения работ по контролю химсостава перед запуском в производство, а также контроль заготовок в цехах компенсируется получением изделий с заданными характеристиками до момента испытания или момента критических нагрузок.

В связи с наводнением рынка металлопроката большим количеством торгующих организаций конечный потребитель металлопродукции все чаще сталкивается с проблемой несоответствия металла заявленному сертификату. При отсутствии у потребителя средств контроля для подтверждения марки металла такое несоответствие может выявиться только в процессе производства или, что гораздо хуже, в процессе испытаний или эксплуатации готовой продукции. Последствия и величина финансовых потерь в такой ситуации сильно зависят от типа производимой продукции и объемов производства [1].

Все поступающие на предприятие материалы должны проходить входной контроль качества, включающий в себя верификацию, проверку сопроводи-

тельных документов, паспортов качества, сертификатов и т. д. Далее материалы проходят испытания в объеме, предусмотренном стандартами. Металлические материалы кроме механических испытаний, анализируются на соответствие химического состава заявленным НД [2]. В заготовительных и механосборочных цехах проводится сплошной контроль заготовок всех видов металлических материалов на соответствие марки с отметкой в сопроводительной документации.

Для анализа химического состава металлов и сплавов в основном применяются следующие методы:

1. Метод мокрой химии. Является арбитражным методом. Самый точный, но при этом дорогостоящий и длительный. Проба не сохраняется. Требуется пробоподготовка и очень высокие требования к квалификации персонала.

2. Стилоскопирование. Является качественным экспресс-методом. Основные недостатки: субъективность, сложность обучения персонала, невозможность работать с деталями, т.к. на образце остается глубокий прожег. Стилоскоп относится к визуальному эмиссионному спектральному анализу. По сути, он является простейшим спектральным анализатором. Назначение этого прибора – визуальный качественный и, в лучшем случае, полуколичественный спектральный анализ металлов и сплавов в видимой области спектра, к точности которого не предъявляется

серьезных требований. Вследствие того, что химический состав материалов анализируется визуально и только потом делается вывод о принадлежности материалов к определенной группе марок, велика часть субъективного фактора в достоверности результатов анализа. Отсюда выше риск брака на разных стадиях производства с вытекающими отсюда непрофильными материальными затратами. Кроме того, имеется определенная сложность в подготовке стилоскописта в силу специфики оборудования.

3. Оптико-эмиссионный. Приборы, реализующие данный метод получили широкое распространение. Точность анализа, при должной пробоподготовке и использовании защитной среды (инертного газа) достигает точности метода мокрой химии. При этом требования к квалификации обслуживающего персонала ниже. Также большим плюсом является скорость анализа, повторяемость и лабораторная прецизионность метода.

4. Измерение электропроводности. В металлведении электропроводность с давних пор рассматривалась как ценный вспомогательный параметр для изучения состава и свойств материалов. Вихретоковый измеритель определенного типа позволяет установить зависимость электропроводности металлов от наличия различных примесей и решить обратную задачу – по электропроводности и составу примесей определить их количество [3].

Для одной и той же марки сплава наблюдается разброс в показаниях электропроводности до 2–3 м/Ом·мм² [4]. Это объясняется существенными флуктуациями содержания примеси в составе сплава. Определить доверительный интервал значений электропроводности каждого сплава можно статистическими методами обработки данных.

При использовании индукционных вихретоковых измерителей определенного типа для измерения электропроводности слабомагнитных материалов достаточно приложить датчик к поверхности исследуемого объекта. Кроме того, такой неразрушающий метод не требует изготовления специальных образцов, и дает возможность в течение нескольких секунд измерить электропроводность на любом участке детали.

Для определения значения поправки на краевой эффект при измерении электропроводности объектов контроля, имеющих небольшую площадку для измерения измеряют кажущуюся электропроводность образцов разного диаметра с торцевой поверхности. Вихретоковый преобразователь устанавливают по центру каждого образца. Результаты измерений электропроводности сводят в экспериментальный график. Значение поправки определяют по графику как разность между значением электропроводности образца наибольшего диаметра и кажущейся электропроводностью образца диаметром, соответствующим диаметру исследуемого объекта. Значения поправки определяются для каждого вихретокового измерения [4].

Значение поправки на толщину при измерении электропроводности тонкостенных объектов также определяют по экспериментальному графику, предварительно выстроенному по результатам измерения

контроля кажущейся электропроводности образцов разной толщины. Поправку уточняют по графику для каждого вихретокового измерения.

Эффективный, недорогой метод подтверждения оригинальности деталей, выполняемый посредством портативного оборудования, может стать основой метрологического обеспечения качества контроля химического состава.

5. Одним из перспективных методов обеспечения выполнения многокомпонентных исследований атомарного состава сталей является рентгено-флуоресцентный анализ (РФА) [5]. Рентгено-флуоресцентный анализ основан на сборе и последующем анализе спектра, возникающего при облучении исследуемого материала рентгеновским излучением. Особо широко применяются мобильные РФ анализаторы. Скорость и приемлемая точность анализа необходима в первую очередь на входном контроле складов. Данный метод позволяет ввести 100 % входной контроль металлических материалов, не требует сложной пробоподготовки и квалификации персонала. Также, в отличие от предыдущих методов, детали не получают поврежденный поверхностного слоя, что позволяет использовать их после анализа.

Прогрессивным прецизионным устройством измерения считается портативный анализатор металлов и сплавов модели X-MET 8000 Oxford Instruments.

По результатам проведенных экспериментальных инструментальных измерений можно отметить, что наблюдалась хорошая повторяемость и воспроизводимость; высокая скорость анализа с минимальным временем подготовки проб; операции, выполнены без повреждения объекта исследования. Возникающие нестационарные вариации численных значений при анализе легких элементов устранялись по теории робастности [6].

Данный способ подходит для усиления контроля качества металлопродукции, поступающей на производство [7], а в качестве предварительного метода контроля можно рекомендовать определение химического состава по электропроводности.

Библиографические ссылки

1. Входной контроль металла [Электронный ресурс] URL: http://www.synercon.ru/catalog/statii/statii/vhodnoi_kontrol/ (дата обращения 10.09.2020).
2. СТО 06606330-0087–2009 Система менеджмента качества. Металлические материалы и полуфабрикаты. Входной контроль и контрольные испытания перед запуском в производство. ОАО «Красмаш», 2009
3. Контроль и влияние примеси на электропроводность некоторых металлов [Электронный ресурс] URL: <https://helpiks.org/3-77697.html> (дата обращения 24.05.2020).
4. ГОСТ 27333–87 Контроль неразрушающий. Измерение удельной электрической проводимости цветных металлов вихретоковым методом. Контроль неразрушающий. М. : Изд-во стандартов, 2005.
5. Золотов Ю. А. О развитии рентгенофлуоресцентного анализа в России // Аналитическая химия. 2015. Т. 70, № 1. 5 с.

6. Раменская Е. В., Филиппов Ю. А. Механизм генерирования и распространения вибрации в технологических машинах // Вестник СибГАУ. 2012. № 1 (41). С. 132–138.

7. Основы, преимущества и недостатки количественного атомно-эмиссионного анализа с использованием фотоэлектрического детектирования [Электронный ресурс] URL: <https://megalektsii.ru/s29376t9.html> (дата обращения 24.05.2020).

References

1. *Vkhodnoy kontrol' metalla* [Incoming inspection of metal] (In Russ.) [Electronic resource]. URL: http://www.synercon.ru/catalog/statii/statii/vhodnoi_kontrol/ (access: 10.09.2020).

2. *STO 06606330-0087–2009. Sistema menedzhmenta kachestva. Metallicheskiye materialy i polufabrikaty. Vkhodnoy kontrol' i kontrol'nyye ispytaniya pered zapuskom v proizvodstvo.* [Quality management system. Metallic materials and semi-finished products. Incoming inspection and control tests before starting production]. LLC "Kras mash", 2009.

3. *Kontrol' i vliyaniye primesi na elektroprovodnost' nekotorykh metallov* [Control and influence of impurities on the electrical conductivity of some metals] (In Russ.) [Electronic resource]. URL: <https://helpiks.org/3-77697.html> (access: 24.05.2020)

4. *GOST 27333–87 Kontrol' nerazrushayushchiy. Izmereniye udel'noy elektricheskoy provodimosti tsvetnykh metallov vikhretkovym metodom. Kontrol' nerazrushayushchiy* [State Standard 27333–87 Non-destructive testing. Measurement of electrical conductivity of non-ferrous metals by eddy current method. Non-destructive testing]. М. : Standart inform Publ., 2005.

5. Zolotov Yu. A. *O razvitii rentgenofluorestsentnogo analiza v Rossii* // *Analiticheskaya khimiya* [On the development of X-ray fluorescence analysis in Russia // Analytical chemistry]. 2015. Vol. 70, № 1. 5 p.

6. Ramenskaya E. V., Filippov Yu.A. *Mekhanizm generirovaniya i rasprostraneniya vibratsii v tekhnologicheskikh mashinakh* [Mechanism of generation and propagation of vibration in technological machines] // *Vestnik SibGAU*. 2012. № 1 (41). P. 132–138 (In Russ.).

7. *Osnovy, preimushchestva i nedostatki kolichestvennogo atomno-emissionnogo analiza s ispol'zovaniyem fotoelektricheskogo detektirovaniya* [Basics, advantages and disadvantages of quantitative atomic emission analysis using photoelectric detection] (In Russ.) [Electronic resource]. URL: <https://megalektsii.ru/s29376t9.html> (access: 24.05.2020)

© Снежко А. А., Плотников С. А.,
Семенова А. Ю., Карелина Е. А.,
Пчелкина Т. А., 2020

УДК 628.312; 543.321; 639.331.2; 637.12.04/07

АНАЛИЗ МОЛОКА И МИНЕРАЛЬНОЙ ВОДЫ

П. В. Телегина, П. Н. Мамедов, Т. А. Лунева, Д. Г. Слащинин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: sgd1987@mail.ru

На сегодняшний день известно большое разнообразие минеральной воды и молока, которые употребляются ежедневно. Рассмотрены некоторые показатели (кислотность и жесткость) минеральной воды и молока.

Ключевые слова: общая жесткость, кальций, магний, медь, кислотность, сульфато-гидрокарбонатные минеральные воды, гидрокарбонатные натриевые минеральные воды, молоко, титриметрический метод анализа.

ANALYSIS OF MILK AND MINERAL WATER

P. V. Telegina, P. N. Mamedov, T. A. Luneva, D. G. Slashchinin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: sgd1987@mail.ru

Currently there is a wide variety of mineral water and milk that are consumed by a person daily. The article examines some indicators (acidity and hardness) of mineral water and milk.

Keywords: total hardness, calcium, magnesium, copper, acidity, sulphate-bicarbonate mineral waters, sodium bicarbonate mineral waters, milk, titrimetric method of analysis.

Сегодня известно огромное количество минеральной воды и молока, которые употребляются повсеместно. В России широко известны такие марки воды, как Боржоми, Нарзан, Эссентуки, Хан-Куль, Святой источник, Perrier, S.Pellegrino и другие. В России находятся крупные источники воды – на Камчатке и в Приморье. В сибирском регионе широко известны минеральные воды Карачинская, Кожановская, Тагарская, Боржоми, Нарзан, Эссентуки, Хан-Куль, Святой источник.

В торговую сеть, на прилавки магазинов, поступают минеральные воды абсолютно всех производителей. При выборе воды следует учитывать не только происхождение, но и химический состав. Как правило, на этикетке приводится химический состав в граммах или миллиграммах на литр (ммоль/л или мг-экв/дм). Определить состав по данным на этикетке трудно, особенно неспециалисту [1].

Основной целью нашей работы – стало определение титриметрическим методом (ГОСТ 2874–82) общей жесткости минеральной воды разных производителей и показателя кислотности этих же видов минеральной воды и молока.

Определение общей жесткости минеральной воды [2; 3] и показателя кислотности [4] проводилось титриметрическим методом анализа. В каждом анализе проводилось три параллельных опыта, результаты сравнивали с заявленными производителем данными

на этикетках бутылок. В качестве образцов брали следующие минеральные воды: Хан-Куль (1 партия), Хан-Куль (2 партия), Эссентуки №17, Perrier, АКВА минерале, Нарзан, Боржоми, S.Pellegrino, Святой источник.

В результате анализа получили следующие данные по жесткости минеральной воды:

– Хан-Куль (1 партия) – общая жесткость = $21,5 \pm 0,1$ мг-экв/дм³;

– Хан-Куль (2 партия) – общая жесткость = $19,7 \pm 0,1$ мг-экв/дм³;

– Эссентуки №17 – общая жесткость = $28,3 \pm 0,1$ мг-экв/дм³;

– Perrier – общая жесткость = $16,6 \pm 0,1$ мг-экв/дм³;

– АКВА минерале – общая жесткость = $1,8 \pm 0,1$ мг-экв/дм³;

– Нарзан – общая жесткость = $56,3 \pm 0,1$ мг-экв/дм³;

– Боржоми – общая жесткость = $13,6 \pm 0,1$ мг-экв/дм³;

– S.Pellegrino – общая жесткость = $25,8 \pm 0,1$ мг-экв/дм³;

– Святой источник – общая жесткость = $6,2 \pm 0,1$ мг-экв/дм³;

Данные по кислотности минеральной воды:
– Хан-Куль – показателя кислотности = $4,1 \pm 0,1$;
– Эссентуки №17 – показателя кислотности = $3,2 \pm 0,1$;

- Perrier – показателя кислотности = $4,0 \pm 0,1$;
- АКВА минерале – показателя кислотности = $4,2 \pm 0,1$;
- Нарзан – показателя кислотности = $3,7 \pm 0,1$;
- Боржоми – показателя кислотности = $4,2 \pm 0,1$;
- S.Pellegrino – показателя кислотности = $4,8 \pm 0,1$;
- Святой источник – показателя кислотности = $2,1 \pm 0,1$.

Таким образом, в результате эксперимента было выявлено, что количество кальция и магния минимально в минеральной воде от производителя Aqua минерале и Святой источник. Делая вывод про общую жесткость воды, можно сказать, что очень мягкой являются АКВА минерале и Святой источник, однако Хан-Куль, Peggier, Боржоми можно отнести к воде средней жесткости, а Эссенуки № 17, Нарзан, S.Pellegrino можно отнести уже к жесткой воде. Однако показатель кислотности минимальный в минеральной воде Эссенуки №17 и Святой источник. Показатель кислотности у минеральной воды всех исследованных производителей имеет допустимо значение (заявленное на этикетке). Максимальное значение показателя кислотности имеет минеральная вода S.Pellegrino.

Анализируя молоко можно сказать, что химический состав молока очень богат. В нем в сбалансированных количествах содержатся все необходимые организму вещества: белки, жиры, витамины. При помощи молока может быть восполнена нехватка элементов, таких как фосфор, кальций и магний. В России широко известны такие марки молока, как Простоквашино, Семенишна, Сибержинка, Домик в деревне и многие другие марки и производители. При выборе молока следует учитывать химический состав. Показатель кислотности у молока был определен нами в данной работе – титриметрическим методом (ГОСТ 3624–92). Метод основан на нейтрализации кислот, содержащихся в продукте, раствором гидроксида натрия до заранее заданного значения $\text{pH} = 8,9$ с помощью блока автоматического титрования и индикации точки эквивалентности при помощи потенциометрического анализатора.

Оборудование и реактивы: анализатор потенциометрический с диапазоном измерения 4–10 ед. рН с ценой деления шкалы 0,05 ед. рН. Блок автоматического титрования, совместимый с потенциометрическим титратором и имеющий дозатор раствора (бюретку) вместимостью не менее 5 см^3 с ценой деления не более 0,05.

Ход работы: В стакан вместимостью 50 см^3 отмеривают 20 см^3 дистиллированной воды и 10 см^3 анализируемого продукта. Смесь тщательно перемешивают. В стакан помещают стержень магнитной мешалки и устанавливают стакан на магнитную мешалку, погружают электроды потенциометрического анализатора и сливную трубку дозатора блока автоматического титрования в стакан с продуктом. Включают кнопку «Пуск» блока автоматического титрования, а спустя 2–3 с, кнопку «Выдержка». Раствор гидроксида натрия при этом начинает поступать из дозатора блока в стакан с продуктом, нейтрализуя послед-

ний. По достижении точки эквивалентности ($\text{pH} = 8,9$) и истечении времени выдержки (30 с) процесс нейтрализации автоматически прекращается, а на панели блока автоматического титрования зажигается сигнал «Конец». Проводят отсчет количества раствора гидроксида натрия, затраченного на нейтрализацию [3; 5]. В каждом анализе проводилось три параллельных опыта, затем сравнивали результаты с заявленными производителем. В качестве образцов брали следующие марки молока: Простоквашино (молоко отборное), Семенишна (2,5 %), Сибержинка (3,5 %).

Обсуждение результатов по анализу молока: Кислотность в градусах Тернера находят умножением объема, раствора гидроксида натрия, затраченного на нейтрализацию определенного объема продукта, на следующие коэффициенты: 10 – для молока, молочного составного продукта, сливок, простокваши, ацидофильного молока, кефира, кумыса и других кисломолочных продуктов. Под градусами Тернера ($^{\circ}\text{T}$) понимают объем, см^3 водного раствора гидроксида натрия молярной концентрации $0,1 \text{ моль/дм}^3$, необходимый для нейтрализации 100 г (см^3) исследуемого продукта.

В результате анализа получили следующие данные:

- Простоквашино (молоко отборное) – показатель кислотности = $17 \pm 0,1 \text{ T}$;
- Семенишна (2,5%) – показатель кислотности = $20,5 \pm 0,1 \text{ T}$;
- Сибержинка (3,5%) – показатель кислотности = $18,5 \pm 0,1 \text{ T}$.

Выводы по экспериментальным данным анализа молока: в результате было выявлено, что показатель кислотности минимальный в молоке от производителя Простоквашино. Показатель кислотности по ГОСТ для молока в интервале от 15,99 до 20,99. Делая вывод про показатель кислотности молока, можно сказать, что все результаты образцов находятся в допустимых нормах [6].

Библиографические ссылки

1. ГОСТ 2874–82. Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством. Взамен ГОСТ 2874–73 ; введ. 1985-01-01. М. : Изд-во стандартов, 1997. 8 с.
2. РД 52.24.395–2007. Жесткость воды методика выполнения измерений титриметрическим методом с трилоном Б [Электронный ресурс]. Введ. 2007-09-01 // Техническая книга. URL: http://tehnokniga.com/library/rd/rd_193 (дата обращения: 05.05.2018).
3. Таубе П. Р., Баранова А. Г. Практикум по химии воды : учеб. пособие. М. : Высшая школа, 1971. 128 с.
4. ГОСТ Р 54316–2011. Воды минеральные природные питьевые. Общие условия. Дата введения 2012-07-01. М., 2012.
5. ГОСТ 3624–92. Молоко и молочные продукты. Титриметрические методы определения кислотности. Дата введения 1994-01-01. М., 1994.

6. ГОСТ 31449–2013. Молоко. Технические условия. Дата введения 2014-71-01. М., 2014.

References

1. GOST 2874–82. Drinking water. *Hygiene requirements and quality control*. Instead of GOST 2874–73; Vved. 1985-01-01. М. : publishing house of standards, 1997. 8 p.

2. RD 52.24.395–2007. *Water hardness method of performing measurements by the titrimetric method with a Trilon B* [Electronic resource]. Vved. 2007-09-01 // Technical book. URL: http://tehnokniga.com/library/rd/rd_193 (access: 05.05.2018).

3. Taube P. R., Baranova A. G. *Practicum on water chemistry* : textbook. manual. М. : Higher school, 1971. 128 p.

4. GOST R 54316–2011. *Natural mineral drinking water. General conditions*. Date of introduction 2012-07-01. М., 2012.

5. GOST 3624–92. *Milk and dairy products. Titrimetric methods for determining acidity*. Date of introduction 1994-01-01. М., 1994.

6. ГОСТ 31449–2013. Milk. Technical conditions. Date of introduction 2014-71-01. М., 2014.

© Телегина П. В., Мамедов П. Н.,
Лунева Т. А., Слащинин Д. Г., 2020

УДК 66.081.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ УГЛЕРОДА В МЕМБРАНАХ ПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ*

И. А. Харченко^{1,2*}, А. В. Минаков¹, Е. В. Михлина², И. В. Немцев³, И. И. Рыжков^{1,2}

¹Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
²Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44
³Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН
Российская Федерация, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/38
*E-mail: harchenko@icm.krasn.ru

Проведено экспериментальное исследование процесса формирования углеродных слоев в мембранах пористого анодного оксида алюминия методом CVD. Экспериментальные зависимости скорости роста углерода от температуры и расхода аргона хорошо согласуются с расчетами на основе математической модели.

Ключевые слова: пористый анодный оксид алюминия, химическое осаждение из газовой фазы, пиролиз этанола, углеродные нанотрубки, математическое моделирование.

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF CARBON DEPOSITION IN POROUS ANODIC ALUMINA MEMBRANES

I. A. Kharchenko^{1,2*}, A. V. Minakov¹, E. V. Mikhlina², I. V. Nemtsev³, I. I. Ryzhkov^{1,2}

¹Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
²Institute of Computational Modeling SB RAS
50/44, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation
³Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS
50/38, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation
*E-mail: harchenko@icm.krasn.ru

We have performed an experimental study of carbon layer formation in porous anodic alumina membranes by the CVD method. Experimental dependences of carbon growth rate on temperature and argon flow rate show good agreement with numerical simulations.

Keywords: porous anodic alumina, chemical vapor deposition, ethanol pyrolysis, carbon nanotubes, mathematical modeling.

Введение. В настоящее время в области мембранных технологий особое внимание направлено на создание материалов, обладающих высокой селективностью, высокой проницаемостью и стабильностью при проведении процессов разделения и фильтрации [1]. Современные мембранные технологии нашли свое применение в промышленности, в медицине, а также в области переработки отходов промышленного и бытового назначения.

Одним из перспективных способов создания мембранных материалов является анодное окисление металлов в растворяющих электролитах. Примером таких материалов является пористый анодный оксид алюминия (ПАОА), обладающий регулярной пористой структурой с заданным размером однонаправленных цилиндрических нанопор [2].

Химическая модификация стенок пор углеродом с помощью метода CVD позволяет получить электропроводящее покрытие [3]. Это открывает возможности управления транспортом заряженных компонентов (в том числе ионов) через мембрану путем изменения поверхностного заряда, который определяется электрическим потенциалом поверхности.

Мембраны с управляемой селективностью находят применение в системах разделения смесей и получения чистых веществ на основе баро- и электромембранных процессов, а также в области создания микро- и нанофлюидных устройств. ПАОА мембраны с углеродным покрытием также представляют интерес как поглощающие материалы для измерения сигналов слабо излучающих образцов при криогенных температурах [4].

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-29-19078 мк. Физико-химический анализ материалов был выполнен в красноярском региональном центре коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

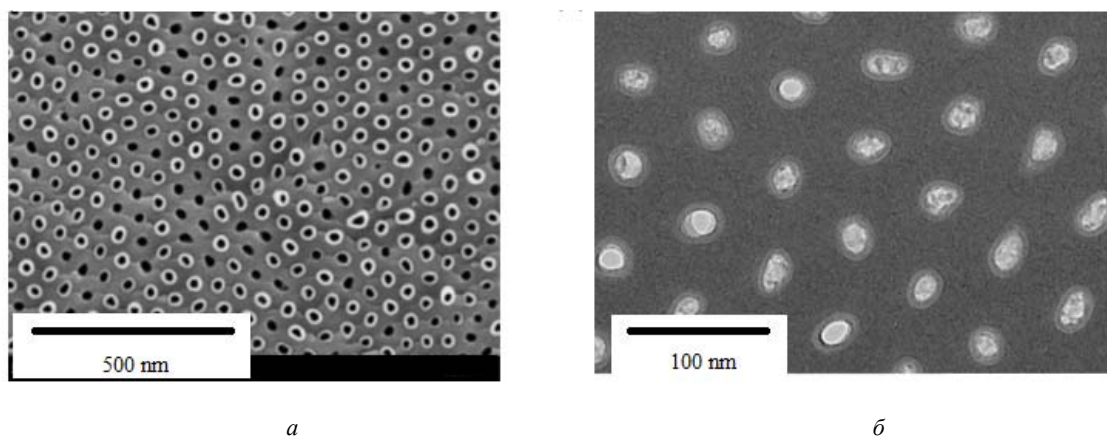


Рис. 1. Поверхность паоа мембраны с углеродными нанотрубками внутри пор:
a – РЭМ изображение; *б* – ПЭМ изображение

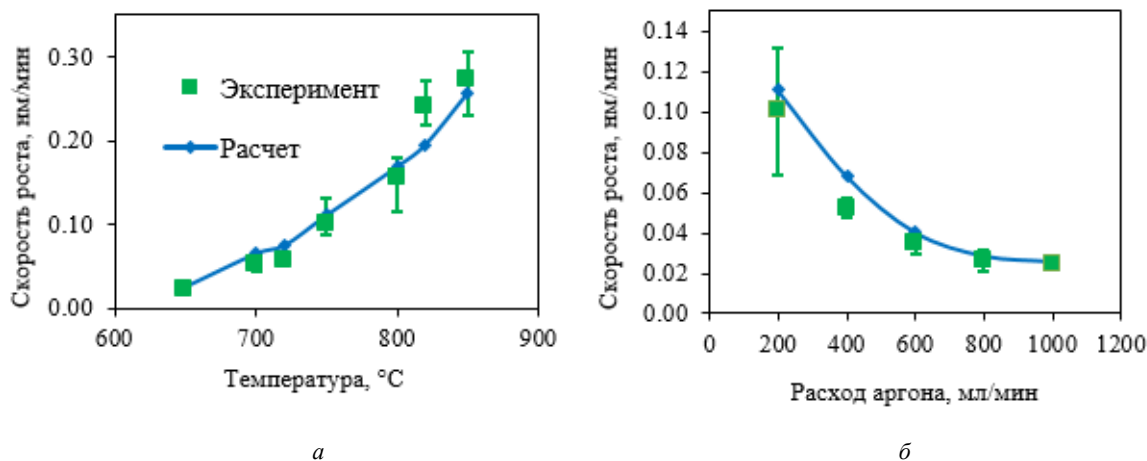


Рис. 2. Зависимость скорости роста углеродного слоя в порах от параметров CVD синтеза – температуры (*a*) и расхода аргона (*б*)

Методика синтеза ПАОА и углеродных слоев. Способ получения мембран ПАОА включает в себя термообработку алюминиевой фольги, электрохимическую полировку, двухстадийное анодирование, вскрытие пор с электрохимическим детектированием и извлечение мембраны из алюминиевого каркаса с помощью лазерной резки. Далее мембраны ПАОА покрывались углеродным слоем методом CVD. Для этого использовалась установка, состоящая из трубчатой печи OTF-1500X-UL-3 (MTI, США), системы подачи парогазовой смеси LVD-F1 и вакуумной станции PC 3001 VARIO (VACUUBRAND GMBH, Германия). В качестве углеродсодержащего газа использовались пары этанола, в качестве инертного газа-носителя – аргон. Синтез проводился при температурах от 650 до 850 °C, расходе этанола (в жидком виде) – от 0,08 до 0,5 мл/мин, расходах аргона – от 200 до 1000 мл/мин при давлении 0,5 бар. Время синтеза варьировалось от 20 до 150 мин.

Математическое моделирование пиролиза этанола и осаждения углеродных слоев осуществлялось в геометрии CVD реактора с помощью пакета Ansys

Fluent 17 [5]. Для описания пиролиза этанола в газовой фазе использовалась модель Маринова, в то время как поверхностная кинетика основывалась на реакциях разложения метана, этилена и ацетилен на углерод и водород [6], при этом учитывался ингибирующий эффект водорода для указанных реакций разложения [7].

Результаты и обсуждение. На рис. 1 представлена морфология мембран на основе РЭМ и ПЭМ изображений, полученных с помощью инструментов Hitachi S-5500 и Hitachi HT-7700. Для определения толщины стенок углеродных нанотрубок в порах мембраны изображения обрабатывались с помощью программного обеспечения ImageJ [8]. Установлено, что толщина углеродного слоя прямо пропорциональна времени CVD.

На рис. 2 представлены зависимости скорости роста углеродного слоя от параметров CVD синтеза. Управление временем и условиями CVD процесса позволяет контролировать внутренний диаметр нанотрубок и, соответственно, транспортные свойства композиционных мембран.

На основании полученных результатов были сделаны следующие выводы:

1. Осаждение углерода происходит из продуктов пиролитического разложением этанола (этилен, ацетилен, метан) с выделением водорода.

2. С увеличением температуры синтеза увеличивается скорость роста углеродных слоев.

3. Увеличение расхода аргона при фиксированном расходе этанола приводит к уменьшению концентрации последнего, в результате чего скорость роста снижается.

4. Экспериментальные данные по скорости роста хорошо согласуются с расчетными.

References

1. Apel P. Yu., Bobreshova O. V., Volkov A. V., Volkov V. V., Nikonenko V. V., Stenina I. A., Filippov A. N., Yampolskii Yu. P., Yaroslavtsev A. B. Prospects of membrane science development. *Membranes and membrane technologies*, 2019. Vol. 1-2. P. 45–63.
2. Lee W., Park S. J. Porous anodic aluminum oxide: anodization and templated synthesis of functional nanomaterials. *Chem. Rev.*, 2014. Vol. 114. P. 7487–7556.
3. Alsawat M., Altalhi T., Kumeria T., Santos A., Losic D. Carbon nanotube-nanoporous anodic alumina composite membranes with controllable inner diameters and surface chemistry: influence on molecular transport and chemical selectivity. *Carbon*, 2015. Vol. 93. P. 681–692.
4. Králík T., Musilová V., Hanzelka P., Frolec J. Method for measurement of emissivity and absorptivity of highly reflective surfaces from 20K to room temperatures. *Metrologia*, 2016, Vol. 53, P. 743–753.
5. Minakov A. V., Simunin M. M., Ryzhkov I. I. Modelling of ethanol pyrolysis in a commercial CVD reactor for growing carbon layers on alumina substrates. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019. Vol. 145. P. 118764.
6. Li H., Li A., Bai R., Li K. Numerical simulation of chemical vapour infiltration of propylene into C/C composites with reduced multi-step kinetic models. *Carbon*, 2005. Vol. 43. P. 2937–2950.
7. Li A., Deutschmann O. Transient modelling of chemical vapour infiltration of methane using multi-step reaction and deposition models. *Chem. Eng. Science*, 2007. Vol. 62. P. 4976–4982.
8. Roslyakov I. V., Koshkodaev D. S., Eliseev A. A., Hermida-Merino D., Ivanov V. K., Petukhov D. V., Napolskii K. S. Growth of porous anodic alumina on low-index surfaces of Al single crystals. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2017. Vol. 121. P. 27511–27520.

© Харченко И. А., Минаков А. В., Михлина Е. В., Немцев И. В., Рызжков И. И., 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Секция

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

Агаев Р. Н., Калинин Р. М., Коротеев А. В., Ганжин А. Г., Чариков А. В. Стратегический беспилотный летательный аппарат с большой дальностью и продолжительностью полета	6
Агаев Р. Н., Салахов А. М., Степанов А. А. Перспективный многоцелевой экраноплан с замкнутым контуром крыла	8
Анашкин Д. А., Олейников Е. П. Отклоняемые поверхности летательных аппаратов	11
Бабкина Л. А., Лопатин А. В. Моделирование теплопереноса в композитных сетчатых конструкциях космических аппаратов	13
Воложанин П. А., Нестерова А. В., Кольга В. В., Быков А. В. Использование оскулирующих элементов в прогнозировании эволюции орбиты	15
Елпатов А. С., Харлашина С. В., Орешенко Т. Г. Электромагнитные поля в космическом пространстве	17
Железнов И. В., Рогачева Ю. А., Шулепов А. И. Об одном из способов размещения бортового оборудования в отсеках космических аппаратов	19
Замятин Д. А., Кольга В. В. Моделирование конструкции мачты рефлектора	21
Казанцев З. А., Ерошенко А. М., Уваев И. В., Лопатин А. В. Трансформируемый параболический рефлектор для платформы Кубсат	23
Кашфутдинов Б. Д. Модельно-ориентированный подход к проектированию системы стабилизации летательного аппарата	25
Коловский И. К., Шмаков Д. Н. Использование данных Norad для оценки влияния солнечной активности на период обращения космических аппаратов на низкой круговой орбите	27
Комбаев Т. Ш., Артемов М. Е., Борщев Ю. П. Создание радиационной защиты КА с помощью программного модуля для системы 3D-моделирования и аддитивных технологий	30
Кремзуков Ю. А., Цебенко Н. Н., Луковников К. С., Сайданов А. Р. Разработка устройства мониторинга параметров системы электропитания	32
Надеин И. О., Кольга В. В. Определение стартовых параметров ракеты-носителя при воздушном запуске	34
Нестерова А. В., Воложанин П. А., Кольга В. В., Мушенко А. В. Разработка фермы переходного отсека между первой и второй ступенями летательного аппарата	36
Попов Д. Р. Совершенствование электродуговой технологии получения вакуумных покрытий при производстве летательных аппаратов	38
Соловьев Л. С. Применение метеорологических ракет для запуска малых космических аппаратов	40
Уланов М. А., Олейников Е. П. Транспортные космические системы – основа развития космонавтики	43
Фаизов М. Р., Мудров А. П., Хабибуллин Ф. Ф. Динамика сферического механизма для пространственного тренажера	45
Фищенко А. В., Хвалько А. А., Сорокина Е. Г. Упрощение моделей	47
Чеботарев В. Е., Воронцова Е. О., Сидорова Е. А. Моделирование теневых зон на окололунных орбитах и особенности расчета параметров систем электропитания и терморегулирования окололунного космического аппарата	49

Секция

«КРУПНОГАБАРИТНЫЕ ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ»

Ануфриенко В. Е., Надеин И. О., Герус А. А., Байбородов А. А. Способ определения параметров, обеспечиваемых устройством отделения малых космических аппаратов	53
Аринчев С. В. 2D-моделирование динамического процесса лазерной резки крупногабаритного объекта космического мусора в невесомости	55
Белоглазов А. П., Крестинин В. В., Еремин А. Г. Оценка возможности использования углеродного материала в теплопередающих устройствах летательных аппаратов	58

Беляев А. С., Филипас А. А., Тырышкин А. В. Имитационная модель системы опорного обезвешивания элементов космических аппаратов	60
Буйкас В. И., Глотов М. Д. Кинематика раскрытия нового точного лепесткового зеркала	63
Величко А. И., Кисанов Ю. А., Церихов В. И., Матросова И. В. Ободной двухкольцевой рефлектор диаметром 22 м	67
Герус А. А., Кузнецов А. Д., Волков М. В., Надсин И. О., Рыбина У. И. Описание конструкции и механизма расстыковки отрывного соединителя	69
Гончаров К. А., Симонов О. С., Новичкова С. А., Хмельницкий А. К., Хмельницкий Я. А. Создание интегральных углепластиковых конструкций	71
Деришев Д. В., Пустобаев М. В., Шматков А. В., Грабилин А. О. Особенности реализации высокочастотных нагрузок при имитировании переходных процессов от срабатывания пиросредств трансформируемых конструкций	74
Зимин В. Н., Кувыркин Г. Н., Зарубин В. С., Шахвердов А. О. Разработка математической модели силового привода для трансформируемых космических конструкций	76
Зимин В. Н., Крылов А. В., Кувыркин Г. Н., Павлов Н. Г., Филиппов В. С. Экспериментально-теоретические исследования силового привода для раскрытия трансформируемых крупногабаритных космических конструкций	78
Зоммер С. А., Иванов А. В., Кравчуновский А. П., Немчанинов С. И., Адамович А. И. Анализ крутящего момента в шарнирных узлах многоразового раскрытия-складывания	80
Зоммер С. А., Иванов А. В., Кравчуновский А. П., Немчанинов С. И., Адамович А. И. Программа автоматизированного расчета пружин постоянного усилия	83
Иванов М. А., Петров В. В. Контроль поверхности зеркала антенны космической обсерватории «Миллиметр» с использованием интерферометрической системы	86
Иванов М. А., Петров В. В. Применение фотограмметрических систем для измерения элементов трансформируемых космических антенн	88
Карманова А. В., Петрова Ю. А., Хвалько А. А. Разработка проекта силовой конструкции модуля бортовой аппаратуры для применения многовыводных электронных компонентов	90
Краевский П. А., Морозков И. С., Болгов В. В., Рукосуев Д. Л. Высокоточная трансформируемая штанга	92
Кудрявцев И. В. Методика обоснованного выбора способа закрепления прямых участков волноводов для обеспечения их динамического состояния при нагреве	94
Леоненков А. Д., Оберемок Ю. А. Конструкция опорного каркаса центрального зеркала космического телескопа «Миллиметр»	97
Лихачев А. Н. Теоретические основы создания конструкций с изменяемыми морфологическими и функциональными характеристиками	99
Макаров С. Н., Верхогляд А. Г., Ступак М. Ф., Овчинников Д. А., Оберемок Ю. А. Математическое моделирование работы 3D-сканера системы контроля зеркальной системы обсерватории «Миллиметр»	101
Михалкин В. М., Куклин В. А., Дмитриев Г. С., Ильвутиков С. А., Романенко И. В. Метод имитации невесомости при отработке надежности системы отделения малых космических аппаратов	103
Мишин С. В., Савельев Р. А., Дремухин М. А. Изготовление токосъемных колец из бериллиевой бронзы	105
Овчар А. В. Прорывное движение без пропеллента: исследовательский стенд для изучения новых физических принципов для космических полетов	107
Похабов Ю. П. Инженерное обеспечение надежности трансформируемых конструкций	110
Рудич А. И., Лисин В. А., Терехина В. С., Жильский А. С. Разработка технологии металлообработки путем охлаждения зоны резания ионизированным в вихревых потоках воздухом	112
Рыков Е. В., Штокал А. О., Баженова О. П., Богачев В. А., Шилкина М. О. Методика оптимизации конструкции элементов распора узлов раскрытия космических аппаратов	114
Семейных Ю. А., Герилевич А. Г., Двирный В. В. Разработка проекта системы обеспечения теплового режима космического аппарата с использованием фазочастотного регулирования холодопроизводительности	116
Серяков А. В., Алексеев А. П. Исследование коротких линейных тепловых труб путем решения обратной задачи теплопроводности	119
Терлецкий Г. С., Зыков А. О., Тайгин В. Б., Морозков И. С., Гоцелюк О. Б. Разработка упругих шарниров для раскрытия мембранных антенн	122

Секция

**«ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ПРОИЗВОДСТВО И ИСПЫТАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ»**

Агаев Р. Н., Калинин Р. М., Камбалин И. Д., Коротеев А. В., Ганжин А. Г. Расчет проточной части силовой установки для беспилотного летательного аппарата	125
Баленков Д. С., Соколов Д. А., Шестов Н. С., Толстопятов М. И. Перспективы использования аддитивных технологий при изготовлении жидкостного ракетного двигателя	128
Бегишев А. М., Журавлев В. Ю. Система тарировочных грузов специальной конфигурации для силоизмерительных устройств стендов испытаний жидкостного ракетного двигателя	130
Зуев А. А., Арнольд А. А., Данилов Н. А. Баланс мощностей малорасходных центробежных насосов энергетических систем летательных и космических аппаратов	132
Зуев А. А., Арнольд А. А., Данилов Н. А., Фалькова Е. В. К методике определения характерных параметров в проточных частях турбонасосных агрегатов при турбулентных режимах	134
Климовский Д. А., Журавлев В. Ю. Конструктивно-технологическое обеспечение надежности диафрагм-разделителей топливных баков	136
Кожемякин С. А., Голиковская К. Ф. Передовой опыт использования жидкостных ракетных двигателей	138
Нестеров В. Д., Жуйков Д. А. Разработка алгоритма определения равновесного термодинамического состояния при окислительно-восстановительной реакции продуктов сгорания в камере жидкостного ракетного двигателя	141
Новак В. А., Жуйков Д. А. Экспериментальные исследования течения в межлопаточном канале центробежного колеса насоса	143
Пашкова Н. Д., Безбородова К. В., Боброва Е. А. Начальный этап проектирования газотурбинного двигателя для использования на дальнемагистральных самолетах	146
Пилипенко А. А., Голиковская К. Ф., Ньюкалова С. И. Проектирование деталей жидкостного ракетного двигателя с использованием трехмерного моделирования	148
Рутковская М. А., Рутковский В. О. Новая конструкция выхлопной системы «кольцевой резонатор» для двухтактных оппозитных двигателей	151
Савчин Д. А., Назаров В. П. Моделирование процесса определения кавитационной характеристики центробежных насосов жидкостного ракетного двигателя	153
Соболев А. А., Назаров В. П., Назарова Л. П. Особенности проведения тарирования балансирных динамометров для измерения крутящего момента	156
Соколов Д. А., Баленков Д. С., Толстопятов М. И. Принципиальная схема стенда испытаний и методика обработки экспериментальных данных бустерных электронасосных агрегатов	158
Торгашин А. С., Бегишев А. М., Власенко А. В. Применение моделей, основанных на уравнении Рэлея-Плессета, к моделированию кавитационного потока в турбонасосном агрегате жидкостного ракетного двигателя	161

Секция

**«ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В КОНСТРУКЦИЯХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
И СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ»**

Благин Е. В., Довгялло А. И., Усков И. А., Кузнецова Е. П. Определение параметров оребрения полости термокомпрессора	164
Булов А. О. Природные хладагенты: оценка перспектив современного применения	166
Булов А. О., Ермаков М. А. Повышение эффективности климатических систем	168
Делков А. В., Чайкина К. А., Чабукашвили Т. Г., Абдуллаев М. У. Математическая модель газовой турбины	170
Ермаков М. А. Хладагент R515B как потенциальная замена R134a	172
Кишкин А. А., Атрощенко Н. Н., Шевченко Ю. Н. Математическая модель канального подводящего устройства	174
Кустов А. В., Лепп Н. Э., Снегирева А. В., Материкина Е. О. Математическое моделирование работы встроенного дефлегматора	176

Литовченко А. А. Применение экранно-вакуумной теплоизоляции для тепловой защиты космических аппаратов	178
Погодин А. Е., Дмитриев Г. В., Шилкин О. В., Колесников А. П. Исследование путей создания систем терморегулирования для космического аппарата большой мощности, оценка применимости	180
Причина А. С., Фадеев А. А. Разработка компактного топливного устройства	182
Ходенков А. А., Васильева Е. К., Жилинский А. И. Тепловой замкнутый контур для экспериментального исследования процесса кипения	184
Ходенков А. А., Васильева Е. К., Жилинский А. И. Температурные датчики для автоматизированной системы фиксации данных	186
Ходенков А. А., Ходенкова Э. В. Измерительная установка для испытаний паросиловых энергоустановок	188
Черненко В. В., Черненко Д. В. Математическая модель конденсатора-испарителя	190
Шевченко Ю. Н., Кишкин А. А., Луговой Е. Н. Интегральное соотношение для уравнений импульсов пограничного слоя по поверхности кольцевого сечения	193
Шевченко Ю. Н., Кишкин А. А., Луговой Е. Н., Абдуллаев М. У. Профилирование лопаточного профиля радиальной турбины	195

Секция

«ТЕХНОЛОГИИ РАКЕТОСТРОЕНИЯ»

Назаров С. В., Шестаков И. Я. Применение электрохимического метода удаления заусенцев.....	199
Неватус И. С. Особенности определения гидродинамических и тепловых параметров в проточных частях ТНА ЖРД	201

Секция

«СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, КОСМИЧЕСКАЯ НАВИГАЦИЯ И СВЯЗЬ»

Гельгорн А. В., Олейников Е. П. Системы стабилизации полета баллистических ракет	204
Гладышев А. Б., Колупаев А. Ю., Жгун А. В., Буравлева М. Э. Использование сферического сканера в стенде для контроля и настройки параметров антенн земной станции спутниковой связи	206
Голубев Е. Н. Диагностика компьютерных сетей спутников АО «ИСС»	209
Далбаева Н. И., Ибрагимова Я. Г., Ким А. А., Терешенкова О. А. Радиотонная система для верификации параметров радиолокационных устройств с использованием волоконно-оптических линий задержки	212
Егорова П. Г. Исследование работоспособности устройства для управления электроприводом испытательного стенда	214
Елпатов А. С., Орешенко Т. Г., Харлашина С. В. Методы контроля параметров электромашинных элементов систем управления	217
Елпатов А. С., Харлашина С. В., Орешенко Т. Г. Моделирование диода 1n4001 в среде Simintech	219
Иерусалимов С. А., Макарьянц Г. М. Анализ проблем управления ГТД на базе динамической модели ТРДДсм	222
Пинаев И. А., Олейников Е. П. Астронавигация	225
Плыкин К. Р., Чурсина О. А., Валиханов М. М., Волошко Ю. Б. Исследование рабочей зоны системы ГЛОНАСС при различных вариантах построения орбитальных группировок	227
Попов А. М., Костин И. Д., Кострыгин Д. Г., Фадеева Ю. В. Адаптивное управление с неявной эталонной моделью группировкой малых спутников	230
Пучков А. В., Дружинин А. А. Система комплексного тестирования бортовой аппаратуры	232
Сидоров В. Г. Моделирование системы управления с применением нейронных сетей	234

Секция

«КОСМИЧЕСКОЕ И СПЕЦИАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ»

Катков А. С. Применение плёночных конденсаторов для обеспечения надёжности систем электропитания КА	237
Козлов С. И. Методы рекуперации энергии заряженных частиц	239
Лепёшкина Е. С. Анализ сбоеустойчивости реализаций криптографических алгоритмов на борту космических аппаратов	241

Секция

«ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

Азин А. В., Пономарев С. В., Рикконен С. В., Марицкий Н. Н., Сунцов С. Б. Обзор методов поиска латентных дефектов печатных плат	244
Ахматшин Ф. Г., Казаковцев Л. А. Подбор информативных параметров в задаче автоматической группировки промышленной продукции по однородным производственным партиям	246
Бердичевский К. В., Королев А. В. Новые разработки гибридных объёмных ИС на базе ПЛИС европейского производства для применения в вычислительных системах бортовой аппаратуры КА	248
Голованов С. М., Орлов В. И., Федосов В. В. Использование алгоритмов формирования однородных групп при испытаниях электронной компонентной базы космического применения	250
Козлов С. И., Суханова О. А., Трифанов И. В. Преобразование СВЧ-энергии в постоянный электрический ток	252
Масич И. С. Оценка достоверности кластеризации и проверка однородности групп электрорадиоизделий	254
Михнёв Д. Л., Орлов В. И., Рожнов И. П., Ерыгин Ю. В., Федосов В. В. Метод формирования стоимости комплектации бортовой аппаратуры космических аппаратов	256
Рожнов И. П., Казаковцев Л. А., Орлов В. И., Лапунова Е. В. Применение архитектуры CUDA для формирования электронной компонентной базы	258
Трифанов В. И., Пчелкина Т. А. Влияние режимов процесса анодно-абразивного полирования на шероховатость поверхности каналов малого сечения	260

Секция

«КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ»

Баранов М. Е. Вероятностно-лингвистическая модель как основа функционирования системы поддержки поиска неисправностей в технических системах	263
Гринберг Г. М. Неразрушающий контроль изделий методом эффекта Баркгаузена	266
Двирный Г. В., Шевчук А. А., Пастушенко О. В. Пути повышения технических и эксплуатационных характеристик имитаторов солнечного излучения для наземной отработки космических аппаратов	268
Хахленков А. В., Кишалов А. А. Испытания лазерной системы локального нагрева	271

Секция

«МАЛЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ:
ПРОИЗВОДСТВО, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ»

Евграфов П. Л. Инновационные кварцевые генераторы для бортового оборудования малых космических аппаратов	274
Малыгин Д. В. Архитектура бортовой кабельной сети многоцелевой платформы «Синергия» блочно-модульного типа	276
Малыгин Д. В., Яковлев О. Я. Внутренний тепловой анализ наноспутника на базе платформы «Синергия»	279

Секция
**«ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ
 И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ МОНИТОРИНГА
 И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ»**

Авдеенок В. Л., Тубольцев В. П. Анализ деятельности полиграфа уссурийского в лесах Красноярского края по данным дистанционного зондирования	282
Бахтина А. В. Непараметрический алгоритм комплексного оценивания состояния природных объектов по данным дистанционного зондирования	286
Галакова К. А., Охоткина Е. А. Анализ и оценка использования сельскохозяйственных земель с применением средств и методов дистанционного зондирования	288
Гончаров А. Е., Городов А. А., Оголь А. Р., Бондарев А. С., Апанасенко С. В. Картографические сервисы и индустриальная археология Западного Таймыра	291
Им С. Т. Оценка повреждений темнохвойных лесов сибирским шелкопрядом методом непараметрической автоматической классификации	294
Им С. Т., Ли В. Г. Динамика проективного покрытия деревьями в темнохвойных лесах Кузнецкого Алатау по данным съемки MODIS	297
Лапко А. В., Лапко В. А. Методика проверки гипотезы о тождественности законов распределения случайных величин в условиях больших объемов статистических данных	300
Лапко А. В., Лапко В. А. Модификация непараметрического алгоритма автоматической классификации статистических данных большого объема	303
Лапухин Е. Г., Золотарев В. В., Лапко Р. В., Денисов С. В., Аристов Н. И. Расширение функциональных возможностей Студенческого центра управления полетами для мониторинга Земли	305
Платонова Ю. В., Комиссарова О. Ю. Мониторинг снежного покрова урбанизированных территорий	307
Тубольцев В. П., Авдеенок В. Л. Батиметрия озера Укок средствами дистанционного зондирования Земли	310
Шушпанов А. С., Петров И. А., Голуков А. С. Анализ усыхания темнохвойных древостоев на территории Кузнецкого Алатау	313

Секция
«ЭКСПЛУАТАЦИЯ И НАДЕЖНОСТЬ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ»

Ачкасова Е. А., Дутта К. Анализ средств современной пожарно-спасательной авиации западного и российского производства	316
Бадьгов В. Ф., Елизарьева М. Г., Батку О. П., Коваленко Г. Д. Метод визуализации лесных пожаров растровой обработкой фотографий, полученных с помощью космической съемки	319
Бойко О. Г., Ачкасова Е. А., Тришин С. С. Анализ показателей процесса технического обслуживания в авиационно-техническом центре «КрасЭйр» в период завершения деятельности авиакомпании	321
Васильева Е. К., Жирнова Е. А. Аттестации испытательного оборудования в лаборатории авиационной метрологии ООО «Аэропорт Емельяново»	324
Дракова А. В., Малахова Ю. Г. Автоматизация поверки электроизмерительных приборов	326
Дутта К., Бойко О. Г. Авиаперелеты после Covid-19 на долгие годы вперед	328
Елизарьев Д. А., Борковец Д. В., Елизарьева М. Г., Коваленко Г. Д. Признаки движителей авиационных транспортных средств, отображенных в артефактах Сибири	330
Емельянов А. Н., Батку О. П. Модернизация топливной системы воздушных судов	333
Кузнецова З. А., Ладыгин А. П., Синиченко М. И., Кузнецов А. Д., Клешнина И. А. Испытания фотополимерного материала для обеспечения герметичного соединения	337
Мусонов В. М., Бадьгов В. Ф., Батку О. П. Измерение фазовых сдвигов в авиационных радиосистемах	340
Никитин С. С., Скулябина О. В. Использование нерегулярной матрицы разнородных вихретоковых датчиков в задачах неразрушающего контроля плоских поверхностей	343
Огородникова Ю. В., Лукасов В. В. Анализ системы диагностирования технического состояния вертолетов	345

Писарев Н. С., Арефьев Р. О. Перспектива применения машинного обучения в авиационных радиоэлектронных системах	347
Тимохович А. С., Кунин И. С. Пилотажно-навигационный комплекс с интеллектуальной поддержкой экипажа	349
Тимохович А. С., Попов Д. М. Исследование экономической целесообразности использования летательного аппарата БЕ-200ЧС	352
Тришин С. С., Бойко О. Г. Анализ процесса технического обслуживания самолета АН-26 по данным авиационно-технического центра	354

Секция

«ТЕХНОЛОГИЯ И МЕХАТРОНИКА В МАШИНОСТРОЕНИИ»

Бинчуров А. С., Грибанов А. П., Жабинская Д. А., Гордеев Ю. И., Ясинский В. Б. Исследование процесса получения порошковых материалов ротационным точением многогранными резцами	358
Брюханов Э. Е. Особенности процесса лазерной сварки алюминиевой фольги и контроль	361
Видлацкий А. С. Метрологическое обеспечение изготовления изделий из металлополимерных композиционных материалов	363
Гордеев Ю. И., Бинчуров А. С., Кривов Д. А., Филиппов С. В., Сморкалова А. С. Особенности процессов измельчения в дробилке с валками в форме РК-профиля	365
Дубова С. А., Иголкин А. А. Разработка пневматического привода точного позиционирования	368
Елисеев С. В., Большаков Р. С., Николаев А. В. Особенности формирования режимов работы вибрационной технологической машины при наличии в структуре рычажных связей	370
Калашников А. С., Кучеренко А. Д., Гирн А. В., Руденко М. С., Михеев А. Е. Исследование влияния начальной шероховатости образцов на коэффициент трения трибопары	373
Калмыков А. А. Изготовление тонкостенных труб методом волочения	376
Леванович С. В., Зверинцева Л. В. Проблемы восстановления корпусных деталей автомобильных двигателей внутреннего сгорания	378
Левко В. А., Литовка О. В., Савин Д. И. Уточненная схема контакта единичного зерна при обработке абразивным потоком высоковязкой средой	380
Михнёв М. М., Кудрявцев И. В., Сильченко П. Н. Технологическая проблема изготовления протяжённых волноводно-распределительных систем космических аппаратов	383
Петров И. Н., Разживин В. А., Лищенко Р. И., Сычев Е. В. Исследование предельных деформационных возможностей листового металла в процессе инкрементального формообразования	388
Русакова Л. Ю. Этапы реализации проекта интегрированной системы менеджмента качества и бережливого производства геосинтетических материалов	390
Сильченко П. Н., Новиков Е. С., Михнёв М. М. Ионно-плазменное азотирование мелко модульных зубчатых колёс приводов механических систем космических аппаратов	394
Стахнова М. В. Влияние вибрации фрезы на качество поверхности при высокоскоростной обработке алюминиевых сплавов	397
Суханова О. А., Якубович И. О., Малько Л. С. Конструкторско-технологические решения по проектированию многолезвийного инструмента для нарезания витков червяка глобоидно-цилиндрической передачи	399
Терин А. М., Тутушкин А. К., Панков Д. Э., Соломонов И. А., Снетков П. А. Проблематика обучения кадров для работы на станках ТПА	401
Трифанов В. И., Карелина Е. А. Модель формирования зон стенки канала трубы волновода на основе учета распределения параметров пластической деформации и действия силы волочения	403
Трифанов В. И., Суханова О. А., Трифанов И. В. Расчет силы пластического пограничного трения между инструментом-дорном и поверхностью канала трубы волновода при волочении	405
Усевич Н. И., Бинчуров А. С., Гордеев Ю. И., Баландина М. В., Якученис С. А. Использование групповых технологий для изготовления деталей универсально-сборочных приспособлений	407

Секция
«МЕХАНИКА СПЕЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ»

Ереско С. П., Ереско Т. Т., Ереско В. С., Фомин А. Г. Моделирование системы водяного охлаждения комплексов индукционного нагрева	411
Иванов Ю. Ф., Ереско С. П., Клопотов А. А., Устинов А. М., Абзаев Ю. А. Исследование влияния облучения электронным пучком на механические свойства при растяжении алюминия марки а7 и слоистого композита алюминий/углепластик	414
Кукушкин Е. В. Математическая модель карданной передачи для расчета собственных частот колебаний	417
Кукушкин Е. В. Математическая модель карданного шарнира для расчета собственных частот колебаний	420
Кустов А. В., Корнев В. М., Межов В. Г., Бальцер А. А., Фиц Д. Ф. Исследование диаметра парового пузыря при ректификации	423
Пономарев С. И., Ереско С. П. Автоматизация технологических процессов изготовления металлокерамических узлов	425
Стручков А. В., Климов А. А. Экспериментальное исследование динамической нагруженности трансмиссий бульдозера при экстремальных режимах работы	428
Дремухин М. А., Наговицин В. Н. Способ изготовления элементов рефлектора из полимерных композиционных материалов	431

Секция

«НАНОМАТЕРИАЛЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ»

Герасимов В. С., Ершов А. Е., Бикбаев Р. Г., Карпов С. В. Поляризационно-чувствительные моды в анизотропных фотонно-кристаллических наноструктурах	435
Ершов А. Е., Герасимов В. С., Полютов С. П., Карпов С. В., Семина П. Н., Бикбаев Р. Г. Оптический керкер-эффект в периодических структурах из алюминиевых наночастиц	437
Зуев Д. М., Охоткин К. Г. Модифицированные формулы для стрелы прогиба: сравнение с экспериментальными данными	440
Козлов С. И., Пчелкина Т. А., Трифанов И. В. Повышение рабочих параметров рекуператоров энергии пучков электронов	442
Костюков А. С., Ключанцев А. Б., Ершов А. Е., Герасимов В. С., Карпов С. В. Механизмы необратимого повреждения злокачественных клеток ферромагнитными наночастицами в переменном магнитном поле	444
Писарев Н. С., Ачкасова Е. А. Применение углеродных нанотрубок в ракетных комплексах	446
Рыжков И. И., Борцова А. А., Мишнев М. О., Новикова С. А., Хартов С. В. Управляемый перенос ионов в наноструктурированных мембранах с электропроводящей поверхностью	448
Рысева А. С. Композиты из многостенных углеродных нанотрубок для СВЧ-устройств	451
Сакович О. В., Вайтузин О. П., Рогило Д. И. Получение карт распределения электростатического потенциала на пленках селенида индия разной толщины	453
Тамбасов И. А., Воронин А. С., Масюгин А. Н., Тамбасова Е. В., Горнаков М. О. Синтез и электрические свойства тонких нанокompозитных ZnO/ОУНТ пленок	456
Утюшев А. Д., Ершов А. Е., Герасимов В. С., Закомирный В. И., Карпов С. В. Коллективные решеточные резонансы в диэлектрических наноструктурах при наклонном падении оптического излучения	458
Ушаков А. В., Карпов И. В., Фёдоров Л. Ю. Исследование ферромагнитных свойств наночастиц CuO	461
Харьков А. М., Гельгорн А. В., Мироненко В. В. Диэлектрическая проницаемость $Tm_{0,1}Mn_{0,9}S$	463
Хохлова Т. Н., Андрющенко Т. А., Паршин А. С. Исследование спектров сечения неупругого рассеяния электронов Al различными методами	466
Хохлова Т. Н., Дерябин А. С., Пчеляков О. П. Исследование структуры гетероэпитаксиальных слоев $GexSi_{1-x}/Si(001)$ в зависимости от несоответствия параметров решетки гетеросистемы	468

Секция
**«МЕХАНИКА СПЛОШНЫХ СРЕД
 (ГАЗОДИНАМИКА, ГИДРОДИНАМИКА, ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ
 И ПЛАСТИЧНОСТИ, РЕОЛОГИЯ)»**

Гомонова О., Риго Ж., Андриё Э. Моделирование испытания на четырехточечный изгиб с учетом асимметрии поверхности текучести материала	471
Белолипецкий В. М., Генова С. Н. Гидротермика Абаканской протоки на реке Енисей, численное моделирование	474
Белолипецкий В. М., Генова С. Н. О применении одномерной модели динамики вечной мерзлоты для района озера Тулик (Аляска)	476
Ефимов Е. А. Численное моделирование воздействия импульсного сейсмоисточника на грунт	478
Ефимова М. В. Построение точного решения задачи, описывающей стационарное конвективное двухслойное течение с учетом энергии межфазного теплообмена	480
Кром А. И., Медведева М. И., Рыжков И. И. Математическое моделирование ионной проводимости нанопористых мембран с электропроводящей поверхностью	482
Кубышкина Д. Р., Сабиров Р. А. О влиянии квадратов первых производных функции прогиба на значения мембранных сил в гибких пластинах	485
Кудрявцев И. В. Напряженно-деформированное состояние волноводов при инерционном нагружении	487
Матвеев А. Д. Метод эквивалентных условий прочности в расчетах упругих тел с неоднородной регулярной структурой	490
Матвеев А. Д. Основная теорема метода эквивалентных условий прочности	493
Матвеев А. Д. Метод масштабирования в расчетах композитных тел	496
Немировский Ю. В., Федорова Н. А. Определение неизвестных траекторий армирования в условиях связанных деформаций для плоской задачи	499
Петраков И. Е. Моделирование изгиба тонких пластинок из однослойного волокнистого композита с учетом различной изгибной жесткости	502
Рудаков Г. О., Малыгина А. С., Пышнограй Г. В., Лаас А. А. Моделирование реологических свойств расплавов полиэтиленов при их одноосном растяжении	504
Сабиров Р. А. Регулирование напряженно-деформированного состояния изгибаемой тонкой пластины растяжением мембранными силами	506
Сабиров Р. А. Прочность и жесткость прямоугольной пластины при сложном изгибе от ориентации волокна композита	509
Савостьянова И. Л., Сенашов В. С. О построении линий разрыва напряжений при пластическом кручении стержней	512
Сенашов С. И., Савостьянова И. Л. О построении трехмерных решений уравнений идеальной пластичности	513
Сенашов С. И., Филюшина Е. В. О напряженно-деформированном состоянии пластически упрочняемых плит	515
Смолехо И. В., Киреев И. В. Точное решение в окрестности особых точек электрического поля, действующего на жидкий кристалл	517
Шанько Ю. В. О групповых свойствах уравнения неоднородной акустики	519

Секция
«ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Антишин Д. В., Василишин Д. В., Губин Д. Д. Особенности составления рецептур стартовых систем высокотемпературного самораспространяющегося синтеза при использовании органических энергоемких материалов	522
Будяков Д. О., Курочкина Е. Ю., Гаврилова Н. А., Субоч Г. А. Синтез производных N ⁸ -арил-5,8-хинолидиндиаминов	524
Волкова Д. С., Роот Е. В., Кукушкин А. А., Субоч Г. А. Применение метода масс-спектрометрии для идентификации 3(5)-метил-4-амино-5(3)-пиридин-4-ил-1Н-пиразола	527

Круглякова Л. А., Пехотин К. В., Попов М. А. Термическое разложение 3-нитро-1,2,4-триазолат гидразиния	529
Купряшов А. В., Шестаков И. Я. Синтез мелкодисперсного углеродного наполнителя из графита электрохимическим методом	531
Левченко С. И., Пен В. Р., Коляда К. А. Оптимизация состава эластомерных композиций с повышенной теплостойкостью для производства электроизоляционных резин	533
Моргунова Н. А., Товбис М. С. О корреляции между химическими сдвигами сигналов групп в ЯМР ¹ H спектрах и сигма-константами различных заместителей в бензольном кольце	535
Пен В. Р., Левченко С. И., Коляда К. А. Оценка параметров механической модели при изучении кинетики высокоэластической деформации полимерных материалов	537
Пономарев И. С., Косицына А. С., Кукушкин А. А., Роот Е. В. Доказательство строения 3(5)-хлорфенил-4-амино-5(3)-пиридин-3-ил-1h-пиразола масс-спектрометрическим методом	539
Рибий П. С., Кукушкин А. А., Роот Е. В. Масс-спектрометрический анализ синтеза 3(5)-фенил-4-амино-5(3)-пиридин-4-ил-1H-пиразола	541
Рябцева Т. А., Есякова О. А. Влияние процесса очистки скипидара на окружающую среду	544
Снежко А. А., Плотников С. А., Семенова А. Ю., Карелина Е. А., Пчелкина Т. А. Анализ методов контроля химического состава металлических материалов	547
Телегина П. В., Мамедов П. Н., Лунева Т. А., Слащинин Д. Г. Анализ молока и минеральной воды	550
Харченко И. А., Минаков А. В., Михлина Е. В., Немцев И. В., Рыжков И. И. Экспериментальное и расчетное исследование осаждения углерода в мембранах пористого анодного оксида алюминия	553

CONTENTS

Section

“PROJECTING AND PRODUCTION OF AIRCRAFT, SPACE RESEARCH WORKS AND PROJECTS”

Agaev R. N., Kalinin R. M., Koroteev A. V., Ganjin A. G., Churikov A. V. Strategic unmanned aerial vehicle with a long range and duration of flight	6
Agaev R. N., Salakhov A. M., Stepanov A. A. Advanced multi-purpose screen plan with closed wing	8
Anashkin D. A., Oleynikov E. P. Deflected surfaces of aircraft	11
Babkina L. A., Lopatin A. V. Numerical modeling of heat transfer in composite mesh structures of spacecraft	13
Volozhanin P. A., Nesterova A. V., Kolga V. V., Bykov A. V. The use of osculating elements in prediction of orbit evolution	15
Elpatov A. S., Kharlashina S. V., Oreshenko T. G. Electromagnetic fields in space	17
Zheleznov I. V., Rogacheva Yu. A., Shulepov A. I. On one method of placing on-board equipment in spacecraft compartments	19
Zamyatin D. A., Kolga V. V. Modeling of reflector mast construction	21
Kazantsev Z. A., Eroshenko A. M., Uvaev I. V., Lopatin A. V. Transformable parabolic reflector for cubesat platform	23
Kashfutdinov B. D. Model based design approach to design stabilisation system for an aircraft	25
Kolovsky I. K., Shmakov D. N. Assessment of the use the databases Norad for assessing the impact of solar activity on nodal period of satellites into a low circular orbit	27
Kombaev T. S., Artiomov M. E., Borshchev Yu. P. The spacecraft radiation shielding creating using the software for 3D modeling and additive technologies	30
Kremzukov Yu. A., Tsebenko N. N., Lukovnikov K. S., Saidanov A. R. Development of a device for monitoring the parameters of the power supply system	32
Nadein I. O., Kolga V. V. Determination of carrier-rocket launch paramets during air launch	34
Nesterova A. V., Volozhanin P. A., Kolga V. V., Mushenko A. V. Development of the truss of the transition compartment between the first and second stages of the aircraft	36
Popov D. R. Improvement of electric arc technology for obtaining vacuum coatings in the aircraft production	38
Solovev L. S. Application of meteorological rockets for launching small spacecraft	40
Ulanov M. A., Oleynikov E. P. Space transport systems as the basis for the development of astronautics	43
Faizov M. R., Mudrov A. P., Khabibullin F. F. Dynamics of the spherical mechanism of the spatial simulator	45
Fischenko A. V., Hvalko A. A., Sorokina E. G. Simplification of models	47
Chebotarev V. E., Vorontsova E. O., Sidorova E. A. Modeling of shadow zones in long orbits and features of calculation of parameters of power supply and thermal control systems of a spacecraft	49

Section

“LARGE TRANSFORMABLE CONSTRUCTIONS OF SPACECRAFT”

Anufrienko V. E., Nadein I. O., Gerus A. A., Bayborodov A. A. Method for parameters determination provided by the small spacecraft separation device	53
Arinchev S. V. 2D-simulation of the gravity-free laser-cutting dynamic process applied to the large space-debris object	55
Beloglazov A. P., Krestinin V. V., Eremin A. G. Assessment of the possibility of using carbon material in heat transfer devices aircraft	58
Belyaev A. S., Filipas A. A., Tyryshkin A. V. Simulation model of a reference weighting system for spacecraft elements	60
Bujakas V. I., Glotov M. D. Deployment kinematics of new precise petal-type reflector	63

Velichko A. I., Kisanov Yu. A., Tserikhov V. I., Matrosova I. V. Two-ring hoop reflector with a diameter 22 m	67
Gerus A. A., Kuznetsov A. D., Volkov M. V., Nadein I. O., Rybina U. I. Constuction and disconnection mechanism description of tear-off connector	69
Goncharov K. A., Simonov O. S., Novichkova S. A., Khmel'nitsky A. K., Khmel'nitsky Y. A. Reserch @ development of integral carbon fiber structures	71
Derishev D. V., Pustobaev M. V., Shmatkov A. V., Grabilin A. O. Features of high frequency loads simulation when simulating transient pyroshock from the activation of pyrotechnic devices of transformed structures	74
Zimin V. N., Kuvyrkin G. N., Zarubin V. S., Shakhverdov A. O. Development of mathematical model of force actuator for transformable space structures	76
Zimin V. N., Krylov A. V., Kuvyrkin G. N., Pavlov N. G., Filippov V. S. Experimental and theoretical investigations of force actuator for deployment of transformable large space structures	78
Zommer A. S., Ivanov A. V., Kravchunovsky A. P., Nemchaninov S. I., Adamovich A. I. Analysis of of torque value in the multi-time deployment-folding hinge	80
Zommer S. A., Ivanov A. V., Kravchunovsky A. P., Nemchaninov S. I., Adamovich A. I. Program for constant force spring automated calculating	83
Ivanov M. A., Petrov V. V. Monitoring the surface of the main mirror for the space observatory Millimetron using an interferometric system	86
Ivanov M. A., Petrov V. V. Application of photogrammetric systems for measuring elements of transformable space antennas	88
Karmanova A. V., Petrova Y. A., Hvalko A. A. Development of the design of the power structure of the on-board equipment module for the use of multi-lead electronic components	90
Kraevskiy P. A., Morozkov I. S., Bolgov V. V., Rukosuev D. L. The high precision transformation beam	92
Kudryavtsev I. V. Selection method of fixing method for straight waveguides to ensure their dynamic state during heating	94
Leonenkov A. D., Oberemok Y. A. The structure of the support frame of the central mirror of the space telescope "Millimetron"	97
Likhachev A. N. Theoretical foundations for creating structures with variable morphological and functional characteristics	99
Makarov S. N., Verhoglyad A. G., Stupak M. F., Ovchinnikov D. A., Oberemok Y. A. Mathematical modeling of the 3D scanner of the mirror system control system of the Millimetron observatory	101
Mihalkin V. M., Kuklin V. A., Dmitriev G. S., Il'vutikov S. A., Romanenko I. V. Weightlessness simulation method for testing the reliability of the small spacecraft separation system	103
Mishin S. V., Savelev R. A., Dremukhin M. A. Production of current collector rings from beryllium bronze	105
Ovchar A. V. Breakthrough motion without propellent: a research stand for studying new physical principles for space flight	107
Pokhabov Yu. P. Engineering reliability provision for deployable structures	110
Rudich A. I., Lisin V. A., Terekhina V. S., Zhil'skiy A. S. Development of metalworking technology by cooling the cutting zone with ionized air in vortex flows	112
Rykov E. V., Shtokal A. O., Bazhenova O. P., Bogachev V. A., Shilkina M. O. Design optimization method of deployment units thrust elements of spacecraft	114
Semeinykh Iu. A., Gerilovich A. G., Dvirnyy V. V. Development of the project of the system for ensuring the thermal regime of the spacecraft using phase-frequency control of cooling capacity	116
Seryakov A. V., Alekseev Andr. P. Short linear heat pipes investigation by the inverse thermal conductivity problem solving	119
Terletsky G. S., Zykov A. O., Taigin V. B., Morozkov I. S., Gocelyuk O. B. Development of elastic joints for the deployable membrane antennas	122

Section

“PROJECTING, PRODUCTION AND TESTING OF AEROSPACE ENGINES”

Agaev R. N., Kalinin R. M., Kambalin I. D., Koroteev A. V., Ganjin A. G. Calculation of the flow part of the power plant for an unmanned aerial vehicle	125
Balenkov D. S., Sokolov D. A., Shestov N. S., Tolstopyatov M. I. Prospects for using additive technologies in manufacturing LRE	128
Begishev A. M., Zhuravlev V. Y. Special configuration of calibration weight system for thrust measuring devices of firing test stand for liquid rocket engines	130
Zuev A. A., Arngold A. A., Danilov N. A. The balance of power low mass flow rate of centrifugal pumps and energy systems of aircraft and spacecraft	132
Zuev A. A., Arngold A. A., Danilov N. A., Falkova E. V. On the method of determining characteristic parameters in the flow parts of turbopump units under turbulent conditions	134
Klimovskiy D. A., Zhuravlev V. Yu. Constructive and technological ensuring reliability of diaphragm-separators for fuel tanks	136
Kozhemyakin S. A., Golikovskaya K. F. Best practices in the use of liquid rocket engines	138
Nesterov V. D., Zhuikov D. A. Development of an algorithm for determining the equilibrium thermodynamic state in the oxidative-reducing reaction of combustion products in the lre chamber	141
Novak V. A., Zhuikov D. A. Experimental studies of flow in the inter-blade channel of the centrifugal pump wheel	143
Pashkova N. D., Bezborodova K. V., Bobrova E. A. The initial design of a gas turbine engine for use on long-haul aircraft	146
Pilipenko A. A., Golikovskaya K. F., Nyukalova S. I. Design of lpre parts using three-dimensional simulation	148
Rutkovskaya M. A., Rutkovskiy V. O. New design of exhaust system “ring exhaust” for two-stroke boxer type engines	151
Savchin D. A., Nazarov V. P. The modeling process of cavitation characteristic determination of liquid-propellant rocket engine pumps	153
Sobolev A. A., Nazarov V. P., Nazarova L. P. Features of carrying out of check of shaking dynamometers for measurement of the twisting moment	156
Sokolov D. A. Balenkov, D. S., Tolstopyatov M. I. Schematic diagram of the test bench and method for processing experimental data of booster electric pump units	158
Torgashin A. S., Begishev A. M., Vlasenko A. V. Application of models based on the rayleigh-plesset equation to the simulation of the cavitation flow in tna lre	161

Section

“HEAT-MASS EXCHANGE PROCESSES IN AIRCRAFT, POWER STATIONS AND LIFE SUPPORT SYSTEMS”

Blagin E. V., A Dovgallo. I., Uskov I. A., Kuznetsova E. P. Determining parameters of the ribbing thermocompressor cavity	164
Bulov A. O. Natural refrigerants: estimation of the prospects of contemporary applied	166
Bulov A. O., Ermakov M. A. Improving the efficiency of climate systems	168
Delkov A. V., Chaykina K. A., Chabukashvili T. G., Abdullayev M. U. Mathematical model of a gas turbine	170
Ermakov M. A. The refrigerant R515b as a potential replacement for R134a	172
Kishkin A. A., Atroshchenko N. N., Shevchenko Yu. N. Mathematical model of a channel supply device	174
Kustov A. V., Lepp N. E., Snegireva A. V., Materikina E. O. Mathematical modeling of the built-in deflegmator	176
Litovchenko A. A. Application of screen-vacuum thermal insulation for spacecraft protection	178
Pogodin A. E., Dmitriev G. V., Shilkin O. V., Kolesnikov A. P. Investigation of ways to crate thermal control systems for high-power spacecraft, assessment of applicability	180
Prichina A. S., Fadeev A. A. Development of a compact fuel device	182

Hodenkov A. A., Vasileva E. K., Zhilinsky A. I. Thermal closed loop for experimental study of the boiling process	184
Hodenkov A. A., Vasileva E. K., Zhilinsky A. I. Temperature sensors for automated data recording system	186
Khodenkov A. A., Khodenkova E. V. Measuring set for steam plant testing	188
Chernenko V. V., Chernenko D. V. Mathematical model of evaporator-condenser	190
Shevchenko Yu. N., Kishkin A. A., Lugovoy Ye. N. Integral relation for the equations of boundary layer impulses over the surface of the annular section	193
Shevchenko Yu. N., Kishkin A. A., Lugovoy Ye. N., Abdullayev M. U. Profiling of the blade profile of the radial turbine	195

Section

“TECHNOLOGY IN ROCKET PRODUCTION”

Nazarov S. V., Shestakov I. Ya. Application of electrochemical deburring method	199
Nevatus I. S. Specific features of determination of hydrodynamic and thermal parameters in the flow sections of THP LRE	201

Section

“CONTROL SYSTEMS, SPACE NAVIGATION AND COMMUNICATION SYSTEMS”

Gelgorn A. V., Oleynikov E. P. Ballistic missile flight stabilization systems	204
Gladyshev A., Kolupaev A., Zhgun A., Buravleva M. Use of a spherical scanner in the stand for control and setting of antenna parameters of a satellite earth station	206
Golubev E. N. Diagnostics of ISS satellite computer network	209
Dalbaeva N. I., Ibragimova Ya. G., Kim A. A., Tereshenkova O. A. Verification of radio locators parameters using microwave photonic system with fiber optical delay lines	212
Egorova P. G. Research of the operation of the device for control of the electric drive of the test bench	214
Elpatov A. S., Oreshenko T. G., Kharlashina S. V. Methods for control of parameters of electrical elements of control systems	217
Elpatov A. S., Kharlashina S. V., Oreshenko T. G. 1n4001 diode simulation in Simintech	219
Ierusalimov S. A., Makaryants G. M. Analysis of problem of control basic on the dynamic model of gas turbine engine	222
Pinaev I. A., Oleynikov E. P. Astronavigation	225
Plykin K., Chursina O., Valikhanov M., Voloshko Y. B. Researching work area of the GLONASS system with different variants of construction orbital groups	227
Popov A. M., Kostin I. D., Kostrygin D. G., Fadeeva U. V. Adaptive control with implicit reference model of small spacecraft formation	230
Puchkov A. V., Dryzhinin A. A. The system of complex testing of the on-board equipment	232
Sidorov V. G. Simulation of a control system using neural networks	234

Section

“SPACE AND SPECIAL-PURPOSE ELECTRONIC INSTRUMENT ENGINEERING”

Katkov Aleksey. Film capacitors application to ensure reliability of the spacecraft power supply system	237
Kozlov S. I. Methods of energy recuperation of charged particles	239
Lepeshkina E. S. The fault tolerance analysis of cryptographic algorithm implementations the onboard of spacecrafts	241

Section

“ELECTRONIC COMPONENT BASE OF SPACE SYSTEMS”

Azin A. V., Ponomarev S. V., Rikkonen S. V., Maritsky N. N., Suntsov S. B. Review of methods for searching latent defects of printed circuit board	244
Ahmatshin F. G., Kazakotsev L. A. Selection of informative parametrs in the problem of automatic grouping of industrial products by homogeneous production batches	246
Berdichevsky Konstantin, Korolev Aleksey. New developments in hybrid 3D ICS based on european-made FPGAS for use in computer system of on-board spacecraft equipment	248
Golovanov S. M., Orlov V. I., Fedosov V. V. Using of algorithms of the formation of homogeneous groups for the testing of electronic components for space application	250
Kozlov S. I., Sukhanova O. A., Trifanov I. V. Conversion of microwave energy to direct electric current	252
Masich I. S. Assessment of clustering validity and homogeneity verification of eee groups	254
Mikhnev D. L., Orlov V. I., Rozhnov I. P., Erygin Y. V., Fedosov V. V. Method of cost formation of the on-board equipment of space vehicles	256
Rozhnov I. P., Kazakovtsev L. A., Orlov V. I., Lapunova E. V. Application of CUDA architecture to forming an electronic component base	258
Trifanov V. I., Pchelkina T. A. Influence of the modes of the anodic-abrasive polishing process on the surface roughness of small-section channels	260

Section

“CONTROL AND TESTING OF AEROSPACE EQUIPMENT”

Baranov M. E. Probabilistic-linguistic model as the basis for the functioning of the fault finding support system in technical systems	263
Grinberg G. M. Non-destructive inspection of products by the barkhausen effect method	266
Dvirniy G. V., Shevchuk A. A., Pastushenko O. V. Ways to improve the technical and operational characteristics of solar simulators for ground testing of spacecraft	268
Hahlenkov A. V., Kishalov A. A. Tests of local heating laser system	271

Section

“SMALL SPACECRAFT: PRODUCTION, EXPLOITATION AND CONTROL”

Evgrafov P. L. Innovative quartz generators for on-board equipment of small satellites	274
Malygin D. V. The architecture of on-board cable network multi-purpose block-modular platform “Synergy”	276
Malygin D. V., Yakovlev O. Ya. Internal thermal analysis of the nanosatellite based on block-modular multipurpose platform “Synergy”	279

Section

“USAGE OF EARTH’S REMOTE-SENSING DATA AND GEOINFORMATION SYSTEM FOR ENVIRONMENTAL MONITORING AND MODELLING”

Avdeenok V. L., Tuboltsev V. P. Analysis of activities of the ussuriisky polygraph in forests of Krasnoyarsky krai according to remote sensing data	282
Bakhtina A. V. Modification of a nonparametric algorithm for automatic classification of large volume statistical data	286
Galakova K. A., Okhotkina E. A. Analysis and assessment of agricultural land use using remote sensing tools and methods	288
Goncharov A. E., Gorodov A. A., Ogol’ A. R., Bondarev A. S., Apanasenko S. V. Online mapping services and the industrial archaeology of the Western Taimyr	291

Im S. T. Assessment of darkneedle stand mortality caused by siberian silkmoth using automatic nonparametric classification method	294
Im S. T., Lee V. G. Percent tree cover dynamics in darkneedle forest of Kuznetsky Alatau based on MODIS data	297
Lapko A. V., Lapko V. A. Methodology of hypothesis testing about the identity of the laws of distribution of random values in conditions of large volumes of statistical data	300
Lapko A. V., Lapko V. A. Modification of a nonparametric algorithm for automatic classification of large volume statistical data	303
Lapukhin E. G., Zolotarev V. V., Lapko R. V., Denisov S. V., Aristov N. I. Expanding the functionality of the Student mission control center for Earth monitoring	305
Platonova J. V., Komissariva O. Y. Monitoring of snow cover of urbanized areas	307
Tuboltsev V. P., Avdeenok V. L. Bathymetry of lake Ukok by means of Earth remote sensing	310
Shushpanov A. S., Petrov I. A., Golyukov A. S. Analysis of dark coniferous stands mortality on the territory of Kuznetsky Alatau	313

Section

“EXPLOITATION AND RELIABILITY OF AIRCRAFT”

Achkasova E. A., Dutta K. Analysis of modern fire and rescue aircrafts of western and Russian manufacturers	316
Badigov V. F., Elizarieva M. G., Batku O. P., Kovalenko G. D. Method for visualization of forest fires by raster processing of photos obtained using satellite imagery	319
Bouko O. G., Achkasova E. A., Trishin S. S. Analysis of indicators of the maintenance process in the aviation technical center “KrasAir” during the period of the airline operations	321
Vasileva E. K., Zhirnova E. A. Certification of test equipment in the laboratory of airport metrology LLC “Airport Emelyanovo”	324
Dracova A. V., Malakhova Yu. G. Automation of verification of electrical measuring devices	326
Dutta K., Bouko O. G. Post Covid-19 air travel for years to come	328
Elizariiev D. A., Borkovec D. V., Elizareva M. G., Kovalenko G. D. Signs of aircraft engines, displayed in the artifacts of Siberia	330
Emelyanov A. N., Batku O. P. Modernization of the aircraft fuel system	333
Kuznetsova Z. A., Ladygin A. P., Sinichenko M. I., Kuznetsov A. D., Kleshnina I. A. Photopolymer material testing to provide the high tightness	337
Musonov V. M., Badygov V. F., Batku O. P. Measurement of phase shifts in aviation radio systems	340
Nikitin S. S., Skulyabina O. V. The usage of irregular matrix of dissimilar eddy-current sensors in problems of non-destructive control of flat surfaces	343
Ogorodnikova Y. V., Lukasov V. V. Analysis of the diagnostic system the technical condition of the helicopters	345
Pisarev N. S., Aref'ev R. O. Prospects for application of machine learning in aviation radio electronic systems	347
Timokhovich A. S., Kunin I. S. Flight and navigation system with intelligent crew support	349
Timokhovich A. S., Popov D. M. Study of the economic feasibility of using the BE-200CHS aircraft	352
Trishin S. S., Bouko O. G. Analysis of the process of maintenance of the AN-26 aircraft according to the data of the aviation technical center	354

Section

“TECHNOLOGY AND MECHATRONICS IN MACHINE BUILDING”

Binchurov A. S., Griбанov A. P., Zhabinskaya D. A., Gordeev Y. I., Jasinski V. B. Research of the process of obtaining powder materials by rotary turning multifaceted cutters	358
Bryukhanov E. E. Peculiarities process of the laser welding aluminum foil and control	361
Vidlatsky A. S. Metrological support of production of products from metal-polymer composite materials	363

Gordeev Y. I., Binchurov A. S., Krivov D. A., Filippov S. V., Smorkalova A. S. Features of shredding processes by crusher with EC – the profile rolls	365
Dubova S. A., Igolkin A. A. Development of a pneumatic precision positioning drive	368
Eliseev S. V., Bolshakov R. S., Nikolaev A. V. The formation of dynamical condition of vibration technological machine in the presence lever ties	370
Kalashnikov A. S., Kucherenko A. D., Girn A. V., Rudenko M. S. Miheev A. E. The research of the influence of the initial ruggedness of the samples on the friction coefficient of the friction pair	373
Kalmykov A. A. Production of thin walled pipes by drawing method	376
Levanovich S. V., Zverintseva L. V. Problems of restoration of body parts of automobile internal combustion engines	378
Levko V. A., Litovka O. V., Savin D. I. Refined diagram of single grain contact for abrasive flow machining by high-viscosity medium	380
Mikhnev M. M., Kudryavtsev I. V., Silchenko P. N. Technological issue of manufacturing extended waveguide distribution systems for spacecraft	383
Petrov I. N., Razzhivin V. A., Lishchenko R. I., Sychev E. V. Research of the limit strains during incremental forming of sheet metal	388
Rusakova L. Yu. Project stages of integrated quality management system and lean production of ageosynthetic materials	390
Silchenko P. N., Novikov E. S., Mikhnev M. M. Ion-plasma nitriding of fine-module gears in spacecraft mechanical drives	394
Stakhnova M. V. Effect of mill vibration on surface quality during high-speed processing of aluminum alloys	397
Sukhanova O. A., Yakubovich I. O., Mal'ko L. S. Design and technological solutions for the design of a multi-blade tool for cutting worm turns of a globoid-cylindrical transmission	399
Terin A. M., Tutushkin A. K., Pankov D. E., Solomonov I. A. Snetkov P. A. Problems of training personnel to work on TPA machines	401
Trifanov V. I., Karelina E. A. Model of formation of zones of the channel wall of the waveguide pipe based on the distribution of parameters of plastic deformation and the action of the drawing force	403
Trifanov V. I., Sukhanova O. A., Trifanov I. V. Calculation of strength of plastic edge friction between the tool mandrel and the surface of the channel pipe waveguide at drawing	405
Usevich N. I., Binchurov A. S., Gordeev Y. I., Balandina M. V., Yakuchenis S. A. Use of group technologies for manufacturing parts of universal assembly devices	407

Section

“MECHANICS OF SPECIAL SYSTEMS”

Eresko S. P., T Eresko. T., Eresko W. S., Fomin A. G. Simulation of water cooling systems for induction heating complexes	411
Ivanov Yu. F., Eresko S. P., Klopotov A. A., Ustinov A. M., Abzaev Yu. A. Investigation of the effect of electron beam irradiation on the mechanical properties of a7 grade aluminum and a aluminum/ carbon fiber layered composite	414
Kukushkin E. V. Mathematical model of the transfer cardan transmission for calculation of the own frequencies of vibrations	417
Kukushkin E. V. Mathematical model of the transfer cardan joint for calculation of the own frequencies of vibrations	420
Kustov A. V., Kornev V. M., Mezhev V. G., Baltser A. A., Fits D. F. Study of influence of forces in the diameter steam bubbles on vortex stage at rectification	423
Ponomarev S. I., Eresko S. P. Automation of technological processes for manufacturing ce-ramic units	425
Struchkov A. V., Klimov A. A. Study of transmission loading of experimental tractor in process of extreme operating modes	428
Dremukhin M. A., Nagovitsin V. N. Method for producing reflector elements from polymeric composite materials	431

Section

“NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES IN AEROSPACE INDUSTRY”»

Gerasimov V. S., Ershov A. E., Bikbaev R. G., Karpov S. V. Polarization-sensitive modes in anisotropic photonic crystal nanostructures	435
Ershov A. E., Gerasimov V. S., Polyutov S. P., Karpov S. V., Semina P. N., Bikbaev R. G. Optical kerker effect in periodic structures of aluminum nanoparticles	437
Zuev D. M., Okhotkin K. G. Modified formulas for maximum deflection: comparison with experimental data	440
Kozlov S. I., Pchelkina T. A., Trifonov I. V. Improving the operating parameters of electron beam energy recuperators	442
Kostyukov A. S., Klyuchantsev A. B., Ershov A. E., Gerasimov V. S., Karpov S. V. Mechanisms of irreversible damage to malignant cells by ferromagnetic nanoparticles in an alternating magnetic field	444
Pisarev N. S., Achkasova E. A. Application of carbon nanotubes in missile complexes	446
Ryzhkov I. I., Bortsova A. A., Mishnev M. O., Novikova S. A., Khartov S. V. Switchable ion transport in nanostructured membranes with electrically conductive surface	448
Ryseva A. S. Multi-walled carbon nanotube composites for UHF-devices	451
Sakovich O. V., Vaituzin O. P., Rogilo D. I. Obtaining electrostatic potential distribution maps on indium selenide films of different thickness	453
Tambasov I. A., Voronin A. S., Masyugin A. N., Tambasova E. V., Gornakov M. O. Synthesis and electrical properties of thin nanocomposite ZnO/SWCNTS films	456
Utyushev A. D., Ershov A. E., Gerasimov V. S., Zakomirnyi V. I., Karpov S. V. Collective lattice resonances in dielectric nanostructures at different angles of incidence radiation	458
Ushakov A. V., Karpov I. V., Fedorov L. Yu. Study of the ferromagnetic properties of CuO nanoparticles	461
Kharkov A. M., Gelgorn A. V., Mironenko V. V. Dielectric permittivity $Tm_{0.1}Mn_{0.9}S$	463
Khokhlova T. N., Andryushchenko T. A., Parshin A. S. Study of inelastic electron scattering cross section spectra of Al by different methods	466
Khokhlova T. N., Deryabin A. S., Pchelyakov O. P. Study of the structure of heteroepitaxial layers $GexSi_{1-x}/Si(001)$ depending on discrepancy of the lattice parameters of the heterosystem	468

Section

“CONTINUUM MECHANICS (GASDYNAMICS, HYDRODYNAMICS, THEORY OF ELASTICITY AND THEORY OF PLASTICITY, REOLOGY)”

Gomonova O., Rigaud J., Andrieu E. Modelling of four-point bending test taking into account dissymmetry of the yield surface of material	471
Belolipetskii V. M., Genova S. N. Hydrothermics of the Abakan channel on the Yenisei river, numerical modeling	474
Belolipetskii V. M., Genova S. N. On the application of a one-dimensional model of permafrost dynamics for Toolik lake region (Alaska)	476
Efimov E. A. Numerical simulation of the impact of a pulse seismic source on the ground	478
Efimova M. V. Construction of an exact solution of the problem describing stationary convective two-layer flow with the energy of interphase heat transfer	480
Krom A. I., Medvedeva M. I., Ryzhkov I. I. Mathematical modelling of ionic conductivity in nanoporous membranes with electrically conductive surface	482
Kubyshkina D. R., Sabirov R. A. The influence of the squares of the first derivatives of the bending function on the values of membrane forces in flexible plates	485
Kudryavtsev I. V. The stress and deformed state of waveguides at inertial loading	487
Matveev A. D. The method of equivalent strength conditions in calculations of elastic bodies with inhomogeneous regular structure	490
Matveev A. D. The basic theorem of the method of equivalent strength conditions	493
Matveev A. D. The method scaling in calculations of composites bodies	496

Nemirovsky Y. V., Feodorova N. A. Determination of the unknown trajectories of reinforcement in terms of related strains for a plane problem	499
Petrakov I. E. Modeling the bending of thin plates from a single-layer fiber composite taking into account different flexural rigidity	502
Rudakov G. O., Malygina A. S., Pyshnograï G. V., Laas A. A. Modeling of rheological properties of polyethylene melts during uniaxial elongation.....	504
Sabirov R. A. Regulation of the stress-deformed state of the bended thin of the plate by extension by membrane forces	506
Sabirov R. A. Strength and rigidity of a rectangular plate with complex flexion from the orientation of the fiber of the composite.....	509
Savostyanova I. L., Senashov V. S. On the construction of stress discontinuity lines during plastic torsion of rods.....	512
Senashov S. I., Savostyanova I. L. On the construction of three-dimensional solutions of ideal plasticity equations	513
Senashov S. I., Filyushina E. V. About the stress-deformed state of plasticly strengthened plates	515
Smolekho I. V., Kireev I. V. Exact solution in the neighborhood of singular points of the electric field acting on a liquid crystal	517
Shan'ko Yu. V. On group properties of the inhomogeneous acoustics equation	519

Section

“CHEMISTRY AND CHEMICAL TECHNOLOGIES”

Antishin D. V., Vasilishin D. V., Gubin D. D. Peculiarities of the composition of starting systems for self-propagating high-temperature synthesis when using organic energy consuming materials	522
Budyakov D. O., Kurochkina E. Y., Gavrilova N. A., Suboch G. A. Synthesis of N ⁸ -aryl-5,8-quinolindiamines derivatives.....	524
Volkova D. S., Root E. V., Kukushkin A. A., Suboch G. A. Usage mass spectrometry for identification 3(5)-methyl-4-amino-5(3)-pyridine-4-yl-1H-pyrazole	527
Kruglyakova L. A., Pekhotin K. V., Popov M. A. Thermal decomposition of hydrazinium 3-nitro-1,2,4-triazolate.....	529
Kupryashov A. V., Shestakov I. Y. Synthesis of a fine carbon filler from graphite by the electrochemical method	531
Levchenko S. I., Pen V. R., Kolyada K. A. Optimization of elastomeric compositions with increased heat resistance for electrical insulating rubber production	533
Morgunova N. A., Tovbis M. S. Correlation between chemical shifts of group signals in ¹ H NMR spectra and sigma constants of various substitutes in the benzene ring	535
Pen V. R., Levchenko S. I., Kolyada K. A. Estimation of the parameters of a mechanical model in studying the kinetics of high elastic deformation of polymeric materials	537
Ponomarev I. S., Kositsyna A. S., Kukushkin A. A., Root E. V. Proof of the structure of 3(5)-chlorophenyl-4-amino-5(3)-pyridin-3-il-1h-pyrazole by mass spectrometry	539
Ribiy P. S., Kukushkin A. A., Root E. V. Mass spectrometric analysis of the synthesis of 3(5)-phenyl-4-amino-5(3)-pyridin-4-il-1H-pyrazole	541
Ryabtseva T. A., Esyakova O. A. The impact of the turpentine purification process on the environment	544
Snezhko A. A., Plotnikov S. A., Semyonova A. Yu., Karelina E. A., Pchelkina T. A. Analysis of chemical composition control methods metallic material	547
Telegina P. V., Mamedov P. N., Luneva T. A., Slashchinin D. G. Analysis of milk and mineral water	550
Kharchenko I. A., Minakov A. V., Mikhlina E. V., Nemtsev I. V., Ryzhkov I. I. Experimental and theoretical study of carbon deposition in porous anodic alumina membranes	553