

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средствам массовой коммуникации  
Свидетельство о регистрации  
ПИ № ФС77-64098  
от 18 декабря 2015 г.

ISSN 2409-1650

Главный редактор  
**Артюшенко  
Владимир  
Михайлович,**  
д.т.н., профессор

Над выпуском работали:  
Паршина Ю.С.  
Пирогова Е.В.

Адрес редакции:  
141070, Королев,  
Ул. Октябрьская, 10а  
Тел. (495)543-34-31

При перепечатке любых материалов ссылка на журнал «Информационно-технологический вестник» обязательна

Редакция не несет ответственности за достоверность информации в материалах, в том числе рекламных, предоставленных авторами для публикации

Материалы авторам не возвращаются

Подписано в печать  
19.03.2018.

Отпечатано  
в типографии  
ООО «Научный консультант»  
г. Москва  
Хорошевское шоссе, 35, корп.2

Тираж 500 экз.

## СОДЕРЖАНИЕ

### *АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА*

Алексеевич М.Ю., Дубинин В.С., Шкарупа С.О.  
**ПНЕВМОАККУМУЛЯТОРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ  
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ.....33**

Артюшенко В.М., Виноградов Д.Ю.  
**АНАЛИЗ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ УСТОЙЧИВЫХ ОРБИТ  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ.....12**

Дубровин В.М., Семенов К.С., Исаев В.Г., Озерский М.Д.  
**МЕТОД РАСЧЁТА КВАЗИСТАТИЧЕСКОЙ  
НАДЁЖНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ПРИ РАЗРАБОТКЕ  
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ.....23**

Мороз А.П.  
**МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАКТА  
ВОЗНИКНОВЕНИЯ И МЕСТА ВЗРЫВА НА БОРТУ  
САМОЛЕТА.....33**

Рудаков В.Б., Макаров В.М., Макаров М.И.  
**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ  
ВЫБОРОЧНОГО КОНТРОЛЯ СОВОКУПНОСТЕЙ  
КОМПЛЕКТУЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ НА СБОРОЧНЫХ  
ПРЕДПРИЯТИЯХ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ.....39**

Шамаев А.М., Озерский М.Д.  
**ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ  
КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА НА ИЗМЕНЕНИЯ  
ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩИХ  
ПОКРЫТИЙ КЛАССА «СОЛНЕЧНЫЙ ОТРАЖАТЕЛЬ»...56**

### *РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ*

Артюшенко В.М., Воловач В.И.  
**ОРГАНИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО  
СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО КАНАЛА  
БЛИЖНЕГО ДЕЙСТВИЯ, УСТОЙЧИВОГО  
К ЗАМИРАНИЯМ СИГНАЛА.....72**

Воловач В.И., Артюшенко В.М.  
**АНАЛИЗ ОПИСАНИЯ НЕГАУССОВСКИХ  
СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ, СИГНАЛОВ  
И ПОМЕХ С ПОМОЩЬЮ КУМУЛЯНТНЫХ  
ФУНКЦИЙ.....84**

Сальников О.Н., Полубан А.Д.  
**ПРОЕКТИРОВАНИЕ КИХ-ФИЛЬТРОВ  
В СРЕДЕ МАТЛАВ НА БАЗИСЕ РОССИЙСКОГО  
МИКРОПРОЦЕССОРА «СПУТНИК».....94**

*РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ*

1. **Барканов Е.Н.**, *Dr.sc.ing.*
2. **Васильев Н.А.**, *д.т.н., профессор*
3. **Леоненко Д.В.**, *д.ф.-м.н., профессор*
4. **Тимофеев А.Н.**, *д.т.н., профессор*

*РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ*

1. **Аббасова Т.С.**, *к.т.н., доцент*
2. **Бухаров С.В.**, *д.т.н., профессор*
3. **Воловач В.И.**, *д.т.н., профессор*
4. **Логачева А.И.**, *д.т.н., профессор*
5. **Макаров М.И.**, *д.т.н., профессор*
6. **Матвиенко Ю.Г.**, *д.т.н., профессор*
7. **Разумовский И.М.**, *д.ф.-м.н., профессор*
8. **Рудаков В.Б.**, *д.т.н., профессор*
9. **Смердов А.А.**, *д.т.н., профессор*
10. **Стрелянюк Ю.В.**, *д.т.н., профессор*

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И УПРАВЛЕНИЕ**

Вилисов В.Я.  
**АЛГОРИТМ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРЕДПОЧТЕНИЙ  
ОПЕРАТОРА, УПРАВЛЯЮЩЕГО  
РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ  
В ИГРОВОЙ СРЕДЕ.....103**

Корнева Л.А., Хорев П.Б.  
**РАЗРАБОТКА КАРКАСА БЕЗОПАСНОГО  
ПРИЛОЖЕНИЯ С КЛИЕНТ-СЕРВЕРНОЙ  
АРХИТЕКТУРОЙ.....112**

Мокрова Н.В., Мокров А.М.  
**ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА РЕАЛИЗАЦИИ  
ДИСТАНЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ.....120**

**МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Антипова Т.Н., Лабутин А.А.  
**ОБОСНОВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННОГО  
ЖАРОПРОЧНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО  
МАТЕРИАЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТАЛЛОВ  
ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ МЕТОДОМ  
МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ.....127**

Ларионов Н.В.  
**ПОКРЫТИЯ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ,  
ПОЛУЧЕННЫЕ ПИРОЛИЗОМ  
МОНОМЕТИЛСИЛАНА, НА  
РЕАКЦИОННО-СВЯЗАННОМ КАРБИДЕ КРЕМНИЯ.....137**

Миронихин А.Н., Лисицын Д.С., Шаньгин К.В.  
**РАЗРАБОТКА ОСНАСТКИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ  
НА СДВИГ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ  
ОБРАЗЦОВ ИЗ ТОНКОСТЕННЫХ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....145**

Николаева Е.А., Тимофеев А.Н., Михайловский К.В.  
**СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ  
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОЛИМЕРОВ  
И ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ.....156**

Сидоров М.И., Ставровский М.Е., Пирогов В.В., Юрцев Е.С.  
**ОБОСНОВАНИЕ ФОРМАЛИЗОВАННОЙ ОЦЕНКИ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ.....169**

Скрябин М.Л.  
**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБРАЗОВАНИЯ  
ОКСИДНЫХ ПЛЕНОК НА АЛЮМИНИЕВЫХ  
СПЛАВАХ ПРИ ОКСИДИРОВАНИИ В ВОДНЫХ  
ЭЛЕКТРОЛИТАХ.....182**

УДК 621.541:621.311

**Пневмоаккумуляторная система для возобновляемых источников энергии**

**М.Ю. Алексеевич**, победитель программы «УМНИК», технический специалист ООО «РАМ», г. Королев, Московская область,

**В.С. Дубинин**, к.т.н., с.н.с.,

**С.О. Шкарупа**, зав. лабораторией технологического оборудования и оснастки при колледже,

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области

«Технологический университет», г. Королев, Московская область

*Для энергообеспечения удаленных объектов распространенным решением становится децентрализованное энергоснабжение. Одним из способов технической реализации такого вида энергоснабжения является генерация энергии с помощью возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Несмотря на значительное расширение источников получения энергии (солнечные модули, ветрогенерация и т.д.) во многом открытым остаётся вопрос аккумулярования энергии. В настоящее время процесс развития и постоянной модернизации различных типов аккумуляторов для ВИЭ представляет научный и практический интерес.*

Электроснабжение, автономная генерация, ВИЭ.

**Pneumatic rechargeable battery system for renewable energy sources**

**M.Y. Alekseevich**, Winner of the «UMNIK» program, Technical Specialist, RAM LLC, Korolev, Moscow region,

**V.S. Dubinin**, Candidate of Engineering Sciences, senior researcher,

**S.O. Shkarupa**, Head of the Laboratory,

State Educational Institution of Higher Education

Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

*To provide power supply of remote objects, a common solution is decentralized energy supply. One way to implement this method of energy supply is to generate energy using renewable energy sources (RES). Despite the significant expansion of energy sources (solar modules, wind generation), the question of energy storage remains largely open. At present, the process of development and permanent modernization of various types of batteries for RES is of scientific and practical interest.*

Power supply, stand-alon power generation, renewable energy sources.

В настоящее время актуальной становится проблема обеспечения высокоточной навигации в условиях затруднения приема сигналов спутниковых систем навигации GPS/ГЛОНАСС, особенно остро данная проблема проявляется в связи с развитием крайнего севера и шельфовой зоны Северного Ледовитого океана. Что касается развития данного региона с целью обеспечения обороноспособности РФ, то важным условием обороноспособности становится обеспечение устойчивости навигационных систем в условиях подавления спутниковых систем навигации (в т.ч. средствами радиоэлектронной борьбы (РЭБ) противника на театре военных действий). Надежным средством обеспечения устойчивости к подавлению спутниковых систем навигации является Локальная радионавигационная система (ЛРНС). Широкое распространение получила идея создания ЛРНС с помощью псевдоспутниковой сети [5], реализация которой способна решить озвученные проблемы, а также облегчить изучение обширных прилегающих территорий [1]. Для развёртывания псевдоспутниковой сети в отдалённых северных районах необходимо также решить проблему надёжного источника электроэнергии псевдоспутников. В данной работе авторы попытаются рассмотреть один из вариантов решения этой проблемы. С учётом отдалённости зон предполагаемой установки элементов ЛРНС и малой мощности псевдоспутников экономически нецелесообразно прокладывать к ним централизованные электросети, и самым эффективным вариантом представляется использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Крайний север России хорошо подходит для внедрения энергоустановок, использующих энергию ветра и приливов, а также солнца в летний и частично в зимний периоды. Для непрерывного функционирования элементов ЛРНС необходимо решить проблему аккумуляции энергии.

Наиболее часто для решения данных задач используются электрохимические аккумуляторы, недостатком которых является саморазряд и необходимость их нахождения в отапливаемом помещении, так как при понижении температуры резко падает ёмкость аккумуляторов (последний фактор является критическим в условиях крайнего севера). Кроме того, помещение в котором находятся аккумуляторы подобного типа должно отвечать определённым требованиям из-за выделения водорода аккумуляторами.

Альтернативой авторы видят использование пневмоаккумуляторов, с учётом последних достижений в этой отрасли. Известны пневмоаккумуляторные системы, в которых воздух сжимается компрессором и заполняет баллоны до давления 130 и более атмосфер. Затем при разряде пневмоаккумуляторной системы воздух из баллона проходит в редуктор, который обеспечивает постоянство давления за ним при падающем при разряде давлении в баллоне. После редуктора воздух расширяется в одном из типов пневматических двигателей, вращающих электрогенератор. КПД таких систем даже теоретически не может превышать 40%, так как при сжатии воздуха отводится тепло в окружающую среду через систему охлаждения компрессора. Далее воздух охлаждается в охладителе перед тем как поступить в баллон для обеспечения его большего запаса в баллоне. Такие системы применяются на крупных элек-

тростанциях (десятки мегаватт) для хранения большого избытка энергии, и не эффективны для решения поставленной задачи. Также известна разработка [2], предполагающая адиабатную пневмоаккумуляторную систему, в которой при сжатии воздуха в компрессоре в цилиндр компрессора впрыскивается вода, обеспечивающая внутреннее охлаждение. Затем эта вода отделяется от воздуха и, как и воздух, хранится в теплоизолированной ёмкости. При разрядке пневмоаккумуляторной системы эта горячая вода подогревает воздух. Данная система, безусловно, перспективна для относительно больших мощностей, чем те, которые рассматриваются в данной работе. Для микроэлектростанций, способных обеспечить функционирование узлов псевдоспутниковой сети, подобный принцип трудноосуществим, в то же время для микроэлектростанции габариты и масса не имеют большого значения вследствие относительной малых значений их абсолютных величин. Поэтому предлагается упрощённый вариант адиабатной пневмоаккумуляторной системы мощностью в несколько кВт. В её состав будет входить два обратимых поршневых пневмодвигателя, которые смогут работать как в режиме пневмодвигателя, так и в режиме компрессора низкого давления, и теплоизолированный ресивер сжатого воздуха. В период избытков электроэнергии компрессор сжимает воздух и наддувает им ресивер. В период накопления электроэнергии компрессор работает в режиме пневмодвигателя, при этом рабочий процесс также близок к адиабатному. Использование двух подобных агрегатов позволяет выполнять процесс подпитки ресивера и производства энергии пневмодвигателем одновременно. При хорошей теплоизоляции баллона и элементов установки КПД такого пневмоаккумулятора может достигать относительно высоких значений.

На сегодняшний день объединённая научная группа «Промтеплоэнергетика» провела эксперименты на пневмодвигателе, полученном путем конверсии двухцилиндрового бензинового четырёхтактного двигателя УД2-М рабочим объёмом 0,6 литра. Получена мощность на лампах накаливания с применением асинхронного электрогенератора, имеющего низкий КПД, 2,055 кВт при давлении сжатого воздуха 7 атмосфер и частоте вращения пневмодвигателя 890 об/мин.

Эта пневмогенераторная установка разработана и создана объединённой научной группой «Промтеплоэнергетика» совместно с Московским институтом энергобезопасности и энергосбережения при финансировании части проекта последним для других целей до этапа действующего макета. До этапа экспериментальной установки данный проект был доведен при поддержке Фонда содействия инновациям (договор № 9527ГУ/2015 от 01.02.2016 года). Однако конструктивные решения и опыт испытаний позволяют сделать вывод о возможности создания, обратимого пневмодвигателя на давлении 3-4 атмосферы, осуществляющего процесс близкий к адиабатному как в режиме компрессора, так и в режиме пневмодвигателя, при дальнейшей реализации проекта. Подобный агрегат сможет обеспечить функционирование системы описанной выше. Подробнее о проведенном эксперименте ниже.

Пневмодвигатель был выполнен путем конверсии бензинового четырехтактного двухцилиндрового двигателя УД-2 рабочем объемом 600 см<sup>3</sup> в пневмодвигатель. Распределительный вал в этом двигателе был заменен на вал, обеспечивающий одновременное открытие и закрытие впускных и выпускных клапанов цилиндра таким образом, чтобы они оба работали как выпускные. В качестве впускного устройства использовалось золотниковое устройство, вращающийся золотник которого приводился электродвигателем ЕСМА-С 10604GS AC SERVO MOTOR. Пневмодвигатель имел по одному золотниковому устройству на каждый из двух цилиндров. На коленчатом валу пневмодвигателя был установлен энкодер 8.A02H.1132.1024. Энкодер и два электродвигателя были объединены в систему «электронный вал» с помощью специальной электронной системы смонтированной в ящике управления. Она обеспечивала синхронное вращение коленчатого вала и двух золотников, причем частота вращения золотников была в два раза ниже частоты вращения коленчатого вала, так как каждый золотник имел две симметрично расположенные впускные щели и за один оборот золотника воздух в цилиндр подавался два раза. Эта система обеспечивала возможность перед запуском двигателя установить угол предварения впуска, то есть угол между положением коленчатого вала при открытии впускной щели (нормально это должно происходить до прихода поршня в верхнюю мертвую точку (ВМТ)) и положением коленчатого вала в ВМТ (отрицательное значение этой величины в протоколе испытаний означает, что впуск воздуха происходил после ВМТ). Система обеспечивала контроль установки коленчатого вала при запуске (горение желтой лампы) в пределах 12-16 градусов после верхней мертвой точки первого цилиндра (ближний цилиндр к шкиву), что обеспечивало надежный запуск при открытии шарового крана подачи воздуха, в том числе при испытаниях пневмодвигателя при одном отключенном цилиндре. Образец пневмодвигателя для пневмоаккумуляторной установки будет иметь большую мощность и количество цилиндров в нём будет три или более. Пневмодвигатели с таким количеством цилиндров, как показывает опыт создания шахтных пневмомоторов и паропоршневых двигателей, не требуют установки коленчатого вала в определенное положение для своего запуска.

Исследуемый пневмодвигатель был установлен на сварной раме вместе с двухскоростным асинхронным электродвигателем АИР 100S4/2 с синхронными частотами вращения 1500 и 3000 об/мин и мощностью соответственно 3 и 3,75 кВт. Этот электродвигатель выполнял роль электрогенератора и его вал был соединен с коленчатым валом пневмодвигателя зубчатременной передачей с передаточным отношением 2. Частота вращения пневмодвигателя была ниже частоты вращения такого электрогенератора. Такой электродвигатель является потребителем реактивной мощности как при работе в режиме электродвигателя, так и в режиме электрогенератора, поэтому при работе автономно от электрической сети в режиме электрогенератора требует подсоединения к источнику реактивной мощности. В данном случае это были конденсаторы.

Сварная рама, несущая на себе пневмодвигатель и электрогенератор была установлена на столе, имеющем сварное металлическое основание и деревянную крышку для снижения вибрации, что позволяло сливать масло из пневмодвигателя. Было использовано масло И-20, имеющее меньшую вязкость, чем штатное масло бензинового двигателя, так как в отличие от бензинового двигателя пневмодвигатель не нагревается, а охлаждается (при повышении температуры вязкость масла снижается). Под крышкой стола были расположены розетки штепсельных разъемов нагрузки и конденсаторов. Кабель розетки штепсельного разъема конденсаторов был соединен непосредственно с электродвигателем. Кабель розетки штепсельного разъема нагрузки был соединен с переключателем так же расположенным под крышкой стола с выходом ручки управления на его поверхность. Этот переключатель обеспечивал три положения: «1500 об/мин.»; «3000 об/мин.»; «электрогенератор отключен». Электродвигатель/электрогенератор подключён по схеме Даландера. Вилка штепсельного разъема конденсаторов имела кабель соединяющий с ней конденсаторы расположенные на столике управления и приборов, на этом же столике располагались лампы накаливания (нагрузка) к этому столику подходил кабель от вилки штепсельного разъема нагрузки. На вертикальной панели прикрепленной к этому столику были расположены три щитовых вольтметра подсоединенные к фазе и нулевой точке, три амперметра нагрузки, три амперметра конденсаторов. На поверхности столика управления располагалась три блока ламп накаливания изготовления МИИЭЭ, каждый блок был подсоединен к своей фазе и нулевой точке. На нем были установлены четыре патрона Е-27 для четырех ламп накаливания. Блок позволял установку четырех ламп мощностью до 95 Вт. Вследствие своих малых размеров лампы 200 и 300 Вт могли быть ввернуты в два крайних патрона. Для обеспечения оперативного включения нагрузки без перекосов по фазе эти блоки были подключены каждый к своей фазе через трехфазный пакетный выключатель. Кроме того через другой трехфазный пакетный выключатель были подключены три лампы установленные в патронах Е-27 и закрепленных на фанерном основании. В эти три патрона могли быть установлены в том числе лампы мощностью 200 и 300 Вт.

На другой вертикальной панели этого столика располагались два пакетных выключателя, имеющие общий выход на кабель, соединённый с вилкой конденсаторов, а на входе они были подсоединены (на конечной стадии экспериментов) к конденсаторному блоку МИЭЭ и конденсаторному блоку с установленными на нем двумя пакетными выключателями обеспечивающими три варианта подключения: «10МкФ»; «0,333 МкФ» и «10,333 МкФ». В первом случае использовались три конденсатора по 10МкФ на 1000В, соединенные треугольником, во втором случае другие такие же конденсаторы соединенные звездой и в третьем случае их сумма.

Кроме упомянутых вольтметров и амперметров имелся вольтметр и амперметр, переданные МИЭЭ. При проведении контроля этот амперметр подключался последовательно к каждому из амперметров нагрузки (при не-



использовании этого амперметра в штекеры, в которые вставлялись его клеммы, были вставлены токовые петли). По ряду технических причин они использовались только как индикаторы отсутствия перекоса нагрузки.

Пневмодвигатель через коллектор, соединенный с образцовым манометром кислородным шлангом длиной 3 метра и диаметром 9 мм, был подсоединён к ресиверу компрессора сильфонным трубопроводом с условным проходом 32 мм через шаровой кран с условным проходом 20 мм. Производительность компрессора составляла 1,2 м<sup>3</sup>/мин. Из коллектора имелось 2 выхода с условным проходом 25 мм, которые были соединены с сильфонными трубопроводами с входами золотниковых устройств. Во входном штуцере указанного кислородного шланга был установлен дроссель с диаметром отверстия 2 мм. Параллельно с сильфонным трубопроводом подачи воздуха в коллектор был установлен шланг диаметром 9 мм, который использовался при запуске пневмодвигателя. Схема установки показана на рис. 1, где цифрами обозначены следующие элементы: 1,3 – блоки ламп накаливания; 2,12,13 – пакетные выключатели; 4 – золотниковое устройство; 5 – манометр; 6 – пусковой кран; 7 – ресивер; 8 – компрессор; 9 – серводвигатель; 10 – сервопреобразователь; 11 – ЭВМ; 14 – блок конденсаторов; 15 – асинхронный электрогенератор; 16 – кривошипно-шатунный механизм; 17 – инкрементальный энкодер; 18 – программируемый логический контроллер. Внешний вид на рисунке 2. Выписка из протокола испытаний приведена в таблице № 1.

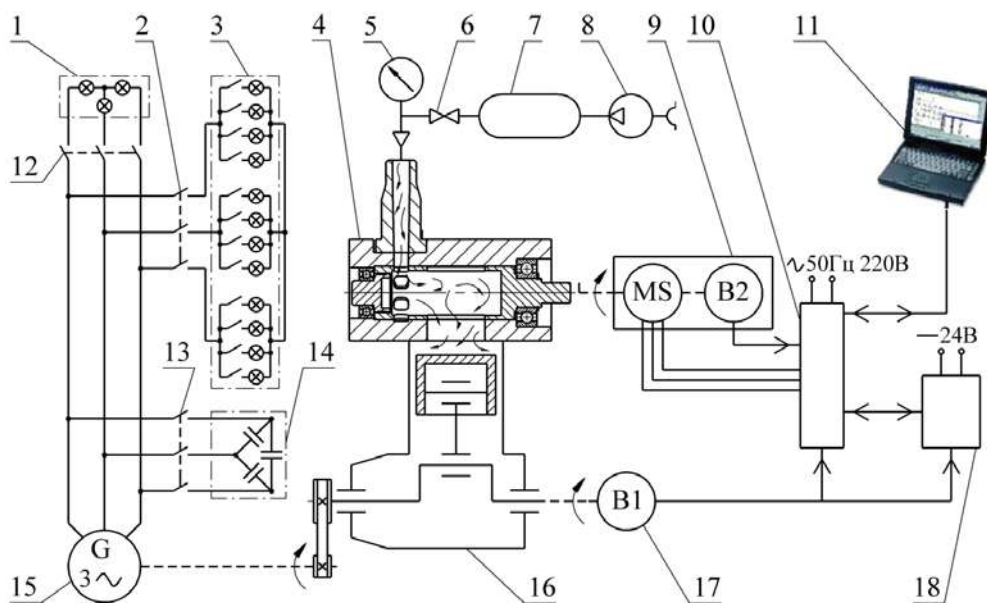


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки с поршневой расширительной машиной с самостабилизацией частоты вращения



Таблица 1 – Протокол испытаний

№ эксперимента	Давление в коллекторе кг/см <sup>2</sup>	Температура в ресивере, °С	Включенные лампы накаливания	Вольтметры V1, V2, V3, В	Амперметры нагрузки А1, А2, А3, А	Частота вращения пневмодвигателя, об/мин	Угол предварения впуска
1	7	72	3*200+3*(200+95+95+95)	220	2,6	890	-5
2	6	72	3*200+3*(200+95+95+95)	180	2,6	890	-5



Рисунок 2 – Внешний вид экспериментальной установки

В результате испытаний при манометрическом давлении 7кг/см<sup>2</sup> была получена мощность  $3*200+3*(200+95+95+95) = 2055 \text{ Вт} = 2,055\text{кВт}$ .

Для оценки расхода воздуха было отключено возбуждение (конденсаторы) и запущен пневмодвигатель на холостом ходу с предварением впуска минус 30°, что дало частоту вращения 970 об/мин, близкую к эксперименту №1 (890 об/мин). Запуск производился на время достаточное для падения давления в коллекторе до установившегося вследствие большего расхода воздуха при 7 кг/см<sup>2</sup> через коллектор, чем производительность компрессора 1,2 м<sup>3</sup>/мин. Установившееся манометрическое давление 2,5 кг/см<sup>2</sup>, т. е. абсолютное – 3,5 кг/см<sup>2</sup>. Давлению 7 кг/см<sup>2</sup> манометрических соответствует абсолютное давление 8 кг/см<sup>2</sup>. Считая, что расход воздуха пропорционален абсолютному давлению в коллекторе, получим расход воздуха при 7 кг/см<sup>2</sup> манометрических:

$$1,2*8/3,5=2,74 \text{ м}^3/\text{мин}$$

Пересчитаем эту величину на температуру воздуха 20 °С (в ресивере было 70 °С):

$$2,74 \cdot (273+70) / (273+20) = 3,2 \text{ м}^3/\text{мин}$$

В другом эксперименте был установлен угол предварения впуска 0°. Это привело к частоте вращения на холостом ходу 1270 об/мин, но при этом давление установилось 2,9 кг/см<sup>2</sup> манометрических. Т. е. больше чем в предыдущем варианте, хотя расход воздуха поршневым пневмодвигателем растёт с ростом частоты вращения. Это показывает рост расхода воздуха с увеличением абсолютной величины отрицательного предварения впуска. В этом случае расход воздуха при 7 кг/см<sup>2</sup> манометрических составит:

$$1,2 \cdot 8/3,9 = 2,46 \text{ м}^3/\text{мин}$$

Пересчёт на температуру 20 °С даёт следующий результат:

$$2,46 \cdot (273+70) / (273+70) = 2,8 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

Результаты данного эксперимента во многом коррелируют с данными полученными ранее по рассматриваемой тематике [4], однако примененный подход позволяет также говорить о пригодности использования пневмодвигателей пневмоаккумуляторной системе.

Стоит отметить, что одной из главных причин, тормозящих распространение автономной генерации электроэнергии является необходимость самостоятельно поддерживать частоту тока. В сетевой и распределенной энергетике частота едина, так как электрогенераторы включены в параллельную работу, а её стабилизация осуществляется Центральным диспетчерским управлением [3] путем включения и выключения в первую очередь гидротурбин. ГОСТ Р 54149–2010 на сетевую электроэнергию предусматривает нормально допустимое отклонение частоты ±0,2 Гц, то есть ±0,4 %. При автономной генерации электроэнергии классический способ поддержания частоты это стабилизация частоты вращения двигателя, напрямую вращающего синхронный электрогенератор. Но ни один тепловой двигатель с такой точностью не может поддерживать частоту вращения вала. Например, дизель-генераторы в установившемся режиме должны обеспечивать точность поддержания частоты ±1 %, а при сбросах и набросах нагрузок отклонение частоты может составлять ±5 % согласно ГОСТ 13822–82. Многие виды современного оборудования, включая узлы псевдоспутниковой сети, не могут работать при таком низком качестве электроэнергии.

Распространенное решение данной проблемы предполагает получение электроэнергии нестабильной частоты, выпрямление тока и применение инвертора для преобразования постоянного тока в переменный ток стабильной частоты. Такой способ приводит к снижению КПД, увеличению стоимости (по некоторым оценкам в 2-3 раза) и снижению надежности, последний фактор крайне важен в суровых условиях крайнего севера.

Авторами для достижения необходимых параметров тока предлагается использовать эффект самостабилизации частоты вращения тепловых двигателей дискретного действия при импульсной выработке или подаче рабочего

тела через равные промежутки времени без использования датчика частоты [6].

Для достижения этого эффекта необходимо организовать подачу воздуха в цилиндр пневмодвигателя через равные промежутки времени. Технически сделать это не сложно. В [7] также приводятся условия стабилизации частоты вращения в двигатель-генераторной установке. Рассмотрим их по отдельности. Во-первых самостабилизация возможна только при поздних углах опережения зажигания, перефразируя для нашего случая, только при поздних углах предварительного впуска воздуха. Это условие выполнимо в реальных конструкциях и может быть реализовано в предлагаемом пневмодвигателе. Во-вторых для обеспечения самостабилизации желательно иметь плавно падающий вращающий момент в зависимости от уменьшения угла предварительного впуска воздуха в пневмодвигатель. Выполнение этого условия возможно (применение маховика особой конструкции) но требуется проверка для конкретного двигателя с учетом характера нагрузки на вращаемом им электрогенераторе.

Самостабилизация для решения проблемы стабилизации частоты вращения – очень перспективная технология, которая одновременно улучшает характеристики установки и сократит себестоимость. Теоретически все условия для функционирования самостабилизации выполняются.

Таким образом, предложенная пневмоаккумуляторная система, использующая адиабатное сжатие рабочего тела и самостабилизацию частоты вращения при приводе электрогенератора по оценкам авторов способна обеспечить электроснабжение отдельной установки в составе ЛРНС.

#### *Литература*

1. Augmenting GPS by ground-based pseudolite signals for airborne surveying applications / H.K. Lee, J. Wang, C. Rizos, T. Tsujii // Survey Review. 2005. № 38 (296). P. 88-99.
2. The Wall Street Journal, Feb. 21, 2016 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.wsj.com/articles/energy-storage-startup-lightsail-plots-long-term-game-plan-1456110323> (дата обращения: 10.11.2017).
3. Дьяков А.Ф. Электроэнергетика России на рубеже XXI века и перспективы ее развития // Известия РАН. Энергетика. 2000. № 1. С. 69-81.
4. Кусницын Г.И. Пневматические двигатели горных машин и механизмов // Углетехиздат. 1853. С.81.
5. Проект «Псевдоспутник» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vedapro.ru/pseudo.php> (дата обращения: 10.11.2017).
6. Шкарупа С.О. Использование точечного преобразования для аналитического описания переходного процесса в тепловом двигателе дискретного действия // Динамика сложных систем – XXI век. 2010. № 2. С. 39-42.
7. Шкарупа С.О., Аракелян Э.К. Экспериментальное исследование самостабилизации частоты вращения одноцилиндрового пневматического поршневого двигателя // Вестник МЭИ. 2017. № 1. С. 84-91.

УДК [521.322+531.391.5]:[629.78:528]

**Анализ геометрически устойчивых орбит космических аппаратов  
дистанционного зондирования Земли**

**В.М. Артюшенко**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии и управляющие системы»,

**Д.Ю. Виноградов**, аспирант кафедры «Информационные технологии и управляющие системы»,

Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области

«Технологический университет», г. Королев Московская область

*В статье рассмотрен и проанализирован класс геометрически устойчивых орбит (ГУО). Рассмотрены условия устойчивости в модели геопотенциала, учитывающей зональные гармоники. Представлена последовательность расчета вектора состояния ГУО в точке, соответствующей оскулирующему значению аргумента широты с известными оскулирующими значениями долготы восходящего узла, наклона и большой полуоси. В результате моделирования, получены профили высоты ГУО относительно общеземного эллипсоида в модели гравитационного поля Земли с учётом 7 и 32 зональных гармоник.*

Космическая система, космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, программная орбита, устойчивая орбита.

**The analysis is geometrically stable orbits of spacecraft remote sensing  
of the Earth**

**V.M. Artyushenko**, doctor of Technical Sciences, Professor,  
«Information technology and control systems»,

**D.Y. Vinogradov**, graduate student,

«Information technology and control systems»,

State Educational Institution of Higher Education

Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

*The article reviewed and analyzed the class of geometrically stable orbits (GUO). The conditions of stability in the model of the geopotential, taking into account the zonal harmonics. The sequence of calculation of the state vector of GUO in the osculating value of the argument of the latitude with the famous Ascoli-royski longitude of the ascending node, inclination and semimajor axis. The simulation is obtained the altitude profiles of SEE regarding the all-earth ellipsoid model of the gravitational field of the Earth given 7 and 32 zonal harmonics.*

Space system, spacecraft, Earth remote sensing, software orbit, stable orbit.

**Введение.** Одним из основных требований, предъявляемых к перспективным космическим системам (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является требование обеспечения режима автономного функционирования каждого космического аппарата (КА) системы [4]. Основой для реализации автономного управления полётом КА является принцип удержания КА относительно движения по программной орбите [3]. Под ней понимается некоторая «идеальная» орбита, выбранная с учётом требований к КС и условий обеспечения устойчивости орбитальных параметров, по которой должно осуществляться фактическое движение КА. Параметры программной орбиты выбираются таким образом, чтобы были выполнены следующие требования. Во-первых, должна быть обеспечена устойчивость структуры КС и одинаковые скорости прецессии линии узлов [1]. Во-вторых, программное движение всех КА системы должно быть максимально приближенным к реальному движению, осуществляющемуся в поле сил, учитывающем притяжение со стороны Земли, Солнца, Луны, торможение в земной атмосфере, влияние солнечного давления и пр.

Рассмотрим и проанализируем класс геометрически устойчивых орбит (ГУО).

Геометрически устойчивые орбиты. Проведём анализ основных соотношений, используемых при расчёте параметров ГУО.

Как известно [7], оскулирующая геометрия орбиты в орбитальной плоскости (форма орбиты и ориентация линии апсид) полностью характеризуется оскулирующими эксцентриситетом  $e(t)$  и аргументом перигея  $\omega(t)$  или вектором Лапласа:

$$\vec{f} = \mu \vec{e} = \vec{V} \times \vec{c} - \mu \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|^3},$$

где  $\mu = 398600,4418 \text{ км}^3/\text{с}^2$  – гравитационный параметр Земли;  $\vec{e}$  – вектор эксцентриситета;  $\vec{V}$  – вектор скорости КА;  $\vec{c} = \vec{r} \times \vec{V}$  – векторная константа площадей;  $\vec{r}$  – радиус-вектор КА.

При малом значении эксцентриситета  $e$  положение аргумента перигея  $\omega$  становится неопределённым, поэтому при анализе возмущений геометрии почти круговой орбиты целесообразно перейти от кеплеровых элементов  $e$  и  $\omega$  к новым элементам [8]:

$$\begin{aligned} e_1 &= e \cos \omega; \\ e_2 &= e \sin \omega, \end{aligned} \tag{1}$$

представляющим собой проекции вектора эксцентриситета на две оси, одна из которых ( $e_1$ ) направлена по линии узлов и соответствует аргументу широты  $u = 0$ , а другая ( $e_2$ ) – нормальна к первой и соответствует  $u = 90^\circ$ .

Параметры  $e_1, e_2$  вычисляются, исходя из определения орбит минимального изменения высоты (ОМИВ), т.е. из условия равенства радиусов орбиты в узлах и в точках вертекса [5]:

$$\begin{aligned} r(0) &= r(\pi); \\ r\left(\frac{\pi}{2}\right) &= r\left(\frac{3\pi}{2}\right). \end{aligned}$$

Радиус орбиты в функции аргумента широты определяется формулой [8]:

$$r(u) = \frac{p}{1+e_1 \cos u + e_2 \sin u} - \frac{\varepsilon}{\mu r_{cp}} \left[ 1 - \cos u + \frac{1}{6} \sin^2 i (4 \cos u - \cos 2u - 3) \right]$$

где  $p = a(1 - e^2)$  – фокальный параметр орбиты;  $a$  – большая полуось орбиты;  $\varepsilon = 2,634 \cdot 10^{10} \text{ км}^5/\text{с}^2$  – константа сжатия Земли;  $r_{cp}$  – средний радиус орбиты, определяемый в предположении, что для ОМИВ  $r_{cp} \approx p$  [8]:

$$r_{cp} = p - \frac{\varepsilon}{\mu p} \left( 1 - \frac{1}{2} \sin^2 i \right)$$

В общем случае поведение оскулирующих кеплеровых элементов в нецентральной гравитационном поле Земли (ГПЗ) можно описать соотношениями вида [2]:

$$\begin{aligned} q_{оск} &= \bar{\bar{q}}_0 + \delta q_v + \delta q_d + \delta q_k; \\ q_{оск} &= \bar{q} + \delta q_d + \delta q_k; \\ q_{оск} &= \bar{q} + \delta q_k, \end{aligned} \tag{2}$$

где  $\bar{\bar{q}}_0$  – среднее значение кеплерова элемента в начальный момент  $t_0$ , осреднённое по всем возмущениям;  $\delta q_v$  – вековое возмущение среднего значения, пропорциональное времени полёта  $(t - t_0)$ ;  $\delta q_d$  и  $\delta q_k$  – долго- и короткопериодические возмущения элемента, имеющие период соответственно порядка векового изменения  $\omega$  на  $2\pi$  и порядка орбитального периода;  $\bar{q}$  – среднее значение элемента, осреднённое по всем периодическим возмущениям;  $\bar{q}$  – среднее значение элемента, осреднённое только по короткопериодическим возмущениям.

При использовании термина «осреднённое» имеется в виду осреднение оскулирующих значений элемента в заданной точке орбиты на интервалах полёта, равных периоду соответствующего периодического возмущения.

Конкретный вид соотношений (2) зависит от принятой модели ГПЗ и конкретного элемента. Так в центральном ГПЗ для всех элементов  $q_{оск} = \bar{\bar{q}}_0$ .

Например, при использовании модели геопотенциала, учитывающей только вторую зональную гармонику, в формулы для элементов  $e$  и  $\omega$  [1], будут входить только возмущения  $\delta\omega_v$ ,  $\delta\omega_k$  и  $\delta e_k$ .

Рассмотрим условия устойчивости в модели геопотенциала, учитывающей зональные гармоники с коэффициентами  $J_2, J_3, J_5$  и  $J_7$ . При этом воспользуемся выражениями для коротко- и долгопериодических возмущений  $e$  и  $\omega$ , приведёнными в [6]. Данные выражения упрощены в предположении, что  $e$  имеет порядок  $10^{-3}$ .

В результате короткопериодические возмущения элементов  $e_1$  и  $e_2$  имеют вид [6]:

$$\begin{aligned} \delta e_{1к} &= \frac{3}{2} \gamma_2 \left[ \left( 1 - \frac{3}{2} s^2 \right) \cos u + \frac{1}{4} s^2 \left( \cos u + \frac{7}{3} \cos 3u \right) \right]; \\ \delta e_{2к} &= \frac{3}{2} \gamma_2 \left[ \left( 1 - \frac{3}{2} s^2 \right) \sin u + \frac{1}{4} s^2 \left( \sin u + \frac{7}{3} \sin 3u \right) \right], \end{aligned} \tag{3}$$

где



$$\gamma_2 = J_2 \left( \frac{R_e}{a} \right)^2; \quad s = \sin i.$$

Долгопериодические возмущения элементов  $e_1$  и  $e_2$  описываются формулами [6]:

$$\begin{aligned} \delta e_{1д} &= 0; \\ \delta e_{2д} &= s \left( \frac{1}{2} \frac{\gamma_3}{\gamma_2} - \frac{5}{8} \frac{\gamma_5}{\gamma_2} \frac{8-28s^2+21s^4}{4-5s^2} + \frac{35}{256} \frac{\gamma_7}{\gamma_2} \frac{64-432s^2+792s^4-429s^6}{4-5s^2} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\gamma_j = J_j \left( \frac{R_e}{a} \right)^j, \quad j = 3; 5; 7.$$

Отметим, что элементы  $a$  и  $i$ , вошедшие в формулы (3) и (4), являются средними в смысле  $\bar{q}$ , т.е. осредненными от коротко- и долгопериодических возмущений. Однако в практических расчётах величин  $\delta e_{1к}$ ,  $\delta e_{2к}$  и  $\delta e_{2д}$  можно пользоваться оскулирующими значениями  $a$  и  $i$ . При этом относительная ошибка результата составит порядка  $10^{-3}$ .

Из формул (4) следует, что возмущения  $\delta e_{1д}$  и  $\delta e_{2д}$  не являются периодическими. Выражением для  $\delta e_{2д}$  можно пользоваться при любых наклонениях, за исключением критического.

В соответствии с (2) осреднённый элемент  $\bar{q}(t_0)$ , соответствующий некоторому начальному моменту  $t_0$ , представляется в виде:

$$\bar{q}(t_0) = q_{ок}(t_0) - \delta q_k(t_0) - \delta q_d.$$

Прогноз средних значений компонент  $\bar{e}_1$  и  $\bar{e}_2$ , после того как они получены на момент  $t_0$  из оскулирующих значений, можно производить с помощью кеплеровых  $\bar{e}$  и  $\bar{\omega}$ , поскольку скорости изменения этих элементов в нецентральной ГПЗ имеют вид:

$$\dot{\bar{e}} = 0; \quad \dot{\bar{\omega}} = \dot{\omega}_в, \quad (5)$$

где  $\dot{\omega}_в$  – угловая скорость векового ухода линии апсид.

Тогда на момент времени  $t$ :

$$\begin{aligned} \bar{e}_1 &= \bar{e} \cos \bar{\omega}; \\ \bar{e}_2 &= \bar{e} \sin \bar{\omega}, \end{aligned}$$

где

$$\bar{\omega} = \bar{\omega}(t_0) + \dot{\omega}_в(t - t_0).$$

Пусть при заданных значениях наклонения  $i$  и большой полуоси  $a$  эксцентриситет орбиты, осреднённый по всем периодическим возмущениям, равен нулю, т.е.  $\bar{e} = 0$ . В силу (5) это значение со временем остаётся неизменным. Тогда выражения для оскулирующих значений элементов

$$\begin{aligned} e_1 &= \bar{e}_1 + \delta e_{1д} + \delta e_{1к}; \\ e_2 &= \bar{e}_2 + \delta e_{2д} + \delta e_{2к}, \end{aligned}$$

с учётом  $\dot{\bar{e}} = 0$  и  $\bar{e}_1 = \bar{e}_2 = 0$  принимают вид:

$$\begin{aligned} e_1 &= \delta e_{1к}; \\ e_2 &= \delta e_{2д} + \delta e_{2к}. \end{aligned} \quad (6)$$

Поскольку в соответствии с (10)  $\delta e_{2д} = const$ , а  $\delta e_{1к}$  и  $\delta e_{2к}$  являются периодическими функциями аргумента широты  $u$  с постоянной амплитудой,



то очевидно, что оскулирующие  $e_1$  и  $e_2$ , а значит и оскулирующие  $e$  и  $\omega$ , будут неизменными при фиксированном значении  $u$ . То есть, неизменным по времени будет профиль радиального удаления орбиты  $r(u)$  и её высотный профиль  $h(u)$  относительно общеземного эллипсоида (ОЗЭ). Следовательно, орбита с такими свойствами есть ГУО.

Как правило, при решении задач прогноза и коррекции орбит оскулирующие элементы задаются в восходящем узле орбиты. В этом случае, полагая в (3)  $u = 0$ , выражения (6) принимают вид:

$$e_{1\Omega} = \gamma_2 \left( \frac{3}{2} - \sin^2 i \right);$$

$$e_{2\Omega} = \delta e_{2д},$$

где  $\delta e_{2д}$  находится по соотношениям (4).

При этом оскулирующие элементы  $e_\Omega$  и  $\omega_\Omega$ , обеспечивающие равенство  $\bar{e} = 0$ , определяются из выражений (1):

$$e_\Omega = \sqrt{e_{1\Omega}^2 + e_{2\Omega}^2};$$

$$\omega_\Omega = \text{sign}(e_{2\Omega}) \cdot \arccos \frac{e_{1\Omega}}{e_\Omega}.$$

Если требуется найти вектор состояния ГУО в точке, соответствующей оскулирующему значению аргумента широты  $u$  с известными оскулирующими значениями долготы восходящего узла  $\Omega$ , наклоения  $i$  и большой полуоси  $a$ , то последовательность расчёта следующая:

1) с использованием формулы (6) находятся компоненты оскулирующего вектора эксцентриситета  $e_1$  и  $e_2$ ;

2) определяются величины  $p$ ,  $r$ ,  $V_r$ ,  $V_u$  для данной точки оскуляции:

$$p = a(1 - e_1^2 - e_2^2);$$

$$r = \frac{p}{1 + e_1 \cos u + e_2 \sin u};$$

$$V_r = \sqrt{\frac{\mu}{p}} (e_1 \sin u - e_2 \cos u);$$

$$V_u = \sqrt{\frac{\mu}{p}} (1 + e_1 \cos u + e_2 \sin u), \quad (7)$$

где  $V_r$  и  $V_u$  – проекции вектора скорости соответственно на радиальную и трансверсальную оси орбитальной системы координат;

3) определяются компоненты вектора состояния в инерциальной системе координат (ИСК) на момент оскуляции:

$$x = r(\cos u \cos \Omega - \sin u \sin \Omega \cos i);$$

$$y = r(\cos u \sin \Omega - \sin u \cos \Omega \cos i);$$

$$z = r \sin u \sin i;$$

$$V_x = V_r \frac{x}{r} - V_u (\sin u \cos \Omega + \cos u \sin \Omega \cos i);$$

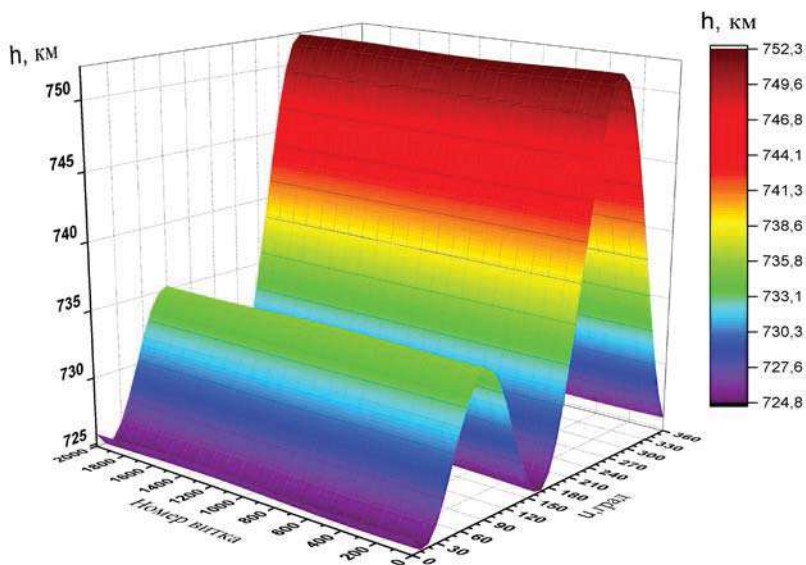
$$V_y = V_r \frac{y}{r} - V_u (\sin u \sin \Omega - \cos u \cos \Omega \cos i);$$

$$V_z = V_r \frac{z}{r} + V_u \cos u \sin i,$$

где  $x, y, z$  – декартовы координаты КА в ИСК;  $V_x, V_y, V_z$  – проекции вектора скорости КА на оси ИСК.

На рисунке 1 представлен профиль высоты ГУО 2-суточной кратности с замыканием траектории через 29 витков относительно ОЗЭ в модели ГПЗ, учитывающей 7 зональных гармоник, с начальными значениями параметров:

$$\begin{aligned} a_0 &= 7107,206 \text{ км}; e_0 = 0,001283; \\ i_0 &= 98,339^\circ; \Omega_0 = 0^\circ; \omega_0 = 69,255^\circ. \end{aligned} \quad (8)$$



**Рисунок 1 – Профиль высоты ГУО относительно ОЗЭ в модели ГПЗ с учётом 7 зональных гармоник**

Из рисунка 1 видно, что, по сравнению с ОМИВ, на ГУО не выполняется равенство высот в противоположных точках орбиты по аргументу широты, причём разность экстремальных высот примерно на 10 км больше и в данном случае составляет  $\Delta h_{\text{экс}} = 27,5$  км. Однако профиль высоты ГУО обладает стабильностью с незначительным колебанием высот порядка 0,2 км при фиксированном аргументе широты.

Заметим, что значения параметров были рассчитаны с использованием соотношения (7) по итерационной процедуре. Моделирование движения производилось на интервале, равном 2000 витков полёта, что для орбиты заданной кратности составляет около 4,5 месяцев.

Обеспечение стабильности профиля ГУО в более сложной модели ГПЗ по сравнению с ОМИВ, профиль которой стабилен только в модели геопотенциала с учётом сжатия, позволяет рассматривать ГУО в качестве программной орбиты, используемой для обоснования технологии баллистико-навигационное обеспечение (БНО). Под программной орбитой понимается

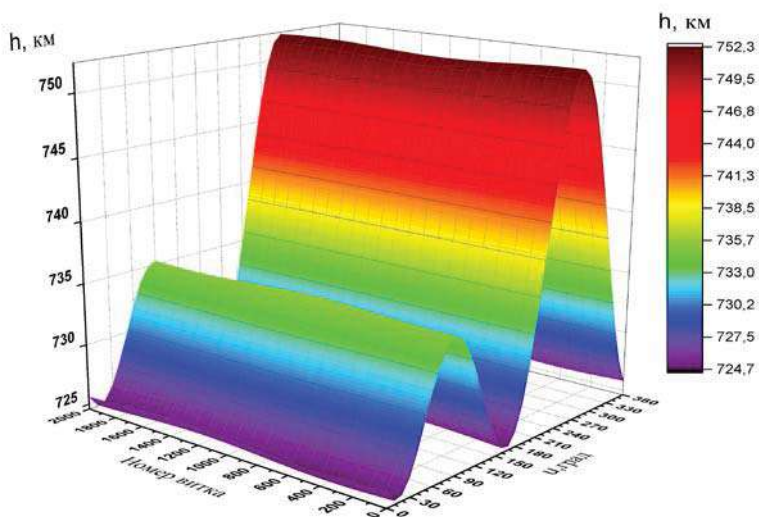
некоторая опорная («идеальная») орбита, выбранная с учётом требований к КС и условий обеспечения устойчивости орбитальных параметров, по которой должно осуществляться фактическое движение КА.

В качестве технологии БНО формирования и поддержания орбитальной структуры (ОС) КС предлагается использовать технологию формирования и поддержания относительно модели программного движения системы КА. Данная технология основана на приведении и последующем поддержании фактического положения каждого КА системы по аргументу широты в заданной окрестности его программного положения. В модели программного движения КС все КА движутся по программным орбитам. Каждому КА в своей плоскости отводится ячейка (системная позиция), положение которой в пространстве изменяется в соответствии с тенденциями программного орбитального движения.

Как правило, в практике проектных баллистических расчётов используются модели программного движения с учётом заданного числа зональных гармоник модели ГПЗ, количество которых не менее 16, что обусловлено желанием обеспечить приемлемую близость программного движения каждого КА системы фактическому движению. С этой точки зрения, чаще всего, выбирается модель программного движения, учитывающая влияние 32-х зональных гармоник, а в качестве фактического движения рассматривается движение КА в полной модели ГПЗ степени и порядка 32.

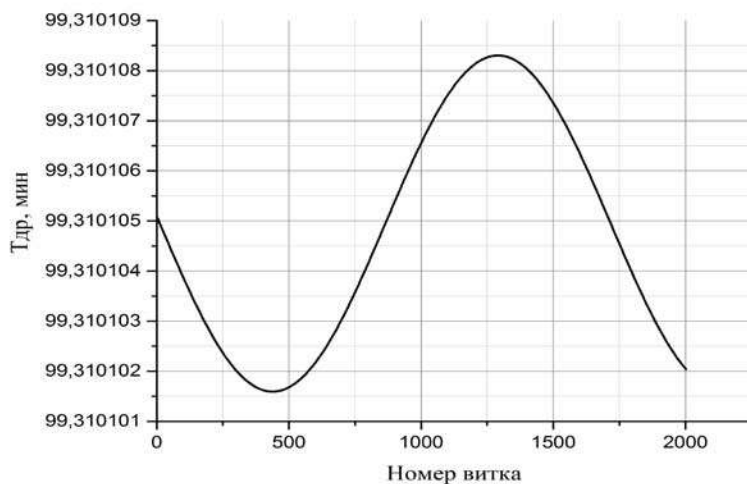
Таким образом, на практике желают получить такие начальные значения параметров программной орбиты, чтобы программное движение КА было максимально приближенным к реальному движению на максимальном множестве возмущений в течение строка активного существования КА.

На рисунке 2 приведён профиль высоты ГУО с параметрами (8) в модели ГПЗ с учётом 32 зональных гармоник. В целом, вид профиля не изменился разность экстремальных высот осталась практически прежней, но колебанием высот при фиксированном аргументе широты теперь составляет порядка 0,5 км.

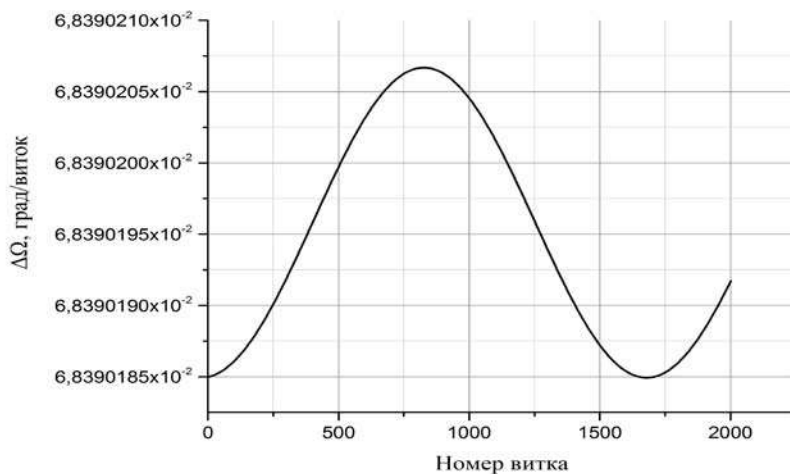


**Рисунок 2 – Профиль высоты ГУО относительно ОЗЭ в модели ГПЗ с учётом 32 зональных гармоник**

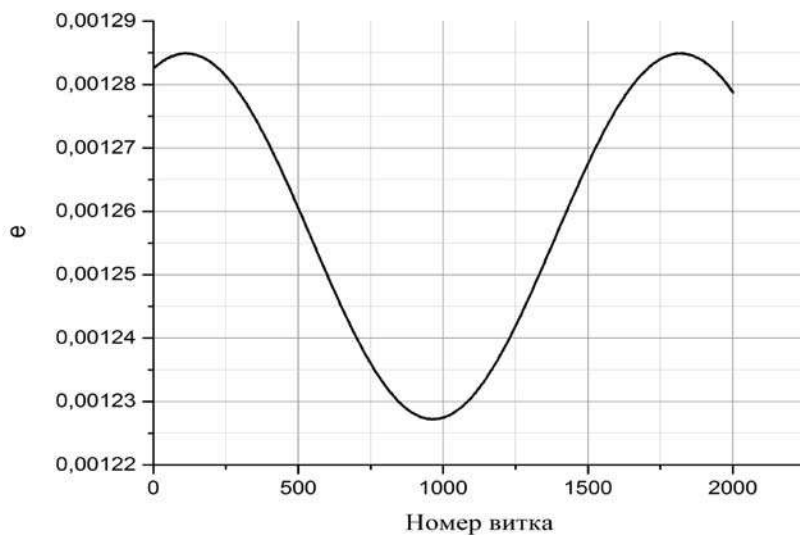
На рисунках 3-7 показана эволюция некоторых параметров в восходящем узле орбиты с начальными параметрами (8) в модели ГПЗ, учитывающей 32 зональные гармоник.



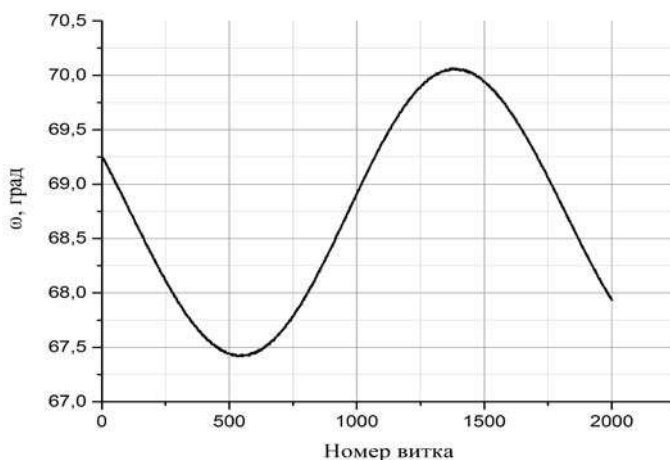
**Рисунок 3 – Эволюция драконического периода программной орбиты с начальными значениями параметров (8) в модели ГПЗ с учётом 32-х зональных гармоник**



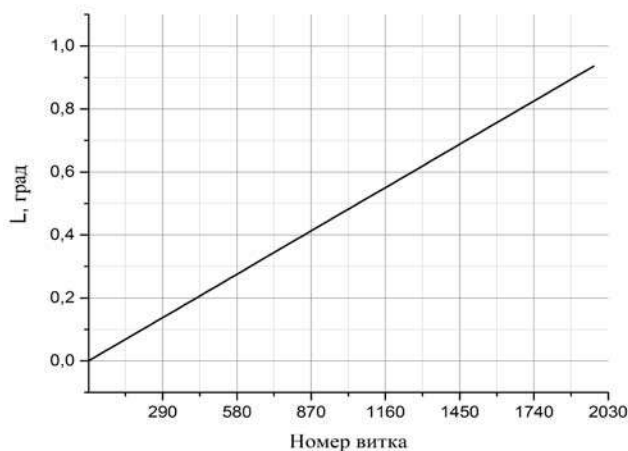
**Рисунок 4 – Эволюция величины прецессии линии узлов программной орбиты с начальными значениями параметров (8) в модели ГПЗ с учётом 32-х зональных гармоник**



**Рисунок 5 – Эволюция эксцентриситета программной орбиты с начальными значениями параметров (8) в модели ГПЗ с учётом 32-х зональных гармоник**



**Рисунок 6 – Эволюция аргумента перигея программной орбиты с начальными значениями параметров (8) в модели ГПЗ с учётом 32-х зональных гармоник**



**Рисунок 7 – Эволюция гринвичской долготы начала трассы программной орбиты с начальными значениями параметров (8) в модели ГПЗ с учётом 32-х зональных гармоник**

Из кривых, представленных на рисунках 3-7, видно, что значения параметров программной орбиты в восходящем узле подвержены долгопериодическому возмущению, а долгота начала трассы (рисунок 7) смещается от первоначального значения в сторону увеличения (величина ухода за 4,5 месяца составляет порядка  $1^\circ$ ). Это обусловлено тем, что условия устойчивости (7) были определены с учётом только 7 зональных гармоник модели ГПЗ.

Для уменьшения амплитуды долгопериодических возмущений и ухода гринвичской долготы начала трассы необходимо получить условия устойчи-

ности для любого числа зональных гармоник модели ГПЗ. Записать условия в аналитическом виде, аналогично условиям (7), не представляется возможным.

**Выводы.** Для обеспечения условия устойчивости достаточно потребовать, чтобы в восходящем узле каждого витка программной орбиты исходные оскулирующие значения большой полуоси, эксцентриситета, наклона и аргумента широты перигея сохраняли свою устойчивость к периодическим возмущениям от заданного числа зональных гармоник. Для достижения данной цели необходимо разработать алгоритмы расчёта начальных значений параметров программных геометрически устойчивых солнечно-синхронных орбит с заданными характеристиками.

Однако на начальном этапе обоснования ОС системы КА достаточно рассчитать начальные значения параметров программной орбиты с учётом 7 зональных гармоник, а затем на следующем этапе произвести уточнение этих параметров для заданного числа зональных гармоник (например, 32-х) с помощью специальных алгоритмов.

#### *Литература*

1. Артюшенко В.М., Виноградов Д.Ю. Анализ свойств орбит минимального изменения высоты // Информационно-технологический вестник. 2017. № 4 (14). С.3-15.
2. Аппазов Р.Ф., Сытин О.Г. Методы проектирования траекторий носителей и спутников Земли // М: Наука, 1987. 440 с.
3. Давыдов Е.А., Кисленко К.В., Суевалов В.В. Методы автономного поддержания параметров баллистической структуры перспективных систем космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Материалы Научно-практической конференции с международным участием «Космонавтика XXI века». ЦНИИМАШ. 2016.
4. Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года // М.: Российское космическое агенство. 2006. 72 с.
5. Пшеничников В.В., Лысов Н.С., Бабяк А.П. Результаты исследования характеристик орбиты минимального изменения высоты // ЦИВТИ. Указатель № 3 (137). 1978.
6. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике / под ред. Дубошина Г.Н. // М: Наука. 1976. 864 с.
7. Чернов А.А., Чернявский Г.М. Орбиты спутников дистанционного зондирования Земли // М: Радио и связь. 2004. 202 с.
8. Эльясберг П.Е. Введение в теорию полёта искусственных спутников Земли // М: Наука. 1965. 540 с.



УДК 629.7.023:51-74

**Метод расчёта квазистатической надёжности конструкции технических систем, используемых при разработке ракетно-космической техники**

**В.М. Дубровин**, к.т.н., доцент,

доцент кафедры «Вычислительная математика и математическая физика»,  
Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана,  
г. Москва,

**К.С. Семенов**, инженер I категории, РКК «Энергия», Центр Управления Полетами, г. Королев, Московская область,

**В.Г. Исаев**, к.т.н., доцент,  
заведующий кафедрой «Управление качеством и стандартизации»,

**М.Д. Озерский**, д.т.н., с.н.с.,  
профессор кафедры «Управление качеством и стандартизации»,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области  
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

*Рассматривается техническая система, содержащая несколько конструктивных элементов, работающих под действием комплекса внешних нагрузок. Примерами таких систем могут являться агрегаты и системы, используемые при создании ракетно-космической техники. Отмечено, что отказом конструкции подобных технических систем считается наступление хотя бы одного из таких состояний как потеря прочности, потеря устойчивости, появление недопустимых упругих деформаций, появление недопустимых пластических деформаций. Для систем такого типа предложен метод расчёта надёжности по критерию наступления одного или нескольких предельных состояний конструкции элементов.*

Техническая система, предельное состояние, прочность, критерий надёжности.

**Method of calculation of quasistatic reliability of the design of the technical systems used when developing the missile and space equipment**

**V.M. Dubrovin**, candidate of engineering sciences, associate professor, associate professor «Calculus mathematics and mathematical physics»,

Bauman Moscow State Technical University, Moscow,

**K.S. Semenov**, RSC «Energy» in the mission control center,  
Korolev, Moscow region,

**V.G. Isaev**, candidate of engineering sciences, associate professor managing a department management by quality and standardizations,

**M.D. Ozerskii**, doctor of engineering sciences, professor of department Manage-

ment by quality and standardizations,  
State Educational Institution of Higher Education  
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

*The technical system containing several structural elements working under the influence of a complex of external loadings is considered. The units and systems used during creation of the missile and space equipment can be examples of such systems. It is noted that refusal of a design of similar technical systems approach at least of one of such states as loss of durability, stability loss, emergence of inadmissible elastic deformations, emergence of inadmissible plastic deformations is considered. For systems of this kind the method of calculation of reliability by criterion of approach of one or several limit conditions of a design of elements is offered.*

Technical system, limit state, strength, reliability test.

Надёжность конструкции является важнейшим показателем качества технической системы, особенно для агрегатов и систем ракетно-космической техники (РКТ). При этом отказом конструкции технической системы считается наступление хотя бы одного из возможных состояний: потеря прочности, потеря устойчивости, появление недопустимых упругих деформаций, появление недопустимых пластических деформаций. В этом случае под предельным состоянием понимается такое, при котором нагрузка, действующая на конструкцию, становится равной нагрузке, соответствующей исчерпанию несущей способности. Вероятность отсутствия предельных состояний (вероятность неразрушения) является критерием надёжности конструкции [1–4].

Авторами предложен следующий метод расчета квазистатической надёжности (вероятности неразрушения конструкции). Близость состояние конструкции к предельному можно характеризовать критическими параметрами, поэтому вероятность неразрушения в принципе рассчитывается как параметрическая надёжность. Критические параметры конструкции агрегатов и систем РКТ зависят одновременно от двух групп случайных факторов: факторов, определяющих нагрузку, и факторов, определяющих несущую способность. Случайный характер несущей способности обусловлен разбросом физико-механических свойств конструкционных материалов и погрешностями изготовления, в частности наличием допусков на размеры. Нагрузки, действующие на конструкцию, также имеют случайный характер, обусловленный условиями эксплуатации системы.

Случайные вариации большинства возмущающих факторов происходят во времени, поэтому нагрузки и несущая способность конструкции имеет характер случайных процессов. Однако, если этой зависимостью нагрузок и несущей способностью от времени пренебречь, полагая их консервативными случайными величинами, то будем иметь квазистатический метод расчёта надёжности конструкций. Применение квазистатических методов в расчётах надёжности может быть обосновано тем, что детерминированные расчёты

конструкции на прочность и устойчивость проводится для определённых моментов времени, так называемых расчётных случаев [5–8].

В качестве критического параметра, характеризующего близость конструкции к тому или иному предельному состоянию можно принимать либо разность между несущей способностью  $R$  и нагрузкой  $S$ , либо их отношение. В первом случае вероятность неразрушения равной вероятности того что  $R-S > 0$ . Во втором случае критический параметром является коэффициент запаса прочности или коэффициент запаса устойчивости  $\frac{R}{S}$ , а вероятность неразру-

шения равна вероятности того, что  $\frac{R}{S} > 1$  [9–11].

Если рассматривать надёжность конструкции, используя в качестве критических параметров разности между несущими способностями элементов и нагрузками, что возможны при предельных состояниях:

- по прочности  $U = R_1 - S_1$ ;
- по устойчивости  $V = R_2 - S_2$ ;
- по деформациям  $W = R_3 - S_3$ .

Здесь  $S_1$  – нагрузка, при возрастании которой возможно разрушение конструкции в результате потери прочности;

$R_1$  – несущая способность конструкции по прочности, т.е. разрушающая нагрузка, вызывающая потерю прочности;

$S_2$  – нагрузка, способная привести к потере устойчивости конструкции;

$R_2$  – несущая способность конструкции по устойчивости (критическая сила);

$S_3$  – упругая или пластическая деформация, способная привести к потере работоспособности конструкции;

$R_3$  – несущая способность конструкции по упругим или пластическим деформациям.

Конечно, возможны и другие виды предельных состояний, например, предельное состояние по усталостной прочности в случае действия на конструкцию циклической нагрузки или длительной прочности при нахождении конструкции значительный период времени под нагрузкой. Однако при оценке квазистатической надёжности конструкций, когда рассматривается надёжность в фиксированный момент времени, основными предельными состояниями являются перечисленные выше. В общем случае, вероятность неразрушения конструкции есть вероятность отсутствия всех трёх предельных состояний

$$P = \text{вер}(U > 0, V > 0, W > 0)$$

Для трёх предельных состояний вероятность неразрушения конструкции,

$$P(U > 0, V > 0, W > 0) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(u, \vartheta, w) du d\vartheta dw$$

Где  $f(u, \vartheta, w)$  – плотность совместного распределения случайных величин  $u, v, w$ .

Согласно [9], маловероятны случаи нагружения конструкции, когда все три предельных состояния представляли бы в равной степени опасность. Поэтому достаточно ограничиться рассмотрением двух возможных предельных состояний, а иногда - только одного. Для случая двух возможных предельных состояний вероятность неразрушения равна

$$P(U > 0, V > 0) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(u, \vartheta) du d\vartheta$$

где  $f(u, \vartheta)$  – плотность совместного распределения случайных величин  $u$  и  $v$ .

Как показано в работах [12–14], случайные величины  $U, V$  распределены либо по нормальному закону, либо по закону близкому к нормальному. В общем случае их можно считать коррелированными. Тогда плотность совместного распределения двух случайных величин может быть представлена в виде

$$f(u, \vartheta) = \frac{1}{2\pi\sigma_u\sigma_\vartheta\sqrt{1-r_{u\vartheta}^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2(1-r_{u\vartheta}^2)}\left[\left(\frac{u-m_u}{\sigma_u}\right)^2 - \frac{2r_{u\vartheta}(u-m_u)(\vartheta-m_\vartheta)}{\sigma_u\sigma_\vartheta} + \left(\frac{\vartheta-m_\vartheta}{\sigma_\vartheta}\right)^2\right]\right\}$$

Здесь  $m_u, m_\vartheta$  – математические ожидания случайных величин;

$\sigma_u, \sigma_\vartheta$  – среднее квадратическое отклонение случайных величин;

$r_{u\vartheta}$  – коэффициент корреляции случайных величин.

При этом

$$m_u = m_{R_1} - m_{s_1},$$

$$m_\vartheta = m_{R_2} - m_{s_2}$$

$$\sigma_u^2 = \sigma_{R_1}^2 + \sigma_{s_1}^2 - 2r_{R_1s_1}\sigma_{R_1}\sigma_{s_1},$$

$$\sigma_\vartheta^2 = \sigma_{R_2}^2 + \sigma_{s_2}^2 - 2r_{R_2s_2}\sigma_{R_2}\sigma_{s_2},$$

$$r_{u\vartheta} = \frac{K_{u\vartheta}}{\sigma_u\sigma_\vartheta},$$

$$K_{u\vartheta} = r_{R_1R_2}\sigma_{R_1}\sigma_{R_2} + r_{s_1s_2}\sigma_{s_1}\sigma_{s_2} - r_{R_1s_2}\sigma_{R_1}\sigma_{s_2} - r_{R_2s_1}\sigma_{R_2}\sigma_{s_1},$$

где  $m_{R_1}, m_{s_1}, m_{R_2}, m_{s_2}$  – математические ожидания случайных величин соответственно;

$\sigma_{R_1}, \sigma_{s_1}, \sigma_{R_2}, \sigma_{s_2}$  – среднее квадратическое отклонение случайных ве-

личин;

$r_{R_1 S_1}$  – коэффициент корреляции случайных величин  $R_1, S_1$ ;

$r_{R_1 S_2}$  – коэффициент корреляции случайных величин  $R_1, S_2$ ;

$r_{R_2 S_1}$  – коэффициент корреляции случайных величин  $R_2, S_1$ ;

$r_{R_2 S_2}$  – коэффициент корреляции случайных величин  $R_2, S_2$ ;

$r_{S_1 S_2}$  – коэффициент корреляции случайных величин  $S_1, S_2$ ;

$K_{u,g}$  – корреляционный момент случайных величин  $U$  и  $V$ .

Если обозначить

$$x = \frac{m_u - U}{\sigma_u}, \quad y = \frac{m_g - V}{\sigma_g},$$

$$\text{то } P(U > 0, V > 0) = \int_{-\infty}^{\alpha} \int_{-\infty}^{\beta} f(x, y) dx dy,$$

$$\text{где } \alpha = \frac{m_u}{\sigma_u}, \quad \beta = \frac{m_g}{\sigma_g},$$

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-r_{u,g}^2}} \exp\left\{-\frac{x^2 - 2r_{u,g}xy + y^2}{2(1-r_{u,g}^2)}\right\},$$

Тогда вероятность ненаступления хотя бы одного предельного состояния (вероятность неразрушения) может быть выражена с помощью табулированных функций  $\Phi(x)$ ,  $T(h, a)$  в виде

$$P(U > 0, V > 0) = \frac{1}{2}\Phi(\alpha) + \frac{1}{2}\Phi(\beta) - T(\alpha, a) - T(\beta, b)$$

$$\text{где. } a = \frac{\beta - \alpha r_{u,g}}{\alpha\sqrt{1-r_{u,g}^2}}, \quad b = \frac{\alpha - \beta r_{u,g}}{\beta\sqrt{1-r_{u,g}^2}}$$

Таким образом, для расчёта вероятности неразрушения в случае двух предельных состояний, достаточно знать числовые характеристики нагрузок и несущих способностей конструкции.

Если параметры  $U$  и  $V$  не коррелированы, то вероятность неразрушения.

$$P(U > 0, V > 0) = P(U > 0)P(V > 0) = \Phi(\alpha)\Phi(\beta)$$

Последнее выражение можно использовать и при наличии корреляции параметров  $U$  и  $V$ , если надёжность конструкции достаточно велика ( $P(U > 0, V > 0) \approx 1$ ). В этом случае, согласно [15,16] влияние коэффициента корреляции  $r_{u,g}$  мало. Для одного предельного состояния вероятность его ненаступления (вероятность неразрушения) равна

$$P(U > 0) = \Phi(\alpha).$$

При расчёте надёжности конструкции можно использовать безразмерные параметры:

$$\eta = \frac{m_R}{m_s} - \text{коэффициент надёжности};$$

$$V_R = \frac{\sigma_R}{m_R} - \text{коэффициент вариации несущей способности};$$

$$V_s = \frac{\sigma_s}{m_s} - \text{коэффициент вариации нагрузки}.$$

В случае одного предельного состояние при отсутствии корреляции между несущей способностью конструкции и нагрузкой, величина

$$\alpha = \frac{m_R - m_s}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_s^2}}$$

может быть представлена виде

$$\alpha = \frac{\eta - 1}{\sqrt{\eta^2 V_R^2 + V_s^2}}.$$

Тогда вероятность неразрушения будет функцией трёх переменных  $P(U > 0) = p(\eta, V_R, V_s)$ , что иногда позволяет упростить процесс вычисления надёжности конструкции.

Для анализа влияния на надёжность конструкции вариации нагрузки и несущей способности в рассмотрение вводятся относительные предельные отклонения:

$$\text{-несущей способности } \xi_R = \frac{\Delta_R}{m_R},$$

$$\text{-нагрузки } \xi_s = \frac{\Delta_s}{m_s}.$$

Здесь  $\Delta_R$  и  $\Delta_s$  предельные отклонения несущей способности и нагрузки. Для нормального распределения параметров с учётом правила «трёх сигм» имеем

$$\Delta_R = 3\sigma_R, \Delta_s = 3\sigma_s$$

Зависимости надёжности конструкций от относительных предельных отклонений нагрузки и несущей способности для различных значений коэффициента надёжности  $\eta$  представлены на рисунках 1–4.

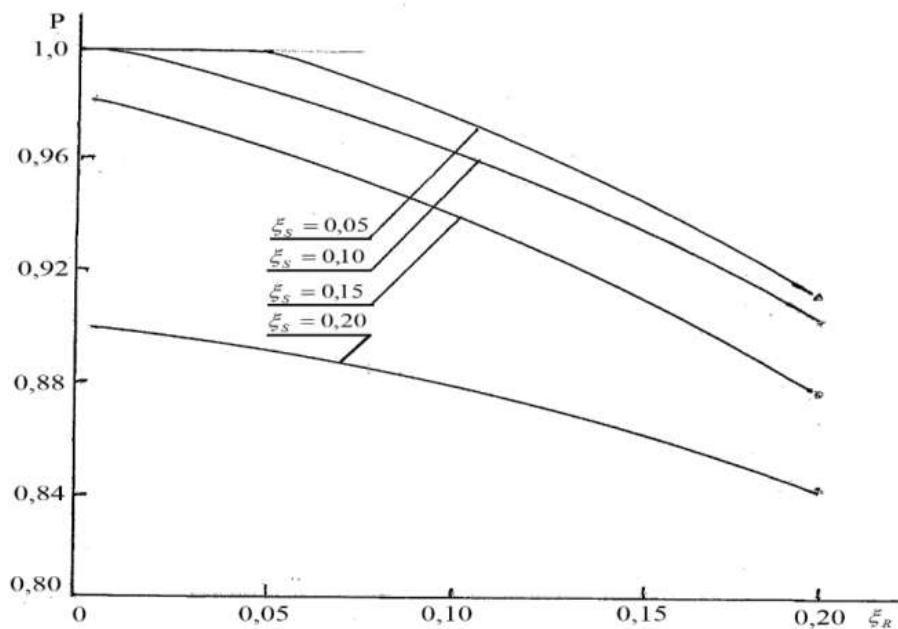


Рисунок 1 – Зависимость надежности конструкции от относительных отклонений нагрузки и несущей способности (коэффициент надежности  $\eta = 1,1$ )

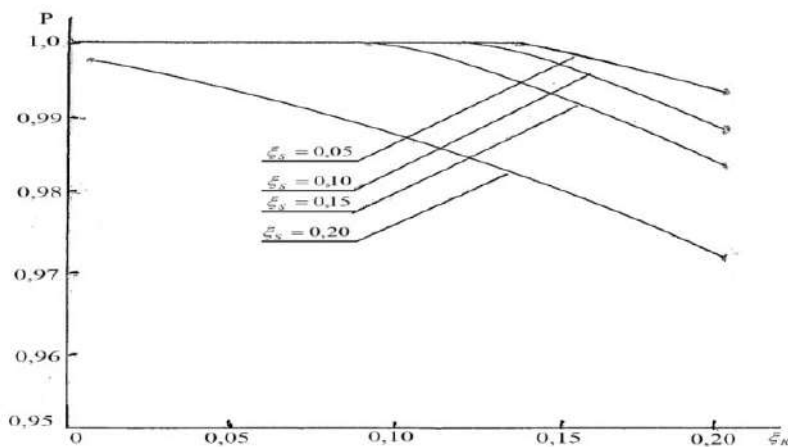


Рисунок 2 – Зависимость надежности конструкции от относительных отклонений нагрузки и несущей способности (коэффициент надежности  $\eta = 1,2$ )



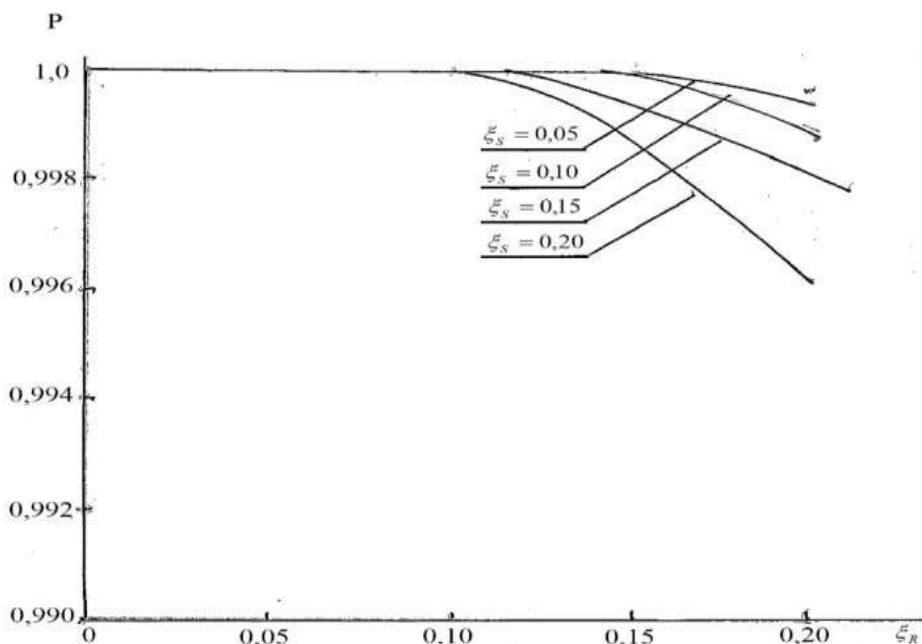


Рисунок 3 – Зависимость надежности конструкции от относительных отклонений нагрузки и несущей способности (коэффициент надежности  $\eta = 1,3$ )

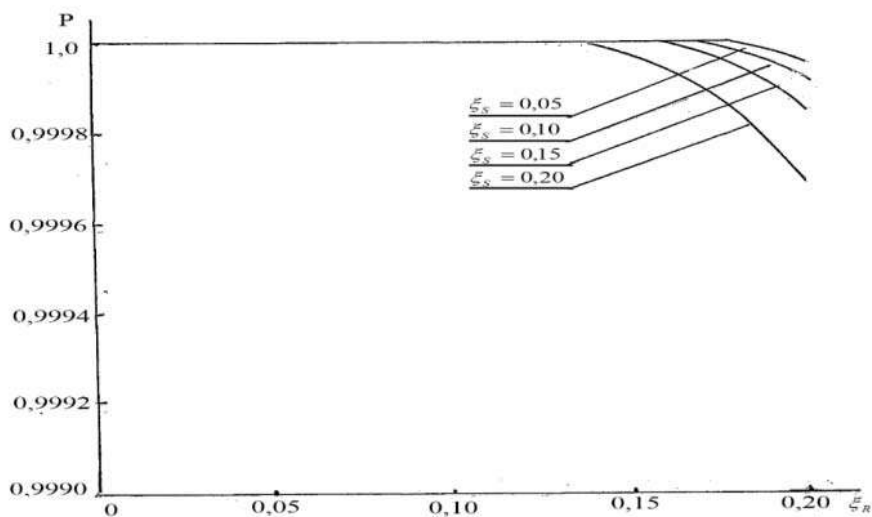


Рисунок 4 – Зависимость надежности конструкции от относительных отклонений нагрузки и несущей способности (коэффициент надежности  $\eta = 1,4$ )

Анализ графиков, представленных на рисунках, показывает, что влияние относительных предельных отклонений на надёжность конструкции снижается при увеличении коэффициента надёжности и относительного предельного отклонения нагрузки  $\xi_R$  и уменьшения относительного предельного отклонения несущей способности  $\xi_s$ .

Таким образом, предложенный авторами метод позволяет оценить надёжность конструкции агрегатов и систем ракетно-космической техники, являющихся сложными техническими системами, работоспособность которых определяется несколькими предельными состояниями. При этом под несущей способностью системы следует понимать предельный уровень воздействия на систему, при котором она не теряет работоспособности (продолжает функционировать). А под нагрузкой – уровень воздействия внешних факторов, влияющих на работу способность системы.

#### *Литература*

1. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надёжности // М.: Советское радио. 1969. 488 с.
2. Садыхов Г.С. Критерии оценок безопасной эксплуатации технических объектов // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2005. № 1. 119-122 с.
3. Садыхов Г.С., Кузнецов В.И. Основы выбора безопасных периодов эксплуатации объектов // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2005. № 4. 96-99с.
4. Дубровин В.М., Дубровин С.В. Надёжность конструкции при сложном комбинированном нагружении // Надёжность и контроль качества. 1999. № 2. 19-24с.
5. Острейковский В.А. Теория надёжности // М.: Высшая школа. 2003. 463 с.
6. Алон Н., Спенсер Дж. Вероятностный метод // М., БИНОМ. 2011. 320 с.
7. Аксенчик А.В. Теория вероятностей и математическая статистика // Мн.: БГУИР. 2011. 184 с.
8. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надёжности // СПб.: БХВ-Петербург. 2006. 702 с.
9. Александровская Л.Н., Афанасьев А.П., Лисов А.А. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем // М.: Логос. 2001. 208 с.
10. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика // М.: Физматлит. 2002. 496 с.
11. Алгазин О.Д., Бутина Т.А., Дубровин В.М. К вопросу об оценке надёжности и работоспособности конструкции при импульсном нагружении // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Спец. вып. «Математическое моделирование». 2011. 70–72с.
12. Димитриенко Ю.И. Нелинейная механика сплошной среды // М.: Физматлит. 2009. 624 с.

13. Димитриенко Ю.И. Универсальные законы механики и электродинамики сплошной среды Т 2 // М., изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. 559 с.
14. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения // М.: Издательский центр «Академия». 2003. 464 с.
15. Булинский А.В., Ширяев А.Н. Теория случайных процессов // М.: Физматлит. 2005. 408 с.
16. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников // М.: Физматлит. 2006. 816 с.

УДК 621.398

**Метод оперативного определения факта возникновения и места взрыва на борту самолета**

**А.П. Мороз**, д.т.н., советник генерального директора по научной работе, Академик Российской академии космонавтики  
Акционерное общество «Научно-производственное объединение измерительной техники» (АО «НПО ИТ»), г. Королев, Московская область,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет», г. Королев, Московская область

*Предлагается метод оперативного определения факта возникновения и места взрыва на борту самолета. Предлагаемый метод позволит оперативно определять следующие данные: факт возникновения аварийной ситуации на объекте; тип и номер потерпевшего катастрофу объекта; точное время возникновения аварийной ситуации на объекте; географические координаты места катастрофы объекта; место возникновения разрушений на объекте; характер разрушений.*

Авария, катастрофа, самолёт, взрыв, метод.

**The method of operational definition of the fact and the place of explosion aboard the plane**

**A.I.P. Moroz**, doctor of science, Advisor to Director General for scientific work, Academician of the Russian Academy of Sciences,  
Joint stock company «Scientific and Production Association of Measuring Equipment» (JSC «NPO IT»), Korolev, Moscow region,  
Professor of the ITUS Department,  
State Educational Institution of Higher Education  
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

*The method of operational definition of the fact and the place of explosion aboard the plane is offered. The offered method will just allow to define the following data: the fact of emergency at the airplane; type and number of the object injured; exact time of emergency at the airplane; geographical coordinates of the crash object; the place and nature of destructions.*

Accident, fatal air crash, plane, explosion, method.

При испытаниях и эксплуатации сложных технических комплексов бывают случаи аварий и катастроф. В ряде случаев развитие аварийного процесса имеет характер взрыва. Для обитаемых объектов (самолеты, вертолеты,

подводные лодки и т. д.) в подобных ситуациях нередко экипаж не успевает отреагировать и сообщить не только о причине появления и характере аварийной ситуации, но даже о факте ее возникновения.

Яркими примерами рассматриваемой ситуации являются случаи катастроф космических кораблей США многоразового использования, а также произошедшая 12 августа 2000 г. катастрофа российской атомной подводной лодки «Курск». В последнем случае, для определения истинной причины катастрофы, оказалось необходимым осуществить подъем получившей серьезные разрушения и затонувшей вследствие этого лодки и ее фрагментов, в частности, фрагментов ее первого отсека. На подготовку и проведение колоссальной по стоимости и технической сложности операции по подъему лодки, характеризующейся высокой степенью риска при ее осуществлении, потребовалось два года. При проведении операции были реализованы новейшие технологии, задействованы наиболее совершенные отечественные и зарубежные силы и средства, но сделать однозначный и объективный вывод о первичной причине катастрофы даже после подъема лодки в течение длительного времени оказалось весьма проблематично.

Другим характерным примером является катастрофа, произошедшая в связи с уничтожением 4 октября 2001 г. над Черным морем пассажирского самолета авиакомпании «Сибирь» украинскими силами противовоздушной обороны. В этом случае имели место попытки опровержения украинской стороной связи причины катастрофы с проведением во время учений стрельб зенитными ракетами по движущимся воздушным мишеням. Для определения истинной причины катастрофы потребовалось осуществить подъем с морского дна и проведение экспертизы фрагментов сбитого пассажирского самолёта, в конструкции которого остались застрявшие поражающие элементы зенитной ракеты.

Трудным и длительным является расследование причин катастрофы, произошедшей 25 декабря 2016 г. с российским самолётом Ту-154 в районе г. Сочи, следовавшим с артистами ансамбля им. Александрова в Сирию.

В связи с этим следует отметить, что усилия по разработкам спутниковых систем для отслеживания передвижения воздушных судов предпринимались на протяжении многих лет, но особый рост интереса к ним начался после исчезновения 8 марта 2014 г. авиалайнера Boeing 777 рейса 370, следовавшего по маршруту Куала-Лумпур (Малайзия) – Пекин (КНР). Этот инцидент инициировал исследования, приведшие к утверждению ИКАО новых стандартов и практических рекомендаций для коммерческой авиации, включающих требования по отслеживанию местоположения самолётов каждые 15 минут.

5 декабря 2016 г. компания Spire Global (США), занимающаяся разработкой группировки кубсатов для предоставления метеорологической информации и данных по сопровождению морских судов, сообщила, что планирует выйти на рынок слежения за воздушными судами, добавив дополнительные датчики на своих будущих спутниках [1]. Мандат Международной организа-

ции гражданской авиации (ИКАО), который должен вступить в силу в ноябре 2018 г., предписывает коммерческим авиалайнерам, пролетающим над океанами, представлять сведения о своём местоположении каждые 15 минут. Для выполнения мандата к концу 2017 г. компания Spire Global планировала развернуть группировку в составе 25 спутников и ещё 50 – в 2018 г.

При использовании традиционных методов определения причины аварии или катастрофы взрывного типа обычно возникает дефицит информации, зарегистрированной на аварийном участке. Для выяснения истинной причины катастрофы необходимо получение объективной и достоверной информации о сути происшествия [2, 3]. С этой целью на борту указанных выше объектов обычно с помощью автономных регистраторов (так называемых «черных ящиков») осуществляется запись наиболее информативных параметров.

Такой метод получения информации имеет следующие существенные недостатки.

1. Низкая информативность систем регистрации. Это обусловлено тем, что на магнитный носитель обычно регистрируются медленно меняющиеся параметры и разговоры членов экипажа. Поэтому при динамично развивающемся аварийном процессе, например, при взрыве, частоты опроса зарегистрированных данных оказывается, как правило, недостаточно для однозначного определения сечения объекта, в котором начали развиваться процессы разрушения конструкции. С другой стороны, при повышении частоты опроса контролируемых параметров пропорционально возрастает объем регистрируемых данных. Поэтому высокоинформативные информационно-измерительные системы обычно применяются лишь при испытаниях технически сложных дорогостоящих объектов. На этапе их эксплуатации ограничиваются регистрацией медленно меняющихся параметров, а в ряде случаев информационно-измерительные системы вообще не применяются.

2. Поиск бортовых автономных регистраторов обычно связан со значительными трудностями. Часто материалы регистрации оказываются поврежденными, содержащими значительное количество помех и искажений, или вовсе непригодными для обработки. Это снижает достоверность получаемых данных и приводит к полной или частичной потере информации, зарегистрированной на участке развития аварийного процесса [4]. Иногда точно найти место аварии и «черный ящик» не удается в течение длительного времени, в связи с чем дорогостоящие поиски прекращаются. В таких случаях истинная причина катастрофы остается невыясненной. Следовательно, в дальнейшем возможны случаи повторного возникновения аномальных ситуаций по той же причине. Но даже при обнаружении и наличии возможности доступа как к «черным ящикам», так и к самому потерпевшему катастрофу объекту в ряде случаев на протяжении длительного времени определить причину катастрофы очень сложно.

В случаях аварий и катастроф, связанных с возникновением механических разрушений на объекте, весьма эффективным может оказаться предлагаемый метод решения задачи локализации места возникновения разрушений

на борту объекта (сечения, из которого начали развиваться механические разрушения). Суть метода заключается в следующем.

На корпусе объекта, а также внутри его, в критичных местах устанавливаются датчики, чувствительные к механическим разрушениям. Эти датчики являются формироваателями сигналов-признаков аварии при возникновении разрушений в зоне чувствительности датчиков. По кабельным (или иным) линиям датчики соединяются с аппаратурой обработки сигналов-признаков аварии. Выход аппаратуры обработки подключается к радиопередатчику.

Для подтверждения работоспособности системы в тестовом режиме выполняется проверка её работоспособности.

При отсутствии аварийных сигналов на выход радиопередатчика сигнал не поступает и в эфир ничего не передается.

При поступлении сигналов-признаков аварии с выходов датчиков на вход аппаратуры обработки осуществляется обработка этих сигналов, их кодирование, и по радиоканалу передаются не сами поступившие с датчиков аварийные сигналы, а результаты обработки информации на борту объекта. При этом вначале передается условный номер потерпевшего катастрофу объекта.

Содержащейся в принятом аварийном сообщении информации достаточно для того, чтобы оперативно определить следующие данные:

- факт возникновения аварийной ситуации на объекте;
- тип и номер потерпевшего катастрофу объекта;
- точное время возникновения аварийной ситуации на объекте;
- географические координаты места катастрофы на маршруте движения, что позволит своевременно принять необходимые меры по поиску и спасению экипажа и пассажиров;
- место возникновения разрушений на объекте;
- характер разрушений.

В связи с тем, что по каналу связи передаются не первичные сигналы, зарегистрированные датчиками, а результаты выполненной на борту обработки сформированных датчиками сигналов, удастся значительно снизить искажающее влияние шумов и помех на достоверность получаемых оценок и выводов при анализе происшествия. Кроме того, в связи с тем, что объем самого передаваемого сообщения значительно сокращается при одновременном увеличении его информативности, обеспечивается возможность объективного определения места возникновения на объекте разрушений при самых быстротечных аварийных ситуациях, чрезвычайно повышается оперативность определения характера происшествия. Открывается возможность определения технической сущности катастрофы до прибытия экспертов к месту происшествия.

Техническое решение, реализующее предлагаемый метод, признано изобретением. Алгоритмы выполняемой на борту объекта обработки информации об аварии или катастрофе представляют собой «ноу-хау». Более чем 30-летние теоретические и экспериментальные исследования по решению за-



дач анализа (технической диагностики) применительно к изделиям ракетной и ракетно-космической техники подтверждают высокую эффективность предлагаемого метода [5].

Работы, которые необходимо было выполнить для подтверждения реализуемости и эффективности рассматриваемого метода, завершены. Для доведения предложенного метода до практической реализации в виде серийно изготавливаемых устройств необходимо проведение целевой НИОКР, учитывающей специфику изделий, оснащаемых этими устройствами. Практическая реализация предлагаемого метода, с учетом современного уровня развития микроэлектроники, вполне реализуема и позволит освоить на предприятиях Российской Федерации изготовление инновационных конкурентоспособных высокотехнологичных устройств с небольшими массово-габаритными характеристиками и невысоким энергопотреблением. Например, научно-технические, технологические и производственные возможности и имеющийся опыт создания аналогичных систем у предприятий корпорации Акционерное общество «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем» (АО «Российские космические системы», АО «РКС») вполне способны обеспечить решение такой задачи [6].

Освоение серийного изготовления таких устройств характеризуется весьма небольшими затратами по сравнению с затратами, требующимися обычно на проведение мероприятий по определению причин катастроф сложных технических объектов и парирование их последствий.

Сведений о завершении создания и изготовлении аналогичных устройств за рубежом автором не обнаружено.

Наиболее целесообразно начать работы по реализации предлагаемого метода применительно к объектам авиационной техники (для оснащения самолетов).

#### Выводы

1. Предлагается инновационный метод решения задачи локализации места возникновения разрушений на борту контролируемого объекта.

2. Проведенные многолетние исследования показали, что на практике решение рассмотренной задачи на основе предлагаемого метода реализуемо при самых высокодинамичных авариях типа взрыва. Это достигается благодаря большому сокращению избыточности измерительной информации и, как следствие, существенному снижению влияния на результаты анализа шумов и помех, действующих на полезный сигнал, специфическим особенностям как структуры передаваемых сигналов, так и алгоритмов выполняемой на борту обработки данных на участке развития аварийного процесса.

3. Предлагаемый метод позволит оперативно определять следующие данные:

- факт возникновения аварийной ситуации на объекте;
- тип и номер потерпевшего катастрофу объекта;
- точное время возникновения аварийной ситуации на объекте;

- географические координаты места катастрофы на маршруте движения объекта, что позволит своевременно принять необходимые меры по поиску и спасению экипажа и пассажиров;
- место возникновения разрушений на объекте;
- характер разрушений.

*Литература*

1. США. Spire выходит на рынок слежения за авиалайнерами // РКТ №49 (2973) 9 декабря 2016 г. Экспресс-информация серия 1 // ГОНТИ ЦНИИ-маш. 20 с.
2. Мороз А.П., Резвцов Н.Б. Телеметрирование быстроменяющихся параметров. Учебно-методическое пособие // М.: Военная академия РВСН им. Петра Великого. 2002. 203 с.
3. Мороз А.П., Аббасова Т.С., Ставровский М.Е. Повышение эффективности циклических устройств сбора и обработки информации в системах мониторинга и вибродиагностики // Информационно-технологический вестник. Т. 11. № 1. 2017. 114 с. С. 81-94.
4. Мороз А.П., Артемьев В.Ю. Методы определения структуры и параметров помех при телеизмерениях // Измерительная техника: Стандартиформ. № 1. 2012. 72 с. С. 24-27.
5. Мороз А.П. Повышение эффективности телеметрирования быстроменяющихся параметров при натурных испытаниях летательных аппаратов / А.П. Мороз: монография: Королев МО. ФТА. 2012. 224 с.
6. Скворцов Р.В., Мороз А.П. Математический аппарат определения приоритетных направлений повышения долговечности многослойных печатных плат бортовой РЭА для ракет-носителей и разгонных блоков // Ракетно-космическое приборостроение и информационные технологии. 2015. Сборник трудов VII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (2-4 июня 2015 г.) / Под ред. д.т.н., проф. А.А. Романова // М.: АО «РКС». 2015. 584 с.: ил. С. 567-576.

УДК 629.7

**Математическая модель и алгоритм выборочного контроля  
совокупностей комплектующих изделий на сборочных  
предприятиях космической техники**

**В.Б. Рудаков**, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник «НИИ КС им. А.А. Максимова», – филиала АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», г. Королев, Московская область,

**В.М. Макаров**, к.т.н., главный специалист департамента автоматических комплексов и систем специального назначения, Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос», г. Москва,

**М.И. Макаров** д.т.н., профессор, руководитель филиала АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», директор «НИИ КС им. А.А. Максимова», г. Королев, Московская область

*Рассмотрена задача определения рациональных планов входного выборочного контроля надежности и технических параметров комплектующих изделий космической техники (КТ), совокупность которых поступает на сборочные предприятия для изготовления сложных изделий КТ. Приведена постановка задачи и математическая модель, основой которой является минимизация целевой функции экономических затрат на контроль и потерь, связанных с рисками принятия ошибочных решений. Исследованы свойства математической модели и разработан алгоритм ее оптимизации. Результатом является оптимальный план выборочного контроля совокупностей комплектующих изделий, который включает в себя: оптимальную номенклатуру изделий, подлежащих обязательному контролю из совокупности, и оптимальные риски 1 и 2 рода при приемочном числе статистического плана равно нулю. Последнее связано с высокими требованиями, предъявляемыми к надежности и техническим параметрам изделий КТ.*

Иерархия, контроль, надежность, оптимизация, параметры, планирование, потери, риски 1 и 2 рода, технические параметры, требования, целевая функция, экономические затраты, изделие КТ.

**A mathematical model and an algorithm for sampling sets  
of components on the Assembly enterprises of space technology**

**V.B. Rudakov**, Prof., Grand PhD in Engineering sciences, senior researcher, A. Maksimov Space Systems Research Institute – Branch of FSUE Khrunichev State Research and Production Space Center, Korolev, Moscow region,

**V.M. Makarov**, PhD in Engineering sciences; chief specialist of Department of automated systems and special purpose systems, Space agency of the Russian Federation, Moscow,

**M.I. Makarov**, Prof., Grand PhD in Engineering sciences, Director, A. Maksimov Space Systems Research Institute – Branch of FSUE Khronichev State Research and Production Space Center, Korolev, Moscow region

*The article considers the problem of determining the rational plans of the input sampling reliability and technical parameters of components of space technology, the totality of which is supplied to the Assembly plants for the manufacture of complex products of space technology. Problem statement and mathematical model based on the minimization of the economic costs of control and losses related to the risks of taking wrong decisions, are given in the article. The properties of the mathematical models are investigated, the algorithm for its optimization is developed. The result is an optimal plan for the sampling of sets of components, which includes: an optimal product mix subject to mandatory control of the aggregate and optimum risks of first and second kind, when acceptance number of statistical plan is zero. The latter circumstance is due to the high requirements of reliability and technical parameters of products of space technology.*

Hierarchy, control, reliability, optimization, parameters, scheduling, the loss, the risk of the first and second kind, technical parameters, requirements, cost function, economic costs, the product of space technology.

В практике создания космической техники (КТ) при изготовлении сложных систем на сборочные предприятия поступают *совокупности разных изделий*, например, совокупность комплектующих изделий из которых изготавливаются сложные системы. Эти совокупности включают в себя различные интегральные микросхемы, всевозможные реле, конденсаторы и так далее. Однако прежде чем приступить к изготовлению сложных изделий на сборочном предприятии, совокупность поступивших комплектующих должна проходить входной приемочный контроль со стороны службы контроля этого предприятия. При этом если проводить контроль всех изделий совокупности и контролировать их показатели надежности и технические параметры, то это может потребовать больших затрат времени, средств, специального оборудования и т.д., что вызывает необходимость проведения выборочного контроля. Поскольку совокупность включает в себя различные комплектующие, возникает актуальная научная задача, которая формулируется следующим образом: осуществить оптимальный выбор номенклатуры изделий из совокупности разных изделий, подлежащих обязательному проведению контроля с учетом заданных требований к их надежности и техническим параметрам.

В работе [1] при рассмотрении трехуровневой структуры иерархического контроля для проведения выборочного контроля совокупностей комплектующих изделий было предложено решить эту задачу на основе минимизации целевой функции, которая проистекает из самой статистической структуры контроля. Она включает в себя математическое ожидание экономических затрат на контроль и потерь, связанных с рисками принятия ошибочных

решений. При этом риски обусловлены стохастическим характером проявления отказов изделий, ограниченным временем проведения их испытаний и погрешностями средств измерения технических параметров. Это риски 1 и 2 рода, которые можно рассматривать как характеристики достоверности контроля [2, 3].

Математическая модель и постановка задачи оптимизации имеет следующий вид:

найти

$$\min_{(x, \underline{g}, \underline{\alpha})} C_c = \min_{(x, \underline{g}, \underline{\alpha})} \left[ C_{1c} \alpha_c + C_{2c} \beta_c + \sum_{i=1}^X C_{1i} \right] \quad (1)$$

$$\text{где } \alpha_c = \prod_{i=1}^x \frac{\alpha_i}{\alpha_{yi}} \left[ 1 - \prod_{i=1}^x (1 - \alpha_{yi}) \right], \quad (2)$$

$$\beta_c = \prod_{i=1}^x \left[ \frac{\alpha_i}{\alpha_{yi}} (1 - \alpha_{yi}) + \beta_i \right] - \prod_{i=1}^x \frac{\alpha_i}{\alpha_{yi}} \prod_{i=1}^x (1 - \alpha_{yi}), \quad (3)$$

в области, определяемой следующими неравенствами

$$\beta_c > 0, \alpha_c \geq 0, \quad (4)$$

$$0 < x \leq S, i = 1, \dots, S \quad (5)$$

В [1] было показано, что риски 1 и 2 рода  $\alpha_c$  и  $\beta_c$ , при изменении переменной  $x$  и при фиксированных  $S$  и рисках  $\alpha_i, \beta_i, \alpha_{yi}$ , изменяются в противоположных направлениях. Это свойство даёт основание утверждать, что математическую модель (1) можно рассматривать в качестве целевой функции, которая имеет минимум при определённом значении переменной  $x$ .

В выражениях (1)...(5) обозначено:

$C_{1c}$  и  $C_{2c}$  представляют собой средние экономические потери за счёт браковки годной и приёмки дефектной совокупности изделий КТ данного уровня иерархии, т.е. математические ожидания потерь;

$C_{1i}$  – средние затраты (математическое ожидание), приходящиеся на контроль  $i$ -го изделия совокупности;

$\alpha_c$  – риск 1 рода, относящийся к контролю всей совокупности  $S$  изделий КТ (вероятность того, совокупность изделий годная и будет забракована);

$\beta_c$  – риск 2 рода, относящийся к контролю всей совокупности изделий (вероятность того, что совокупность изделий дефектная и будет принята для дальнейшего использования).

$S$  – размер совокупности комплектующих изделий данного иерархиче-

ского уровня;

$x$  – неизвестная номенклатура изделий совокупности, подлежащих обязательному контролю (текущее значение).

$\alpha_i, \beta_i$  – безусловные риски 1 и 2 рода (забраковать годное и принять дефектное), относящиеся к  $i$ -му изделию совокупности,  $i=1, \dots, S$ .

Величины этих рисков определяются следующим образом.

1. Случай контроля всех технических параметров  $i$ -го изделия.

$$\alpha_i = \prod_{i=1}^{N_{ij}} \frac{\alpha_{ij}}{\alpha_{yi}} \left[ 1 - \prod_{j=1}^{N_{ij}} (1 - \alpha_{yj}) \right], \quad (6)$$

$$\beta_i = \prod_{j=1}^{N_{ij}} \beta_{ij}, \quad (7)$$

где  $\alpha_{ij}, \beta_{ij}$ , и  $\alpha_{yj}$  – безусловные риски и условный риск, возникающие при контроле  $j$ -го параметра изделия,  $j=1, \dots, N_{ij}$ , (определяются известными методами метрологии, исходя из заданных допусков на каждый параметр изделия и погрешностей средств их измерения [1, 2, 4]);

$N_{ij}$  – общее количество независимых технических параметров  $i$ -го изделия.

2. Случай контроля показателя надежности в виде допустимой интенсивности отказов  $\lambda_{mp}$  [5]  $i$ -го изделия.

$$\alpha_i = \int_0^{\lambda_{mpi}} [1 - \exp(-\lambda_i t_{ui})] f(\lambda_i) d\lambda_i, \quad (8)$$

$$\beta_i = \int_{\lambda_{mpi}}^{\infty} \exp(-\lambda_i t_{ui}) f(\lambda_i) d\lambda_i, \quad (9)$$

где  $\lambda_{mpi}$  – допустимое значение интенсивности отказов изделия, заданное в документации;

$\lambda_i$  – показатель надежности изделия, трактуется как случайная величина (в байесовском смысле), имеющая плотность гамма-распределения;

$t_{ui}$  – время проведения испытаний  $i$ -го изделия КТ;

$$f(\lambda_i) = \frac{a(a\lambda_i)^{b-1}}{\Gamma(b)} \exp(-a\lambda_i), \quad (10)$$

плотность априорного гамма-распределения, в которой:

$a, b$  – параметры гамма-распределения ( $a$  – параметр масштаба,  $b$  – па-

раметр формы);

$\Gamma(b)$  – полная гамма-функция или интеграл Эйлера второго рода, определяемый выражением при  $x > 0$ :

$$\Gamma(b) = \int_0^{\infty} x^{b-1} \exp(-x) dx, \quad (11)$$

табличные значения, которого можно найти, например, в [6, 7].

Параметры  $a$  и  $b$  априорного гамма-распределения определяются известными методами по накопленной предварительной статистической информации о надежности изделия с учетом ее неоднородности по известным формулам и моделям [2, 3].

Постановка задачи оптимизации (1)...(5) и формулы для вычисления рисков были получены в [1, 5] из рассмотрения следующих структур иерархического контроля.

Для случая 1: контроль каждого технического параметра изделия, контроль изделия в целом и контроль совокупности изделий.

Для случая 2: контроль надежности каждого изделия, контроль совокупности изделий.

При этом были введены следующие определения.

Для случая 1. *Годным* считается технический параметр комплектующего изделия, если он находится в пределах заданного допуска. *Дефектным* – параметр, вышедший за пределы заданного допуска.

*Годным* считается комплектующее изделие, если все его независимые параметры находятся в пределах заданных допусков. *Дефектным* считается изделие, если хотя бы один его параметр находится за пределами заданного допуска.

Для случая 2. *Годным* считается комплектующее изделие, если оно удовлетворяет заданным требованиям по надежности, т.е.  $\lambda_i \leq \lambda_{mpi}$ . *Дефектным* считается изделие, если оно не удовлетворяет заданным требованиям по надежности, т.е.  $\lambda_i > \lambda_{mpi}$ .

Для обоих случаев совокупность изделий считается *годной*, если все изделия совокупности являются годными. Совокупность изделий считается *дефектной*, если хотя бы одно изделие совокупности является дефектным.

Риски 1 и 2 рода  $\alpha_i$  и  $\beta_i$ , формулы (6) ... (9), определяются на предприятиях-поставщиках комплектующих изделий как результат определения рациональных планов контроля каждого изделия [1, 5] при проведении контроля их технических параметров или надежности. Поэтому в дальнейшем будем считать их известными.

Полученные в результате решения задачи оптимизации (1)...(5) оптимальные значения  $x^*$ , а также рисков 1 и 2 рода  $\alpha_c^*$ ,  $\beta_c^*$  при приемочном числе  $c = 0$  и будут являться оптимальными характеристиками выборочного плана контроля совокупности комплектующих изделий КТ на сборочных предприятиях ( $x^*, \alpha_c^*, \beta_c^*, c=0$ ).

Заметим, что в случае отсутствия контроля совокупности изделий



функция потерь (1) будет определяться выражением

$$C_c = C_{2c} \beta_c. \quad (12)$$

Таким образом, если совокупность изделий КТ принимается без контроля, то всегда будут иметь место потери (12).

Возвратимся к задаче оптимизации в постановке (1)...(5). Для ее решения необходимо провести исследование свойств целевой функции (1). С этой целью подставим в (1) входящие в нее выражения (2) и (3). В результате получим функцию вида:

$$C_c(x) = C_{1c} \alpha_c + C_{2c} \beta_c + \sum_{i=1}^x C_{1i} = C_{1c} \prod_{i=1}^S \frac{\alpha_i}{\alpha_{y_i}} \left[ 1 - \prod_{i=1}^x (1 - \alpha_{y_i}) \right] + C_{2c} \left\{ \prod_{i=1}^x \left[ \frac{\alpha_i}{\alpha_{y_i}} (1 - \alpha_{y_i}) + \beta_i \right] - \prod_{i=1}^S \frac{\alpha_i}{\alpha_{y_i}} \prod_{i=1}^x (1 - \alpha_{y_i}) \right\} + \sum_{i=1}^x C_{1i} \dots (13)$$

Эту функцию, имея в виду ограничения (4) и (5), можно представить как функцию одной переменной - номенклатуры контролируемых комплектующих изделий  $x$ , подлежащих обязательному контролю из совокупности  $S$ . Очевидно, что точки минимума функции  $C_c(x)$  находятся среди точек, для которых полный дифференциал этой функции  $dC_c(x) = 0$ , если положить  $x$  непрерывным аргументом. Однако поиск минимума функции (13) связан со значительными трудностями, которые обусловлены тем, что с учетом выражений (2) и (3) неизвестная номенклатура  $x$  комплектующих изделий совокупности, подлежащих обязательному контролю, определяет количество сомножителей произведения.

Используем подход, изложенный в работах [2, 3]. Сначала исследуем свойства модели (13) для случая, когда все изделия совокупности  $S$  имеют одинаковые характеристики достоверности контроля, т.е. когда  $\alpha_i = \alpha$ ,  $\beta_i = \beta$ ,  $\alpha_{y_i} = \alpha_y$  для всех  $i = \overline{1, S}$ . Этот случай соответствует тому, что вклады всех комплектующих изделий совокупности в модель (13) одинаковы. Затем выявленные свойства модели для этого случая распространим на более общий случай, когда все  $S$  комплектующих изделий совокупности имеют различные характеристики достоверности контроля. В результате выявленные свойства модели (13) позволят разработать алгоритм оптимизации выборочного контроля совокупностей комплектующих изделий на сборочных предприятиях космической техники.

### 1. Исследование свойств математической модели при одинаковых характеристиках достоверности контроля комплектующих изделий, входящих в совокупность

При одинаковых рисках 1 и 2 рода целевая функция (13) будет иметь

ВИД:

$$C_C = C_{1c} \left( \frac{\alpha}{\alpha_y} \right)^S \left[ 1 - (1 - \alpha_y)^x \right] + C_{2c} \left\{ \left[ \frac{\alpha}{\alpha_y} (1 - \alpha_y) + \beta \right]^x - \left( \frac{\alpha}{\alpha_y} \right)^S (1 - \alpha_y)^x \right\} + C_1 x,$$

где  $C_1$  – математическое ожидание экономических затрат на контроль одного изделия совокупности.

Запишем целевую функцию в более простом виде, имея в виду, что по определению безусловных рисков [2, 3] величина  $\frac{\alpha}{\alpha_y} = P(A)$  – вероятности того, что комплектующее изделие является годным.

$$C_C = C_{1c} [P(A)]^S \left[ 1 - (1 - \alpha_y)^x \right] + C_{2c} \left\{ \left[ \frac{\alpha}{\alpha_y} (1 - \alpha_y) + \beta \right]^x - \left( \frac{\alpha}{\alpha_y} \right)^S (1 - \alpha_y)^x \right\} + C_1 x, \quad (14)$$

В целях упрощения исследования введем следующие обозначения:

$$A_1 = \left[ \frac{\alpha}{\alpha_y} (1 - \alpha_y) + \beta \right], \dots \dots \dots (15)$$

$$A_2 = P(A), \quad (16)$$

$$A_3 = (1 - \alpha_y), \quad (17)$$

$$A = \left( \frac{\alpha}{\alpha_y} \right)^S. \quad (18)$$

Тогда целевая функция (14) принимает следующий вид:

$$C_C = C_{1c} A \left[ 1 - A_3^x \right] + C_{2c} \left[ A_1^x - A A_3^x \right] + C_1 x. \quad (19)$$

Полагая  $x$  непрерывной переменной, найдем производную  $\frac{dC_c}{dx}$ .

В результате будем иметь

$$\frac{dC_c}{dx} = C_{2c} \left[ A_1^x \ln A_1 - A A_3^x \ln A_3 \right] - C_{1c} A A_3^x \ln A_3 + C_1. \quad (20)$$

Поскольку переменная  $x$  должна иметь возможные значения на интервале  $0 < x \leq S$ , понятно, что если  $x \rightarrow 0$ , то этот случай соответствует не-

целесообразности проведения контроля. Если  $x$  принимает значение  $x = S$ , то этот случай свидетельствует о необходимости контроля всех  $S$  комплектующих изделий совокупности.

Определим условия, необходимые для существования минимума целевой функции (14) на интервале  $0 < x \leq S$ . Для этого воспользуемся способом сравнения знаков производной [8]. В соответствии с этим способом выпуклая функция имеет минимум внутри интервала, если её производная отрицательна при всех  $x$ , близких к нулю, и положительна при всех  $x$ , близких к  $S$ . То есть, условиями существования минимума целевой функции (14) внутри интервала  $0 < x \leq S$  является одновременное выполнение неравенств:

$$\left. \frac{dC_c}{dx} \right|_{x \rightarrow 0} = C_{2c} \left[ A_1^x \ln A_1 - AA_3^x \ln A_3 \right] - C_{1c} AA_3^x \ln A_3 + C_1 < 0, \quad (21)$$

$$\left. \frac{dC_c}{dx} \right|_{x \rightarrow S} = C_{2c} \left[ A_1^x \ln A_1 - AA_3^x \ln A_3 \right] - C_{1c} AA_3^x \ln A_3 + C_1 > 0.$$

Следует отметить, что выполнение неравенств (21) является необходимым условием наличия минимума целевой функции на интервале  $0 < x \leq S$ . Однако, поскольку минимум существует, выполнение неравенств (21) является и достаточным условием.

Таким образом, при выполнении условий (21) минимум целевой функции находится внутри интервала  $0 < x \leq S$ .

Если условия (21) не выполняются, то, как указывалось выше, существует два возможных исхода:

1) если значение целевой функции  $C_c$  в точке  $x \rightarrow 0$  меньше, чем значение  $C_c$  в точке  $x = S$ , то контроль проводить нецелесообразно;

2) если значение целевой функции  $C_c$  в точке  $x \rightarrow 0$  больше, чем значение  $C_c$  в точке  $x = S$ , то целесообразен контроль всех изделий совокупности.

Предположим теперь, что неравенства (21) выполняются и минимум целевой функции (14) существует внутри интервала  $0 < x \leq S$ . Тогда, очевидно, приравняв производную (20) нулю, можно найти такое значение  $x^*$ , при котором функция (14) имеет минимум. То есть значение  $x^*$ , которое является решением уравнения

$$C_{2c} \left[ A_1^x \ln A_1 - AA_3^x \ln A_3 \right] - C_{1c} AA_3^x \ln A_3 + C_1 = 0 \quad (22)$$

будет оптимальным.

Для рассматриваемого случая, используя (22), можно найти оптимальное значение  $x^*$ , логарифмируя это выражение. В то же время конечное вы-

ражение для определения  $x^*$  даже для такого простого случая является достаточно громоздким. Это объясняется тем, что уравнение (22) относится к классу трансцендентных уравнений [8]. К сожалению, их решение в аналитическом виде только в частных случаях представляется возможным. Однако уравнение (22) можно решить, например, графически. Кроме того, величину  $x^*$  можно также определить, переходя к дискретным переменным, численно определяя минимум целевой функции (14). При этом задача отыскания  $x^*$  упрощается, так как переменная  $x$  принимает только целочисленные значения в интервале  $(0, S)$ .

В случае численного определения минимума целевой функции поступаем следующим образом. Задаёмся последовательно значениями  $x = 1, 2, 3, \dots$  и по (14) определяем соответствующие значения функции  $C_C$ . Значение  $x = x^*$ , которое соответствует минимуму  $C_C$  и является решением. Вид целевой функции (14) представлен на рисунках 1-3. Она представляет собой набор точек, поскольку переменная  $x$  изменяется целочисленно.

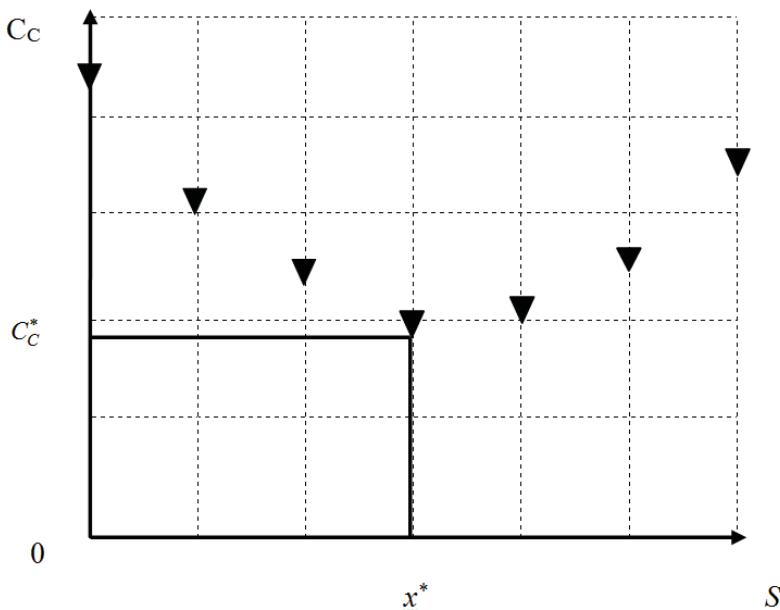


Рисунок 1 – График изменения функции  $C_C$ , когда она имеет минимум внутри интервала  $(0, S)$

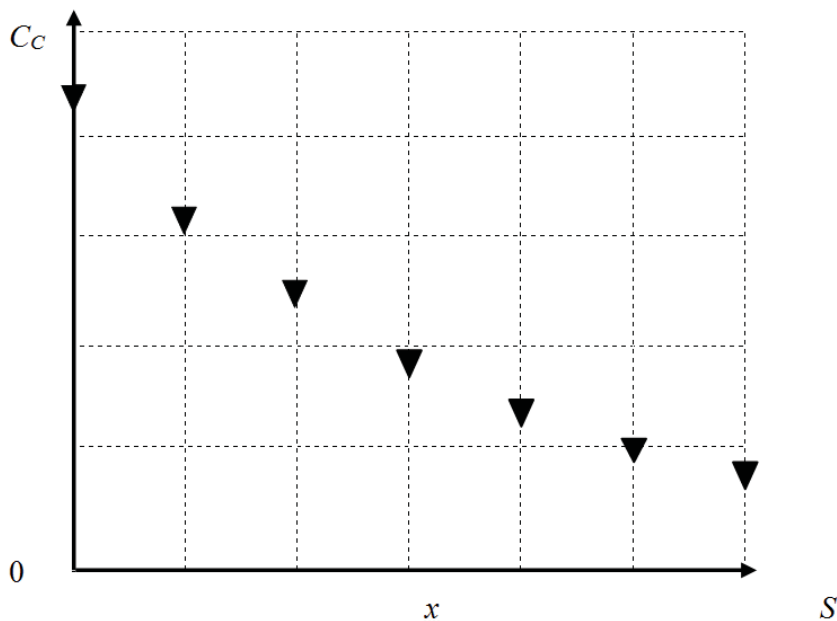


Рисунок 2 – График убывающей функции  $C_c$  от переменной  $x$

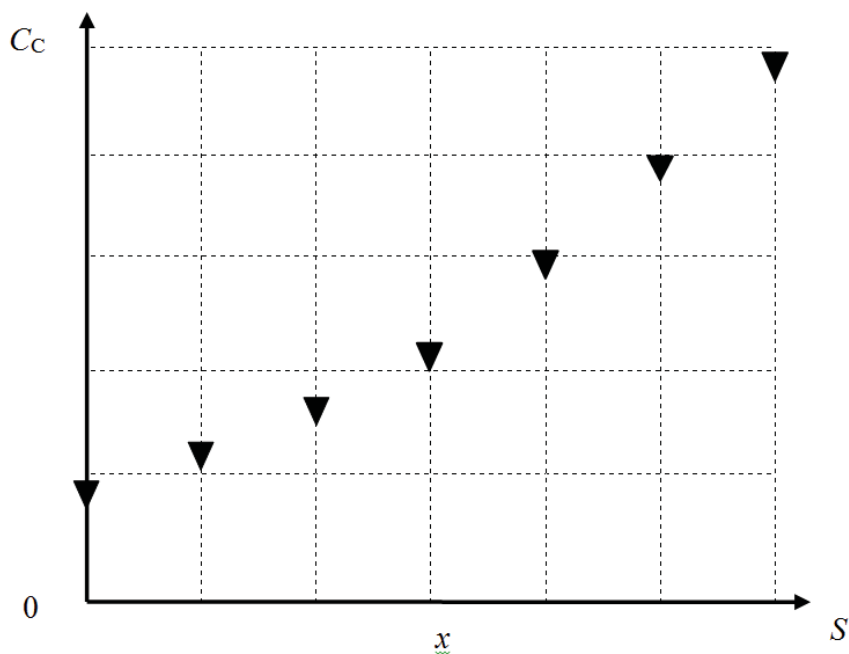


Рисунок 3 – График возрастающей функции  $C_c$  от переменной  $x$

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что целевая

функция (14) является как бы индикатором необходимости проведения контроля:

если контроль совокупности комплектующих изделий КТ приводит к увеличению математического ожидания экономических затрат и потерь (рис. 3), то контроль проводить с этой точки зрения нецелесообразно;

если контроль совокупности комплектующих изделий КТ приводит к уменьшению математического ожидания экономических потерь (рис. 2), то с этой точки зрения целесообразен контроль всей совокупности изделий;

если математическое ожидание экономических затрат на контроль и потерь имеет минимум  $C_C^*$  (рис. 1), то целесообразен контроль оптимального количества  $x = x^*$  изделий совокупности, который соответствует этому минимуму.

Заметим, что минимизация целевой функции  $C_C$  позволяет определить и риски 1 и 2 рода  $\alpha_C, \beta_C$ , относящиеся к контролю совокупности комплектующих изделий КТ на основе формул (2) и (3).

Таким образом, рассмотрен случай, когда все  $S$  изделий совокупности являются “равнозначными” с точки зрения их вкладов в целевую функцию потерь.

## **2. Обобщение свойств математической модели на случай различных характеристик достоверности контроля комплектующих изделий, входящих в совокупность. Разработка алгоритма выборочного контроля совокупностей комплектующих изделий на сборочных предприятиях космической техники**

Рассмотрим теперь непосредственно задачу оптимизации контроля совокупности комплектующих изделий, когда все  $S$  изделий совокупности имеют различные характеристики  $\alpha_i, \beta_i, \alpha_{y_i}$  для всех  $i = \overline{1, S}$ . (изделия не являются равнозначными с точки зрения их вкладов в целевую функцию). Результатом решения данной задачи должны явиться оптимальная номенклатура изделий  $x^*$ , подлежащих обязательному контролю из всей совокупности разных изделий  $S$  и соответствующие оптимальные значения рисков 1 и 2 рода, возникающих при контроле совокупности  $\alpha_C^*, \beta_C^*$ .

Проведенные выше исследования позволяют использовать для решения данной задачи целевую функцию (1)

$$C_c(x) = C_{1c}\alpha_c + C_{2c}\beta_c + \sum_{i=1}^x C_{1i} = C_{1c} \prod_{i=1}^S \frac{\alpha_i}{\alpha_{y_i}} \left[ 1 - \prod_{i=1}^x (1 - \alpha_{y_i}) \right] + \\ + C_{2c} \left\{ \prod_{i=1}^x \left[ \frac{\alpha_i}{\alpha_{y_i}} (1 - \alpha_{y_i}) + \beta_i \right] - \prod_{i=1}^S \frac{\alpha_i}{\alpha_{y_i}} \prod_{i=1}^x (1 - \alpha_{y_i}) \right\} + \sum_{i=1}^x C_{1i},$$

где  $C_c(x)$  – математическое ожидание потерь, связанных с контролем совокупности разных изделий;

$C_{1i}$  – средние затраты на контроль  $i$ -го комплектующего изделия совокупности.

Запишем целевую функцию в более простом виде, исходя из определений условных и безусловных рисков для изделия [2, 3]

$$C_c = C_{1c} \prod_{i=1}^S P(A_i) \left[ 1 - \prod_{i=1}^x (1 - \alpha_{y_i}) \right] + C_{2c} \\ \left\{ \prod_{i=1}^x \left[ P(A_i) (1 - \alpha_{y_i}) + \beta_i \right] - \prod_{i=1}^S P(A_i) \prod_{i=1}^x (1 - \alpha_{y_i}) \right\} + \sum_{i=1}^x C_{1i}, \dots (23)$$

где  $P(A_i)$  – вероятность того, что  $i$ -ое изделие совокупности является годным.

Предположим сначала, что неизвестная номенклатура  $x$  контролируемых изделий совокупности представляет собой  $k$  различных групп изделий  $x = x_1 + x_2 + \dots + x_k$ .

Этот случай тем более важен, что на практике он соответствует *обобщенному* случаю контроля, когда вся исходная совокупность комплектующих изделий представляет собой набор партий, при этом каждая партия состоит из одинаковых изделий (партия реле, партия транзисторов и т.д.), а совокупность таких партий образует всю рассматриваемую исходную совокупность изделий.

Итак, пусть первая группа изделий (или партия)  $x_1$  имеет одинаковые характеристики  $\beta_1, \alpha_1, \alpha_{y_1}$ ; вторая группа изделий  $x_2$  имеет одинаковые характеристики  $\beta_2, \alpha_2, \alpha_{y_2}$  и т. д.;  $k$ -я группа -  $\beta_k, \alpha_k, \alpha_{y_k}$ .

Будем рассматривать целевую функцию (23) в этих условиях. Введём следующие обозначения:

$$A_{11} = \beta_1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_{y_1}} (1 - \alpha_{y_1}); A_{12} = \beta_2 + \frac{\alpha_2}{\alpha_{y_2}} (1 - \alpha_{y_2}); \dots;$$

$$A_{1k} = \beta_k + \frac{\alpha_k}{\alpha_{y_k}} (1 - \alpha_{y_k});$$



$$A_{21} = P(A_1); A_{22} = P(A_2); \dots; A_{2k} = P(A_k); A_{31} = 1 - \alpha_{y1};$$

$$A_{32} = 1 - \alpha_{y2}; \dots; A_{3k} = 1 - \alpha_{yk};$$

$$A = \prod_{i=1}^s P(A_i).$$

Тогда целевую функцию (23), которая геометрически представляет собой решётчатую гиперповерхность в многомерном пространстве переменных, можно записать в виде

$$C_c = C_{2c} \left\{ \left[ A_{11}^{x_1} \cdot A_{12}^{x_2} \cdot \dots \cdot A_{1k}^{x_k} \right] - A \left[ A_{31}^{x_1} \cdot A_{32}^{x_2} \cdot \dots \cdot A_{3k}^{x_k} \right] \right\} +$$

$$+ C_{1c} \left\{ A \left[ 1 - \left( A_{31}^{x_1} \cdot A_{32}^{x_2} \cdot \dots \cdot A_{3k}^{x_k} \right) \right] \right\} + \left[ C_{11}x_1 + C_{12}x_2 + \dots + C_{1k}x_k \right], \quad (24)$$

где  $C_{11}, C_{12}, \dots, C_{1k}$  - средние затраты, приходящиеся на контроль одного комплектующего изделия первой, второй, ...,  $k$ -й группы (или партии).

Очевидно, целевая функция потерь (24) также имеет минимум по переменным  $x_1, x_2, \dots, x_k$ . Поэтому если считать  $x_1, x_2, \dots, x_k$  непрерывными переменными, то необходимое условие существования минимума функции, состоящее в равенстве нулю её частных производных  $\frac{\partial C_c}{\partial x_1}, \frac{\partial C_c}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial C_c}{\partial x_k}$ ,

является и достаточным условием. Найдём частные производные функции (24).

$$\frac{\partial C_c}{\partial x_1} = C_{2c} \left\{ \left[ A_{11}^{x_1} \cdot A_{12}^{x_2} \cdot \dots \cdot A_{1k}^{x_k} \right] \ln A_{11} - A \left[ A_{31}^{x_1} \cdot A_{32}^{x_2} \cdot \dots \cdot A_{3k}^{x_k} \right] \ln A_{31} \right\} -$$

$$- C_{1c} A \left( A_{31}^{x_1} \cdot A_{32}^{x_2} \cdot \dots \cdot A_{3k}^{x_k} \right) \ln A_{31} + C_{11}; \quad (25)$$

$$\frac{\partial C_c}{\partial x_2} = C_{2c} \left\{ \left[ A_{11}^{x_1} \cdot A_{12}^{x_2} \cdot \dots \cdot A_{1k}^{x_k} \right] \ln A_{12} - A \left[ A_{31}^{x_1} \cdot A_{32}^{x_2} \cdot \dots \cdot A_{3k}^{x_k} \right] \ln A_{32} \right\} -$$

$$- C_{1c} A \left( A_{31}^{x_1} \cdot A_{32}^{x_2} \cdot \dots \cdot A_{3k}^{x_k} \right) \ln A_{32} + C_{12}; \quad (26)$$

$$\frac{\partial C_c}{\partial x_k} = C_{2c} \left\{ \left[ A_{11}^{x_1} \cdot A_{12}^{x_2} \cdot \dots \cdot A_{1k}^{x_k} \right] \ln A_{1k} - A \left[ A_{31}^{x_1} \cdot A_{32}^{x_2} \cdot \dots \cdot A_{3k}^{x_k} \right] \ln A_{3k} \right\} -$$

$$- C_{1c} A \left( A_{31}^{x_1} \cdot A_{32}^{x_2} \cdot \dots \cdot A_{3k}^{x_k} \right) \ln A_{3k} + C_{1k}; \quad (27)$$

Поскольку  $x_1 \neq 0, x_2 \neq 0, \dots, x_k \neq 0$ , то левые и правые части выражений (25) – (27) можно разделить и умножить на величины  $x_1, x_2, \dots, x_k$ , соответствующие этим выражениям. В результате получается дискретный аналог  $\Delta$  полного дифференциала функции  $C_c$ , который имеет следующий вид

$$\Delta C_c(x) = x_1 \frac{\partial C_c}{\partial x_1} + x_2 \frac{\partial C_c}{\partial x_2} + \dots + x_k \frac{\partial C_c}{\partial x_k}. \quad (28)$$

Выражение (28) справедливо для случая, когда неизвестная номенклатура  $x$  контролируемых изделий из совокупности представляет собой  $k$  различных групп изделий  $x = x_1 + x_2 + \dots + x_k$ , а каждая группа (или партия) содержит одинаковые изделия.

Рассмотрим теперь самый общий случай, когда все  $S$  комплектующих изделий совокупности имеют различные характеристики достоверности контроля  $\beta_i, \alpha_i, \alpha_{yi}$ . Этот случай соответствует тому, что все изделия совокупности разные. Результатом решения должны явиться оптимальная номенклатура изделий  $x^*$ , которые должны контролироваться из всей совокупности  $S$ , и соответствующие оптимальные значения рисков 1 и 2 рода  $\alpha_c^*, \beta_c^*$ , возникающих при входном выборочном контроле совокупности комплектующих изделий.

По-прежнему, считая  $x_1, x_2, \dots, x_k$  непрерывными переменными, учитывая полученное выражение (28) перейдем от дискретного аналога  $\Delta$  полного дифференциала к полному дифференциалу функции нескольких переменных и воспользуемся его свойством, а именно: полный дифференциал функции равен сумме частных дифференциалов по каждой переменной [8], которыми в данном случае являются изделия совокупности  $x_1, x_2, \dots, x_k$ :

$$dC_c = \frac{\partial C_c}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial C_c}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial C_c}{\partial x_k} dx_k, \quad (29)$$

то есть, полное приращение целевой функции (1) или (23), относящейся к совокупности комплектующих изделий, равно сумме приращений этой функции по каждому контролируемому изделию, входящему в совокупность.

Подведем итоги проведенного исследования, выделив три основных результата, которые являются характерными для целевой функции:

во-первых, переменная  $x$  представляет собой неизвестную номенклатуру независимых разных изделий совокупности, подлежащих обязательному контролю, и изменяется целочисленно, т.е.  $x = 1, 2, 3, \dots, S$ ;

во-вторых, как было показано выше, если совокупность комплектующих изделий КТ принимается без контроля, то всегда будут иметь место потери (12), которые в данном случае принимают вид:

$$C_c^0 = C_{2c} [1 - \prod_{i=1}^S P(A_i)], \dots \dots \dots (30)$$

в-третьих, полное приращение целевой функции (1) или (23), относящейся к совокупности комплектующих изделий, равно сумме приращений этой функции по каждому контролируемому изделию, входящему в совокуп-

ность.

Эти результаты являются основой для построения алгоритма оптимизации выборочного контроля совокупности комплектующих изделий, поступающих на сборочные предприятия космической техники.

Запишем целевую функцию для случаев, когда контролируется только первое изделие совокупности, только второе, и т. д., только  $i$ -ое изделие совокупности  $S$ :

1-ое изделие совокупности:

$$C_c^1 = C_{1c} P(A_1) [1 - \beta_{y1}] + C_{2c} [1 - P(A_1)] \beta_{y1} + C_{11}, \quad (31)$$

2-ое изделие совокупности:

$$C_c^2 = C_{1c} P(A_2) [1 - \beta_{y2}] + C_{2c} [1 - P(A_2)] \beta_{y2} + C_{12}, \quad (32)$$

.....  
 $i$ -ое изделие совокупности:

$$C_c^i = C_{1c} P(A_i) [1 - \beta_{yi}] + C_{2c} [1 - P(A_i)] \beta_{yi} + C_{1i}. \quad (33)$$

Учитывая выражения (30)...(33), можно сформулировать следующее положение: чтобы функция (23) имела минимум внутри интервала  $0 < x < S$ , среди всех  $S$  независимых изделий совокупности должна существовать такая номенклатура изделий  $X$ , для которой бы выполнялась система неравенств:

$$C_c^0 > C_c^i, \quad \text{для всех } i = \overline{1, x}, \quad (34)$$

где  $C_c^0$  – значение целевой функции при отсутствии контроля (30);

$i$  – номер контролируемого изделия из совокупности комплектующих изделий  $S$ ;

$C_c^i$  – значение целевой функции при контроле  $i$ -го изделия.

Физический смысл неравенства (34) заключается в следующем. Из всей совокупности изделий  $S$  в номенклатуру изделий, подлежащих обязательному контролю, включаются только те изделия, контроль которых приводит к уменьшению значений целевой функции потерь, по сравнению с ее начальным значением  $C_c^0$ , когда ни одно изделие из совокупности  $S$  не контролируется.

То есть, алгоритм оптимизации выборочного контроля совокупности разных комплектующих изделий, будет заключаться в следующем:

1. Вычисляется значение целевой функции  $C_c^0$  в точке  $x = 0$ , что соответствует (30).

2. Определяются значения целевой функции  $C_c^i$  для каждого  $i$ -го из-

деляя отдельно. Эти значения  $C_c^i$  вычисляются для всех изделий совокупности  $S$ .

3. Среди всех  $S$  изделий в номенклатуру  $X$ , подлежащих обязательному контролю, включают только те изделия, для которых выполняется неравенство (34).

4. Полученное значение  $X$  номенклатуры контролируемых изделий будет оптимальным  $X = X^*$ , ему соответствуют оптимальные значения рисков  $\alpha_c^*$  и  $\beta_c^*$ , которые вычисляются на основе выражений, входящих в (23), по формулам:

$$\alpha_c^* = \prod_{i=1}^S P(A_i) \left[ 1 - \prod_{i=1}^{x^*} (1 - \alpha_{yi}) \right], \quad (35)$$

$$\beta_c^* = \prod_{i=1}^{x^*} \left[ P(A_i) (1 - \alpha_{yi}) + \beta_i \right] - \prod_{i=1}^S P(A_i) \prod_{i=1}^{x^*} (1 - \alpha_{yi}) \quad (36)$$

Заметим, что использование предложенного алгоритма даёт наименьшую методическую погрешность, поскольку непосредственно рассчитываются значения целевой функции. Такой подход вполне приемлем для практики, тем более что требуется получить целочисленное значение  $X^*$ .

Таким образом, полученные в результате оптимальные значения ( $x^*, \alpha_c^*, \beta_c^*, c=0$ ) и будут являться оптимальными характеристиками плана выборочного контроля совокупности комплектующих изделий при входном контроле на сборочных предприятиях космической техники.

В заключение уместно сделать следующее важное замечание.

Случай контроля совокупности разных изделий является *наиболее общим случаем* и в частном случае совпадает с результатами контроля партии одинаковых изделий, которые подробно исследованы в известной литературе [2, 3]. Доказать это можно, положив, что совокупность  $S$  разных изделий КТ представляет собой партию одинаковых изделий  $S=N$ ; в этом случае неизвестная номенклатура изделий  $x$  становится равной выборке  $n$  изделий от партии, т.е.  $x = n$ . Далее, рассмотрев, как изменятся в этом случае риски  $\alpha_c^*$  и  $\beta_c^*$ , входящие в (23), и сама математическая модель (целевая функция) (23), можно прийти к сделанному выше выводу.

Кроме того, разработанный алгоритм оптимизации выборочного контроля совокупности разных комплектующих изделий справедлив и для случая контроля показателя надежности в виде допустимой интенсивности отказов

$\lambda_{tr}$  конкретного изделия совокупности. В этом случае риски 1 и 2 рода  $\alpha_i$  и  $\beta_i$ , возникающие при контроле каждого изделия, вычисляются по формулам (8) и (9) [5] и далее реализуется предложенный алгоритм в соответствии с постановкой задачи (1)...(5).

*Литература*

1. Рудаков В.Б., Макаров В.М. Оптимизация иерархического контроля технических параметров сложных электронных изделий автоматических космических аппаратов при отработочных испытаниях // Двойные технологии. 2016. № 1. С. 9-12.
2. Волков Л.И., Рудаков В.Б. Статистический контроль иерархических систем // М.: Изд-во СИП РИА. 2002. 360 с.
3. Меньшиков В.А., Рудаков В.Б., Сычёв В.Н. Контроль качества космических аппаратов при отработке и производстве. Оптимизация и управление рисками // М.: Машиностроение / Машиностроение-Полёт. 2009. 400 с.
4. Сычев В.И., Храменков В.Н., Шкитин А.Д. Основы метрологии военной техники // М.: Воен. издат. 1993. 393 с.
5. Макаров М.И., Рудаков В.Б., Макаров В.М. Риски принятия ошибочных решений в задаче рационального планирования контроля надежности электронных изделий ракетно-космической техники // Двойные технологии. 2017. № 4.
6. Шор Я.Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности // М.: Сов. Радио. 1962. 551 с.
7. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики // М.: Наука. 1983. 416 с.
8. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по высшей математике // М.: Физматгиз. 1959. 606 с.

УДК 535.5

**Особенности влияния факторов космического пространства на изменения оптических свойств терморегулирующих покрытий класса «солнечный отражатель»**

**А.М. Шамаев**, аспирант,  
**М.Д. Озерский**, д.т.н., профессор кафедры стандартизации  
и управления качеством,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области  
«Технологический университет» г. Королев, Московская область

*В данной статье проведен анализ основных проблем, связанных с оценкой влияния факторов космического пространства на изменение оптических свойств терморегулирующих покрытий (ТРП) класса «солнечный отражатель», применяемых на современных космических аппаратах. Показано, что деградация функциональных свойств ТРП на основе наполненных полимерных композиционных материалов и радиационно-стойкого стекла К-208 под действием факторов космического пространства (ФКП) обусловлена образованием центров окраски как в наполнителе, так и в органическом связующем, а также появлением в стекле радиационно-стимулированных дефектов и в результате электростатических разрядов под воздействием ФКП.*

*Анализ результатов исследований многочисленных работ ученых разных стран показал, что в настоящее время не существует содержательных моделей, описывающих изменения свойств ТРП в условиях космического пространства с учетом основных физико-химических процессов, определяющих деградацию ТРП.*

Терморегулирующие покрытие, тепловой режим космического аппарата, факторы космического пространства. Оценка изменения оптических свойств покрытий.

**Features of the influence of space factors on the changes in the optical properties of thermoregulating coatings of the «solar reflector» class**

**A.M. Shamayev**, graduate student,  
**M.D. Ozersky**, Doctor of technical sciences, professor of the department of standardization and quality management,  
State Budget Educational Institution of Higher Education  
Moscow Region «University of Technological » Korolev, Moscow region

*This article analyzes the main problems associated with the estimation of the effect of space factors on the change in the optical properties of*

*thermoregulating coatings (TRP) of the class «solar reflector» used on modern space vehicles. It is shown that the degradation of the functional properties of TRP based on filled polymer composite materials and radiation-resistant glass K-208 under the action of space factors is caused by the formation of color centers both in the filler and in the organic binder, as well as the appearance in the glass of radiation-stimulated defects as a result of electrostatic discharges under the influence of PCF.*

*Analysis of the results of studies of numerous works of scientists from different countries showed that at present there are no content models describing the changes in TRP properties in the space environment, taking into account the basic physico-chemical processes that determine the degradation of TRP.*

Thermoregulatory coating, the thermal regime of the space device, the factors of outer space. Estimation of changes in the optical properties of coatings.

### **Введение**

Постоянное увеличение сроков активного существования (САС) КА, вместе с расширением их функциональных возможностей, ужесточают требования к надежности работы системы терморегулирования (СТР) КА. По проведенным оценкам около 35% отказов работы КА связано с нарушением работы СТР.

СТР КА должна обеспечивать температурные условия бесперебойной работы бортовой аппаратуры КА и температуры конструкции в заданных гарантированных диапазонах, и состоит из активной и пассивной части, которые заменяют и дополняют друг друга.

Для функционирования активной СТР необходим энергетический ресурс и управление, на которые приходится около 30% веса КА. Это накладывает жесткие требования на минимизацию количества ресурсов по холоду или теплопроизводительности [7].

Пассивные системы терморегулирования, представляют собой ТРП, нанесенные на внешнюю поверхность КА. ТРП осуществляют терморегулирование за счет своих оптических характеристик, коэффициента поглощения солнечного излучения  $A_s$  и коэффициента излучения  $\epsilon$ . Однако при воздействии ФКП на ТРП, помимо изменения значений параметров  $A_s$  и  $\epsilon$ , протекают процессы, которые могут негативно повлиять на работу, как отдельных бортовых систем, так и КА в целом.

В условиях эксплуатации материалы внешних поверхностей, космических аппаратов (КА) подвергаются воздействию электромагнитного излучения Солнца, потоков заряженных частиц, а на околоземных орбитах еще и воздействию потоков атомарного кислорода [1]. Взаимодействие потоков заряженных частиц с диэлектрическими материалами, например, с защитными стеклами солнечных батарей и ТРП КА типа К-208СР сопровождается электростатическими разрядами [10,12,13,27,22,23] вызывающими помехи и сбои бортовой аппаратуры. При разрядах также происходит деструкция материала,



изменяется его стехиометрия и повышается химическая активность приповерхностного слоя, что способствует загрязнению поверхности покрытия продуктами собственной внешней атмосферы (СВА) КА [28].

ТРП на основе полимерных композиционных материалов обладают низкой стоимостью и простой технологией нанесения. Однако в условиях космического пространства такие материалы занимают значительную площадь поверхности спутника, являются одними из основных источников летучих веществ [23,25,26], формирующих собственную атмосферу КА и способны конденсироваться на чувствительных к загрязнениям поверхностях бортовой аппаратуры [28, 2].

ТРП типа «солнечный отражатель», являясь внешним покрытием КА наиболее подвержено действию ионизирующих излучений космического пространства. Например, за один год эксплуатации на геостационарной орбите приповерхностная поглощенная доза составляет  $8,8 \times 10^6$  Гр [20]. Поэтому, помимо исследований изменения функциональных характеристик ТРП, необходимо знать закономерности потери массы ТРП на основе полимерных композитов под действием факторов космического пространства (ФКП).

ТРП и экранно-вакуумная теплоизоляция, которыми покрывают большую часть поверхности КА, выполняют основную роль в его терморегулировании – в установлении баланса между энергией выделенной внутри КА, поглощенной энергией солнечного излучения, и энергией, излучаемой в КП. Функциональными характеристиками ТРП являются их термодинамические характеристики: коэффициент поглощения солнечного излучения  $A_s$  и коэффициент излучения (степень черноты)  $\epsilon$ . Равновесная температура тела при радиационном теплообмене определяется отношением  $A_s / \epsilon$ , чем оно больше, тем выше равновесная температура.

Действие ультрафиолетового излучения (УФ) Солнца и ионизирующих излучений КП на ТРП приводит к росту значения параметра  $A_s$  и как следствие, к повышению температуры как самого покрытия [3], так и бортовой аппаратуры.

Таким образом, оптимальное ТРП должно обеспечить минимальное отклонение от заданного теплового баланса, минимизировать возможности развития электростатических разрядов, приводящих к сбоям в работе бортовой аппаратуры и загрязнению высокочувствительных поверхностей оптических приборов КА.

Данная статья посвящена анализу современных методов решения проблем связанных с использованием полимерных композиционных материалов в качестве ТРП. Основное внимание уделяется задачам прогнозирования изменений термодинамических характеристик ТРП в условиях космического пространства и загрязнений поверхностей оптических приборов КА. Актуальность решения этих проблемы связана с увеличением САС космической техники, и как следствие, с ужесточением требований к надежности работы сис-

темы пассивного терморегулирования и к чистоте оптических поверхностей КА.

Для прогнозирования изменений функциональных характеристик ТРП в условиях космического пространства необходимы методики, построенные на основе содержательных моделей, описывающих изменения свойств ТРП в условиях космического пространства с учетом основных физико-химических процессов определяющих деградацию ТРП. Отметим, что словесное описание физико-химических процессов, как правило, представляет собой нагромождение нечетких высказываний, которые лишь затуманивают существо дела. Использование математического описания позволяет каждому аспекту изучаемого процесса поставить в соответствие определенным математический аппарат, в результате чего становится более наглядной взаимосвязь, существующая между различными параметрами процесса. Кроме того, математическая модель даёт основу для численного анализа, с помощью которого могут быть получены данные не только описательного, но и прогностического характера.

Для обоснованного применения конкретного ТРП необходимо надежно прогнозировать изменения его оптических характеристик  $A_s$  и  $\epsilon$ , в условиях эксплуатации КА. Это позволит оценить изменение температуры КА и оптимально сконструировать активную часть СТР.

Оценка изменения оптических характеристик ТРП по результатам наземных и летных испытаний сопряжена с длительными временными экспозициями, поэтому данный подход не позволяет получать оперативные данные применительно к разработанным покрытиям. К тому же, результаты, полученные для КА эксплуатирующегося на конкретной орбите, не всегда применимы для прогнозирования изменения характеристик ТРП КА на других орбитах.

Основным подходом для оценки изменения оптических характеристик ТРП являются лабораторные ускоренные испытания, анализ результатов которых может позволить разработать физико-математические модели, основное назначение которых – достоверное описание химических процессов на доступном интервале времени наблюдения и возможность получения объективного прогноза на весь срок эксплуатации КА.

Существующие модели по прогнозированию изменения  $A_s, \epsilon$ , несмотря на успехи, достигнутые к настоящему времени в изучении физико-химических процессов, протекающих в материалах ТРП под воздействием ФКП, основаны на эмпирическом и полуэмпирическом подходе прогнозирования, имеют ряд допущений и не учитывают в достаточной степени физико-химические процессы, происходящие в ТРП под воздействием ФКП и поэтому не позволяют достоверно прогнозировать изменение оптических характеристик ТРП на длительный САС КА [8].

Например, статистическая модель, основанная на анализе большого количества экспериментальных данных справедлива для небольших доз облучения и коротких временных интервалов. Для ТРП с низкой скоростью деградации она адекватно описывают процесс изменения  $A_s$  в течение нескольких

лет эксплуатации. В данной модели показано, что изменение коэффициента поглощения ТРП при облучении электромагнитным солнечным излучением, электронами и протонами эффективно описывается степенной функцией

$$\Delta a_s = k_1 \cdot t^{k_2}, \quad (5)$$

$$\Delta a_s = k_3 \cdot \Phi^{k_4}, \quad (6)$$

где  $\Phi$  – поток частиц,  $t$  – время облучения;  $k_1, k_2, k_3, k_4$  – коэффициенты моделей.

Коэффициенты,  $k_1, k_2, k_3, k_4$ , зависят в общем случае от плотности потока частиц и интенсивности ЭМИ, температуры покрытия и давления газов в окружающей среде.

Разнообразие состава и типов ТРП, многообразие факторов космического пространства, широкие диапазоны спектров энергии протонов и электронов, электромагнитного излучения солнца, воздействия в разной временной последовательности и в различных сочетаниях сильно затрудняют процессы прогнозирования оптических характеристик ТРП.

Таким образом, в настоящее время необходима разработка обобщенной модели, в рамках общего физического подхода, которая может быть использована для прогнозирования изменения оптических характеристик покрытий различных типов на конкретных орбитах в течение заданного времени.

Для решения этой проблем необходимо знание физическо-химических процессов в ТРП происходящих при действии ФКП и механизмов деградации ТРП, что также позволит создавать ТРП, обладающих высокой радиационной стойкостью [17].

**Целью данной статьи** являлся проведение литературного анализа о физико-химических процессов, протекающих в ТРП под воздействием факторов КП, и влияния их на изменение оптических свойств покрытий.

ТРП представляют собой материалы на основе эмалей, металлы с различными видами обработки поверхности (полирование, анодирование и др.), материалы ЭВТИ (пленки, ткани и др.), зеркальные покрытия из стекла марки К-208 с напылением подслоя серебра или алюминия, пленочные зеркальные покрытия.

В зависимости от значений  $A_s$  и  $\epsilon$  ТРП классифицируют на солнечные отражатели, солнечные поглотители, истинные отражатели, истинные поглотители.

По характеру отражения солнечного излучения ТРП делятся на зеркально и диффузно отражающие. Зеркально отражающие покрытия представляют собой полированные или напыленные металлические поверхности, а диффузно отражающие – органические или керамические эмали.

Основой любого эмалевого покрытия является плёнообразующее вещество, представляющее собой синтетические смолы и продукты сложной химической обработки природных веществ. Вторым компонентом эмалевых покрытий являются пигменты. Пигменты представляет собой обширную группу красящих веществ на основе минеральных и органических соедине-

ний. В качестве минеральных пигментов используют алюминиевые порошки, двуокись титана, цинковые белила, сульфид кадмия, а также другие соли и окислы металлов.

Тепловой баланс на внешней поверхности КА в стационарном состоянии можно представить в виде:

$$Q_{\text{внутр}} + Q_{\text{внешн}} = Q_{\text{изл}}, \quad (1)$$

где

-  $Q_{\text{внутр}}$  – тепловой поток, подводимый к внутренней поверхности КА создаваемый работой узлов бортового оборудования,

-  $Q_{\text{внешн}}$  – поглощенный тепловой поток из окружающего пространства основным источником которого является прямое солнечное излучение

-  $Q_{\text{излучч}}$  – тепловой поток, излучаемый внешней поверхностью КА.

Коэффициент поглощения солнечного излучения –  $As$  ТРП, определяют приток тепловой энергии за счет поглощения солнечного излучения поверхностью КА.

Коэффициент излучения –  $\varepsilon$  ТРП определяет отток тепловой энергии за счет собственного излучения поверхностью КА, находящейся при заданной равновесной температуре

Коэффициенты  $As$  и  $\varepsilon$  определяются следующим образом:

$$As = \int_{0,2\text{ мкм}}^{2,5\text{ мкм}} (1 - R(\lambda)) \cdot S(\lambda) d\lambda \Big/ \int_{0,2\text{ мкм}}^{2,5\text{ мкм}} S(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

$$\varepsilon = \int_{2,5\text{ мкм}}^{25\text{ мкм}} (1 - R(\lambda)) \cdot I_0(\lambda) d\lambda \Big/ \int_{2,5\text{ мкм}}^{25\text{ мкм}} I_0(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

$R(\lambda)$  – значение спектрального коэффициента отражения

где  $S(\lambda)$  – спектральное распределение энергетической освещенности Солнечного излучения.

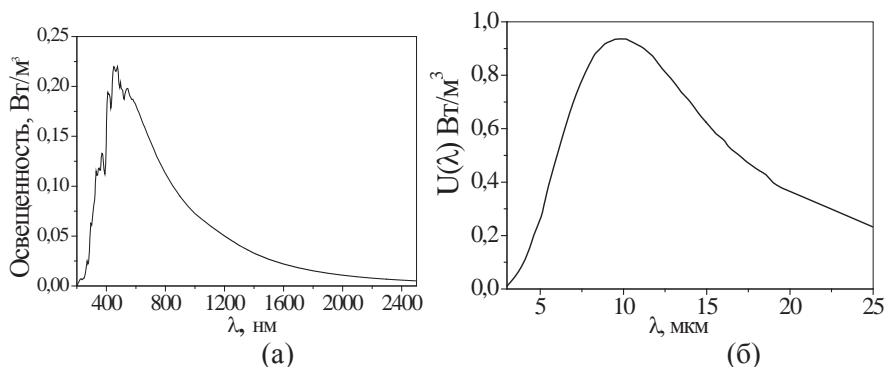


Рисунок 1 – (а) – распределение внеатмосферного солнечного излучения  
(б) – спектральная плотность мощности излучения абсолютно черного тела при температуре 300 К

В предположении, что тепловой поток на внешней поверхность КА обеспечивается только прямым солнечным излучением, температура  $T$  по-

верхности плоского элемента КА, расположенного перпендикулярно к направлению солнечных лучей, определяется выражением:

$$T = \sqrt[4]{\frac{Q_{\text{пад}} \cdot S_1 \cdot A_s}{S_2 \cdot \sigma \cdot \varepsilon}}, \quad (4)$$

где  $Q_{\text{пад}}$  – поток падающего солнечного излучения;

$S_1, S_2$  – площади поглощающей и излучающей поверхности КА;

$\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана;

$A_s$  – коэффициент поглощения солнечного излучения ТРП КА;

$\varepsilon$  – коэффициент теплового излучения ТРП КА.

В процессе эксплуатации КА температура его внешней поверхности будет зависеть от отношения  $a_s/\varepsilon$  ТРП. Наиболее эффективный отвод тепла с внешней поверхности КА осуществляется с помощью ТРП обладающих минимальным значением отношения  $a_s/\varepsilon$ , и минимальным его изменением при нахождении КА на орбите.

Минимальным отношением  $a_s/\varepsilon$  характеризуются зеркальные покрытия марок К-208, на основе серебра и алюминия, а также специальные белые эмалевые покрытия на основе окислов металлов ( $ZnO, TiO_2, BaSO_4, ZrO_2$ ) имеющих значение  $A_s = 0,1-0,3$  и  $\varepsilon = 0,05-0,15$ , данные ТРП относятся к классу «солнечные отражатели». ТРП данного класса покрывают большую часть КА.

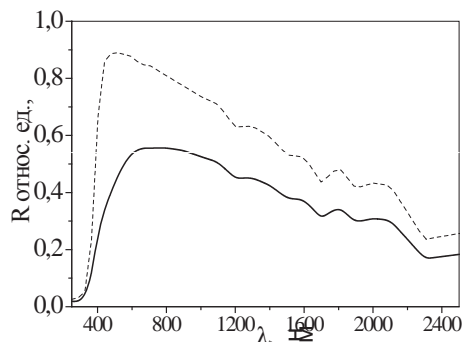
Геостационарная орбита (ГСО) и высокоэллиптическая орбита (ВЭО) являются наиболее используемыми для эксплуатации КА и характеризуются максимальным проявлением ФКП, для КА эксплуатирующийся на данных орбитах в настоящее время применяют ТРП типа К-208Ср, обладающие минимальным изменением  $A_s/\varepsilon$ , однако наряду с высокой стоимостью данные покрытия неприменимы на внешних поверхностях КА со сложной формой.

Эмалевые ТРП лишены указанных недостатков. Однако их применение на данных орбитах ограничено поскольку значение их оптических характеристики  $A_s, \varepsilon$  наиболее сильно подвержено воздействию ФКП по сравнению с зеркальными покрытиями.

Установлено, что для эмалевых покрытий основное воздействие ФКП оказывают на изменение  $A_s$ . Коэффициент излучения- $\varepsilon$  изменяется не более 0,04 от своего первоначального значения.

Увеличение  $A_s$  ТРП обусловлено изменением спектра отражения в диапазоне длин волн 200-2500нм, вследствие протекания физико-химических процессов, происходящих в составляющих ТРП под воздействием ФКП.

На рисунке 3 приведены спектры отражения ТРП ЭКОМ-1 собой суспензию оксида цинка в растворе акриловой смолы в смеси органических растворителей. Спектры представлены в исходном состоянии, и после воздействия ФКП (протоны, электроны, ультрафиолетовая часть солнечного излучения), при поглощенной дозе соответствующей нахождению КА на ГСО в течение 5 лет. Значения коэффициента поглощения солнечного излучения при этом возрастает от  $A_s = 0,287$  до 0,570.



**Рисунок 3 – Спектры отражения ТРП ЭКОМ-1 до воздействия ФКП пунктирная линия и после воздействия ФКП сплошная линия**

Воздействие ФКП на ТРП может вызвать как обратимые, так и необратимые процессы. Обратимые процессы обусловлены в основном ионизацией и возбуждением атомов вещества и практически полностью исчезают после воздействия. Необратимые процессы обусловлены образованием дефектов и сохраняются полностью или частично после воздействия [18].

Одной из основных причин изменения спектра отражения ТРП является возникновение полос поглощения обусловленных центрами окраски. Центр окраски является дефектом кристаллической решетки, образующимся в результате захвата электрона или дырки в зоне вакантного узла под воздействием ионизирующего излучения. Основным видом ионизирующего излучения присутствующим на ГСО и ВЭО является электромагнитное излучение солнца, потоки протонов и электронов. Радиационно-химические превращения также приводят к изменению спектрального коэффициента отражения ТРП.

Воздействие Солнечного излучения в спектральном диапазоне от мягкого рентгеновского, вакуумного и ближнего ультрафиолета до значений энергии, соответствующих ширине запрещенной зоны диэлектриков и полупроводников ( $E_g$ ) и энергии разрыва связи полимеров ( $E_p$ ) будет приводить к образованию электронно-дырочных пар, радикалов и других дефектов решетки. Эти процессы будут создавать дефекты и центры окраски, концентрация которых будет определяться энергией фотонов и интенсивностью излучения. С уменьшением длины волны возрастает энергия квантов излучения. Энергия квантов может стать достаточной для деструкции вещества – разрыва молекулярных связей и структурирования (сшивки) макромолекул. Наиболее подвержены такому воздействию органические соединения. Наибольшие длины волн, при которых воздействие излучения приводит к деструкции материалов, находятся в области 400 нм. При смещении, в ультрафиолетовый диапазон спектра, деструктирующее воздействие излучения на материалы возрастает из-за увеличения энергии квантов, но с уменьшением длины волны резко ослабевают интенсивность излучения солнечного спектра. Таким образом, общее воздействие УФ части солнечного излучения на ТРП уменьшается в коротко-



волновой части спектра. Из очень малой интенсивности воздействием солнечного рентгеновского излучения пренебречь

Воздействие излучения видимой и ближней ИК-областей спектра проявляется в фотохимических процессах на поверхности, в фото ионизации дефектов, в фотоотжиге центров окраски, в диффузии дефектов и нагреве ТРП. Возбуждаются только колебательные и вращательные степени свободы молекул, что проявляется как тепловое воздействие излучения с возможным изменением физическо-химических свойств вещества, в результате изменения температуры. Это обуславливает определенную взаимосвязь между фотохимическим и тепловым действием излучения.

В результате упругого взаимодействия заряженных частиц с атомами решетки происходит смещение последних из равновесных положений. Образующиеся смещенные атомы и вакансии в решетке характеризуют простейшие радиационные дефекты, так называемые дефекты Френкеля. Количество смещенных атомов  $\nu(E)$  в решетке зависит от энергии связи атомов в решетке, энергии и вида взаимодействующих с веществом частиц:

$$\nu(E) = E_y / 2 \cdot E_d, \quad (8)$$

Где  $E_y$  – энергия, затраченная взаимодействующей частицей на упругие взаимодействия;

$E_d$  – пороговая энергия смещения атома в решетке. При прохождении заряженных частиц через диэлектрические и полупроводниковые пигменты, являющиеся составной частью терморегулирующих покрытий, в результате ионизационных процессов генерируются вторичные электроны и дырки. Большая часть электронов и дырок рекомбинирует друг с другом за очень короткие промежутки времени, другие захватываются дефектами структуры и примесными атомами. В пигментах терморегулирующих покрытий (ZnO, TiO<sub>2</sub> и др.) инородные примеси, в первую очередь, атомы алюминия и щелочных металлов, играют важную роль в процессе образования центров окраски. В зависимости от вида дефекта, захватившего электрон или дырку, образуются различные типы центров окраски.

При взаимодействии излучения с пленкообразователем происходит ионизация и возбуждение его молекул. В полимере в той или иной степени протекают следующие необратимые процессы сшивание, деструкция, изомеризация, реакция полимеризации [11,6,14,17,18].

Необходимо особо отметить процессы изменения ненасыщенности, т.к. образование сопряженных двойных связей в макромолекулах приводит к ухудшению оптических свойств покрытия.

При равных энергиях протоны имеют значительно большее сечение упругих взаимодействий с веществом, чем электроны. Поэтому виды радиационных дефектов, возникающих в материале покрытий, в этих двух случаях также могут быть различны. Воздействие на покрытия протонного излучения более оказывает большее повреждающее воздействие, чем облучения электронами.

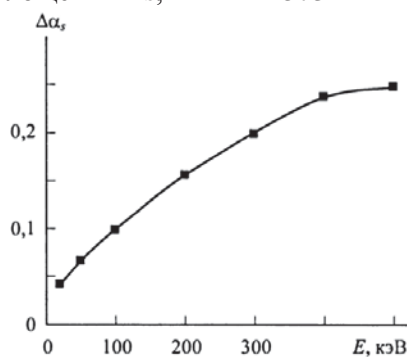
При дозах облучения  $\sim 10^5$ - $10^6$  Гр имеющиеся в оптических материалах



первичные ловушки электронов и дырок, ответственные за образование центров поглощения, полностью заполняются. Вновь образуемые дефекты кристаллической решетки создают дополнительные центры поглощения. Протоны могут вступать в непосредственное химическое взаимодействие с атомами и молекулами вещества покрытий, в частности, при протонном облучении возможны процессы восстановления окислов металлов с образованием гидроксильных групп.

Экспериментальные данные показывают, что с ростом энергии электронов и протонов до определенного значения эффективность их повреждающей способности увеличивается, а затем ее рост замедляется.

На рисунке 4 представлена зависимость энергии протонов на изменение коэффициента поглощения  $\Delta\alpha$ , ТРП АК-573



**Рисунок 4 – Влияние энергии протонов на изменение коэффициента поглощения  $\Delta\alpha$ , ТРП АК-573**

Воздействие заряженных частиц космического пространства может привести к увеличению оптической плотности стекла К-208 за счет образования и накопления в них центров окраски и к развитию электростатических разрядов (ЭСР), сопровождающихся деструкцией материала, генерацией электромагнитных импульсов, выбросом плазмы в окружающее пространство, отжигом структурных дефектов, содержание которых особенно велико в приповерхностном слое и т.д.

Отжиг дефектов сопровождается возникновением радиационно-стимулированных напряжений и радиационно-стимулированной диффузии, что способствует ускорению транспортных процессов, обеспечивающих перенос материала к центрам роста микровыступов на поверхности стекла [12,14].

В работе [13] изучалось влияние электронного и протонного облучения на изменение спектра пропускания стекла К-208 в диапазоне длин волн 200-2500 нм.

Ионизирующие излучения генерируют в стекле свободные электроны и дырки, локализация которых на соответствующих ловушках приводит к появлению электронных и дырочных центров окраски.

Установлено что изменение спектра пропускания стекла обусловлено

как появлением радиационно стимулированных центров окраски, так и возникновением электростатических разрядов под воздействием ФКП.

Воздействие на стекло К-208 Ср протонного излучения привело к увеличению коэффициента пропускания, а электронного к снижению коэффициента пропускания.

Такой результат можно объяснить двумя основными причинами: во-первых, длина пробега электрона в стекле во много раз больше, чем протона; во-вторых, при облучении электронами в К-208 Ср. накапливается отрицательный заряд. Длины пробега в стекле электронов и протонов с энергией 40 кэВ равны, соответственно, 16,3 мкм и 0,67 мкм, тормозная способность – это средняя скорость, с которой заряженная частица теряет энергию в какой-нибудь точке вдоль трека, – для протонов в 86 раз выше, чем для электронов. Следовательно, при одинаковой плотности потока при протонном облучении в приповерхностном слое стекла энергии выделяется во много раз больше, чем при облучении электронами.

Под действием ионизирующих излучений в стекле, кроме генерации электронно-дырочных пар, релаксация которых может привести к образованию центров окраски, происходит аннигиляция дефектов. При протонном облучении эти процессы происходят в тонком приповерхностном слое стекла, в котором выделяется вся энергия частиц. Действие излучения при достаточной плотности выделяющейся энергии может привести к цепному процессу аннигиляции дефектов, который частично может поддерживаться энергией, запасенной в центрах окраски. Особенно интенсивно этот процесс происходит в приповерхностной области, в которой сосредоточена большая концентрация точечных дефектов. Таким образом, увеличение коэффициента пропускания образцов, облученных протонами, можно объяснить радиационным отжигом дефектов, существовавших в приповерхностном слое, и протонно-стимулированной десорбцией с поверхности молекул газов и органических примесей.

Облучение электронами привело к уменьшению коэффициента пропускания стекла К-208 во всем диапазоне спектра. Последнее обстоятельство связано с тем, что действие электронов, кроме генерации центров окраски, сопровождается накоплением объемного заряда и электрическими разрядами.

Одновременное воздействие на покрытия корпускулярного и электромагнитного излучений Солнца может также привести к противоположным процессам: к генерации и фотоотжигу центров окраски.

Физическо-химические процессы, протекающие при деградации оптических свойств порошков, в основном, одни и те же. Однако скорость образования и накопления центров оптического поглощения в каждом типе пигмента и покрытия индивидуальна и обуславливается, по-видимому, «биографическими» структурными дефектами и примесями, присутствующими в исходном образце пигмента или типом пленкообразователя. Поликристаллические окислы характеризуются высокой концентрацией биографических анионных вакансий.

В настоящее время еще не проведено систематическое изучение радиационно-химических процессов под воздействием ФКП в высоконаполненных гетерогенных системах и ТРП, в частности. Отдельные работы, касающиеся поведения полимерных композиций в поле ионизирующего излучения, носят эмпирический характер [18].

Результатом воздействия протонного, электронного и ЭМИ солнца на оксид цинка является образование дефектов кристаллической решетки различных типов. Это вакансии как катионной, так и анионной подрешеток, междоузельные атомы, близкие пары Френкеля, а также более сложные дефекты, а так же реакция фотолиза или радиолиза

Установлено, что форма полосы поглощения в пигментах ТРП, наведённого солнечным излучением в видимом диапазоне длин волн совпадает с формой полосы поглощения, наведённой воздействием протонов и электронов. Это свидетельствует о том, что дефекты, возникающие в пигментах ТРП одни и те же и не зависят от вида воздействующего излучения. Но при воздействии ЭМИ солнца интенсивность поглощения в видимом диапазоне спектра намного ниже, чем при облучении протонами и электронами из-за фотооджига дефектов на поверхности зёрен порошков.

Изменение оптических характеристик ТРП происходит и в результате радиационно-химических превращений. Заряженные частицы при прохождении через вещество, если их энергия превышает несколько десятков электронвольт, вызывают ионизацию и возбуждение молекул вдоль трека взаимодействующей частицы. Ионизованные и возбужденные молекулы являются химически активными продуктами. Состояние таких частиц слабо зависит от вида излучения. Различие наблюдается лишь в соотношении образующихся продуктов за счет разной плотности ионизованных и возбужденных продуктов в треках частиц.

Максимальная плотность энергетических потерь ионами в веществе наблюдается в конце их пробега. Число возбужденных и ионизованных молекул пропорционально мощности поглощенной дозы излучения. В полимерных материалах в результате радиационно-химических реакций могут протекать или деструкционные процессы, т.е. процессы образования более простых молекул, или процессы сшивания, когда образуются между молекулами сложные поперечные связи. При сшивании наблюдается рост молекулярного веса, образование нерастворимой сетки и упрочнение полимера.

Изменение оптических свойств ТРП происходит в результате распыления материала приводящего к изменению его поверхностных свойств и шероховатости поверхности.

Распыление материала происходит, в результате протонной бомбардировки при образовании быстрых смещенных атомов в поверхностных слоях материала часть из которых благодаря каскадной передаче энергии может покинуть поверхность, а так же в результате сильного локального разогрева поверхности в районе удара протона приводящего к сублимации вещества.

Сублимация материала также происходит в результате воздействия

глубоко вакуума и ультрафиолета. В работе [14] показано, что при воздействии, глубокого вакуумного ультрафиолета может сформироваться рельеф в виде ряби, неровностей гранульного типа, либо переодических структур.

Возбуждая поверхностные атомы материала покрытия и адсорбированные на нем газы, бомбардирующие протоны оказывают сильное каталитическое действие при протекании тех или иных химических процессов.

В условиях космоса ТРП подвергаются одновременному воздействию вакуума и космических излучений, что приводит к усилению эффекта сублимации. Для ТРП, имеющих в составе оксиды железа и цинка, которые интенсивно поглощают ультрафиолетовое излучение, это особенно следует учитывать.

Функционирование КА происходит в окружении создаваемой им собственной внешней атмосферы состоящей из смеси твердых частиц, паров и газов образованных в результате различных процессов, к которым в первую очередь следует отнести десорбцию газов, сублимацию и эрозию материалов внешних поверхностей, утечку газов и конденсата, выхлопные продукты работы двигателей и различные выбросы из космического аппарата.

Продукты газовой выделения, можно разделить на три группы.

- 1) Летучие вещества, которые после выделения нигде не оседают: это спирты, эфиры и т.д., которые обычно используются как компоненты растворителей красок.
- 2) Вещества, которые после выделения могут конденсироваться на поверхностях, имеющих достаточно низкую температуру (основной представитель – вода).
- 3) Летучие конденсирующиеся вещества (ЛКВ), высокомолекулярные соединения, которые при попадании на какую-либо поверхность с большой вероятностью на ней конденсируются.

СВА КА, рассеивает солнечный свет, что может мешать ориентации КА. Паровая и газовая часть СВА могут быть частично ионизированы и искажать амплитуду и фазу радиосигналов бортовых радиотехнических систем.

При повышенных температурах газовой выделяющих неметаллических поверхностей увеличивается плотность и концентрация компонентов СВА, а при пониженных температурах наблюдается осаждение компонентов и образование плёнок. За счёт «отжига» под действием факторов космического пространства плёнки прочно закрепляются на холодных поверхностях КА и сохраняются при увеличении температур. Это может нарушить ориентацию КА и ухудшить оптические коэффициенты ТРП [7,16,17].

#### **Выводы**

1. Основными проблемами, связанными с использованием на космических аппаратах терморегулирующих покрытий (ТРП) являются отсутствие достоверных методик по изменению их оптических характеристик, а также газовой выделение покрытий увеличивающие СВА КА, которое создает помехи при ориентации КА.

2. Изменение оптических свойств в стекле К-208 обусловлено радиационно-стимулированными дефектами и результатом электростатических разрядов.

3. Установлено что, физическо-химические процессы, протекающие при деградации оптических свойств порошков пигментов полимерных композиционных материалов, в основном, одни и те же. Однако скорость образования и накопления центров оптического поглощения в каждом типе пигмента и покрытия индивидуальна и обуславливается, по-видимому, биографическими структурными дефектами и примесями, присутствующими в исходном образце пигмента или пленкообразователе.

4. В пигментах полимерных композиционных материалов независимо от вида излучений возникают одни и те же дефекты. Однако интенсивность поглощения в видимой области спектра при ЭМИ значительно ниже, чем при облучении протонами из-за процесса фотооджига дефектов на поверхности зёрен порошков.

5. В настоящее время еще не проведено систематическое изучение радиационно-химических процессов в высоконаполненных гетерогенных системах и ТРП, работы, касающиеся поведения полимерных композиций в поле ионизирующего излучения, носят эмпирический характер.

6. Результаты проведенного анализа могут служить исходной информацией для разработки прогностических моделей по оценке изменения оптических характеристик ТРП КА и разработке ТРП обладающих необходимой стойкостью для КА эксплуатирующийся на заданных орбитах [16-17].

#### *Литература*

1. Боев С.Г., Ушаков В.Я. Радиационное накопление заряда в твердых диэлектриках и методы его диагностики // М. Энергоатомиздат. 1991. 240 с.
2. Гуревич М.М., Ицко Э.Ф., Середенко М.М. // Оптические свойства лакокрасочных покрытий Санкт-Петербург 2010г. С. 123-128.
3. Гушин В.Н. Основы устройств космических аппаратов // Москва Машиностроение 2003 г. С.150-203.
4. Демин Д.Ю., Верхотурова И.В., Нецименко В.В. исследование кинетики концентрации введенных центров окраски в оксиде цинка облученного протонами. [Электронный ресурс]. URL: [http://lib.esstu.ru/cgi-bin/irbis64r\\_12/cgiirbis\\_64.exe](http://lib.esstu.ru/cgi-bin/irbis64r_12/cgiirbis_64.exe) Электронный каталог научной библиотеки ВСГУТУ.
5. Евкин И.В., Миронович. В.В., Тендитный В.А., Вестник Красноярского Государственного технического университета, посвященный 65-летию проф. Б.П. Соустина // Деградация терморегулирующих покрытий космических аппаратов при длительной эксплуатации на геостационарной орбите. КГТУ 1998. Вып. № 3. С 94-103.
6. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Оценка возможности применения трубчатых газоразрядных источников излучения для моделирования тепловых режи-

- мов крупногабаритных космических конструкций // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение» 2013. Вып. № 2 109.
7. Михайлов М.М. Прогнозирование оптической деградации терморегулирующих покрытий космических аппаратов // Новосибирск. Наука. 1999. С 49-60.
  8. Михайлов М.М. Схема долгосрочного прогнозирования оптической деградации терморегулирующих покрытий космических аппаратов // Ж. Перспективные материалы. 2000. № 2. с.26-36.
  9. Озерский М.Д., Строителей В.Н., Исаев В.Г., Азаров В.Н. Системный анализ факторов, оказывающих влияние на процесс обоснования требований к показателям качества сложных технических систем // Мир измерений. № 2(174). 2017. 64 с. Стр. 22-26.
  10. Рау Э.И., Евстафьева Е.Н., Андрианов М.В. // Физика твердого тела. 2008. Т.50. С. 599.
  11. Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Коровин С.Б. Исследования электростатических разрядов при облучении стекла К-208 электронами // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015, № 1. С. 88-93.
  12. Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Гаценко Л.С., Волкова Я.Б. Электроразрядные процессы при облучении стекол К-208 и СМГ электронами с энергией в диапазоне от 10 до 40 кэВ. // Перспективные материалы, 2015, №1, С. 22-30.
  13. Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С. Изменения спектра пропускания стекла марки К-208 под действием ионизирующих излучений и молекулярных потоков // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2014. № 7. С. 83-87.
  14. Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С. Радиационно стимулированные изменения поверхности стекла с технологическими дефектами // Физика и химия обработки материалов. 2017. № 2. С. 14-22.
  15. Черкашина Н.И. Воздействие вакуумного ультрафиолета на полимерные композиты терморегулирующего назначения // Международный научно-исследовательский журнал. № 7 (49). Часть 4. 2014 г.
  16. Чиров А.А. влияние тонких пленок конденсата металлического рабочего тела ЭРД на интегральные оптические коэффициенты терморегулирующих покрытий космических аппаратов // Космические исследования. 2014. том 52. № 3. с. 248-256.
  17. Шарафутдинова В.В. Влияние факторов космического пространства на накопление собственных дефектов в оксиде цинка и терморегулирующих покрытиях на его основе. Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук // Благовещенск-1997г. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dissercat.com/content/vliyanie-faktorov-kosmicheskogo-prostranstva-na-nakoplenie-sobstvennykh-defektov-v-okside-ts>.



18. Щербакова Н.А., Кочнев Н.И., Новожилов Е.Н., Подгребенкова Г.А., Агафонцев В.Ф., Соловьев Г.Г. Разработка рецептуры белой эмали класса «солнечные отражатели» // Сб. «Технология получения и применение новых полимерных покрытий». М., НИИТЭХИМ. 1986. с.8.
19. Под редакцией Петрова Г.И. Моделирование тепловых режимов космических аппаратов и окружающей среды // Москва. Машиностроение. 1971 г. С. 8-173.
20. Модель космоса. Научно-информационное издание // Под ред. Л.С. Новикова. Т.2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов // М.: КДУ. 2007. 1144 С.
21. Gedeon O., Jurek K. Drbohlav I. // J. Non-Crystalline Solids. 2007. V. 353. Iss. 18–21. 1946. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2007.01.058.
22. Gussarov A.I., Doyle D., Hermanne A., Berghmans F., Fruit M., Ulbrich G., Blondel M. Refractive-index changes caused by proton radiation in silicate optical glasses // J. Appl. Opt., 2002, v. 41, No. 4, p. 678-684.: [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1364/AO.41.000678>.
23. Guillin J.: «Evaluation of isothermal outgassing kinetics for some materials used in apace», Proceedings of the Third European Symposium on Spacecraft Materials in Space Environment, ESA SP-232, The Netherlands, October 1985, pp. 35-38.
24. Henson T. D., Torrington G. K. Space radiation testing of radiation-resistant glasses and crystals, Proc. SPIE4452, Inorganic Optical Materials III, 54 (November 2, 2001). [Электронный ресурс]. URL: <doi:10.1117/12.446894>; <http://dx.doi.org/10.1117/12.446894>.
25. Khassanchine R.H., Timofeev A.N., Grigorevskiy A.V., Galygin Influence of UV radiation on outgassing of polymeric composites // AIAA Journal of Spacecraft and Rockets. Vol. 43, No. 2, 2006, pp. 410-413. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.2514/1.15847>.
26. Khassanchine R.H., Timofeev A.N., Galygin A.N., Kostyuk V.I. Simulation of electron radiation on outgassing of spacecraft materials // AIAA Journal of Spacecraft and Rockets. Vol. 43, No. 3, 2006, pp. 509-513. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.2514/1.15317>.
27. Qingyan Wang, Hongbin Geng, Chengyue Sun, Xingji Li, Haifa Zhao, Weilong Liu, Jingdong Xiao and Zhaochu Hu, Radiation effects on optical and structural properties of GG17 Glasses induced by 170-keV electrons and protons. J. Appl. Phys. 119, 023103 (2016); DOI: [Электронный ресурс]. URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4939097>.
28. Delphine FAYE: «Calculation approach for outgassing curves of PU1 paint and molecular contamination modeling: ground testing and computer simulation», 8th International Symposium on «Materials in a space environment». Arcachon-France. From 5 to 9 June 2000.



УДК 621.396.96:621.26

**Организация информационного сверхвысокочастотного канала ближнего действия, устойчивого к замираниям сигнала**

**В.М. Артюшенко**, доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой информационные технологии и управляющие системы,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области

«Технологический университет», г. Королев Московская область,

**В.И. Воловач**, доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Информационный и электронный сервис»,

Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования, Поволжский государственный университет сервиса, г.  
Тольятти

*Рассмотрены и проанализированы вопросы, связанные с организацией дуплексной радиолинии сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона для обмена информацией между транспортным средством (ТС) и наземной станцией. Представлена методика выбора приемопередающих рупорных антенн, осуществлен энергетический расчет СВЧ радиолинии. Проанализирована помехоустойчивость информационного СВЧ канала ближнего действия к замираниям сигнала при когерентном приеме. Показано, что в условиях замирания СВЧ сигнала, вероятность ошибки может достигать менее  $10^{-6} \dots 10^{-8}$  на знак.*

Информационный сверхвысокочастотный канал, вероятность ошибки, когерентный прием, рупорная антенна, замирания сигнала.

**The organization of the information superhigh frequency channel in the middle of the action resistant to fading signal**

**V.M. Artyushenko**, doctor of Technical Sciences, Professor,  
State Educational Institution of Higher Education

Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region,

**V.I. Volovach**, doctor of technical Sciences, associate Professor head of the Department «Information and electronic service»,

State budgetary educational institution of higher education  
Volga region state University of service, Tolyatti

*Reviewed and analyzed issues related to the organization of duplex radio ultra high frequency (UHF) band for exchanging information between a vehicle (the vehicle) and a ground station. Presents a methodology for selecting the transmitting-receiving horn antennas, carried out energy calculation of microwave radio*

*links. Will sirovina the interference information of the microwave channel in the middle of the action to the fading signal for coherent reception. It is shown that in the conditions of fading of the microwave signal, the probability of error can reach at least  $10^{-6}$ ... $10^{-8}$  on the sign.*

Information ultra high frequency channel, the probability of error, coherent reception, horn antenna, signal fading.

**Введение.** В настоящее время во всех технологически развитых странах очень остро стоит вопрос, связанный с автоматизированным управлением движением различного рода транспортных средств (ТС), таких, например, как трамваев, троллейбусов, автобусов, электропоездов метрополитена и т.п.

Одним из важнейших звеньев в таких автоматизированных системах управления ТС является канал обмена информацией. Исследования показывают, что весьма эффективным является обмен информацией в определенных точках маршрута ТС (остановках, станциях и т.д.), для передачи текущей информации и корректировки программы движения, организуемых в сверхвысокочастотном диапазоне частот (СВЧ).

Использование СВЧ канала обладает целым рядом достоинств, как по помехозащищенности, так и по технической реализации. При этом расстояние между передающим и приемным устройством СВЧ, как правило, стремятся сделать минимальным от единиц до нескольких метров.

СВЧ канал предназначен, в основном, для передачи различной телемеханической информации. Самое удобное время для обмена информацией – время стоянки, но при необходимости можно осуществлять обмен оперативной информацией и при движении.

**Организация информационного СВЧ канала.** Информационный СВЧ канал, представляет собой СВЧ радиолинию ближнего действия, служащую для передачи дискретной информации (ПДИ) между ТС и наземным пунктом. Как правило, вероятность ошибочного приема  $P_0$  должна быть меньше или равна  $P_0 \leq 10^{-6}$  на десятичный знак. Объем информации, передаваемый за 10 секунд, может достигать десятков Мбит.

В комплекс аппаратуры ПДИ входят мобильные и стационарные комплекты устройств передачи, приема и обработки дискретных сигналов.

Аппаратура мобильного комплекта, устанавливаемая на ТС, состоит из приемной рупорной антенны (РА), приемника и передатчика, а так же блока питания. Приемник состоит из детекторной камеры волноводной конструкции (Д), усилителя-ограничителя (УО) и согласующего устройства (СУ) (см. рисунок 1).

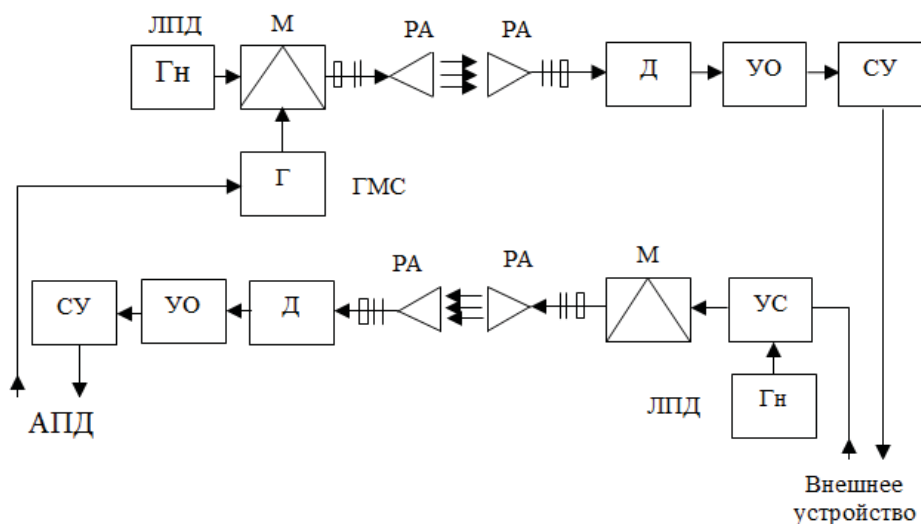


Рисунок 1 – Структурная схема мобильного комплекта

Передатчик включает в себя генератор модулирующего сигнала (ГМС), генератор несущей частоты (ГН), выполненный на твердотельном элементе лавинопролетном диоде (ЛПД) и рупорную передающую антенну (РА).

Информация с аппаратуры передачи данных (АПД) в виде двоичного  $n$ -разрядного кода модулирует в модуляторе (М) излучаемое СВЧ колебание. На приемной стороне колебание попадает в детекторную камеру. Там оно детектируется, усиливается в усилителе (УС) и затем попадает на аппаратуру воспроизведения (считывания).

Информация с ТС на наземный пункт передается аналогично.

Рассмотрим и проанализируем методику выбора параметров приемо-передающих рупорных антенн антенно-фидерного тракта.

**Антенно-фидерный тракт.** В качестве антенн в радиолинии СВЧ должны использоваться антенны с остронаправленной диаграммой направленности (ДН), например, пирамидальные рупорные антенны (см. рисунок 2).

Такие антенны выполняют роль согласующего устройства при переходе от волновода к окружающему пространству, и ограничивают в пространстве область, в пределах которой обеспечивается уверенная связь. Особенности распространения электромагнитных волн СВЧ диапазона только в области прямой видимости, делают каналы в радиолинии практически закрытыми от внешних излучений.

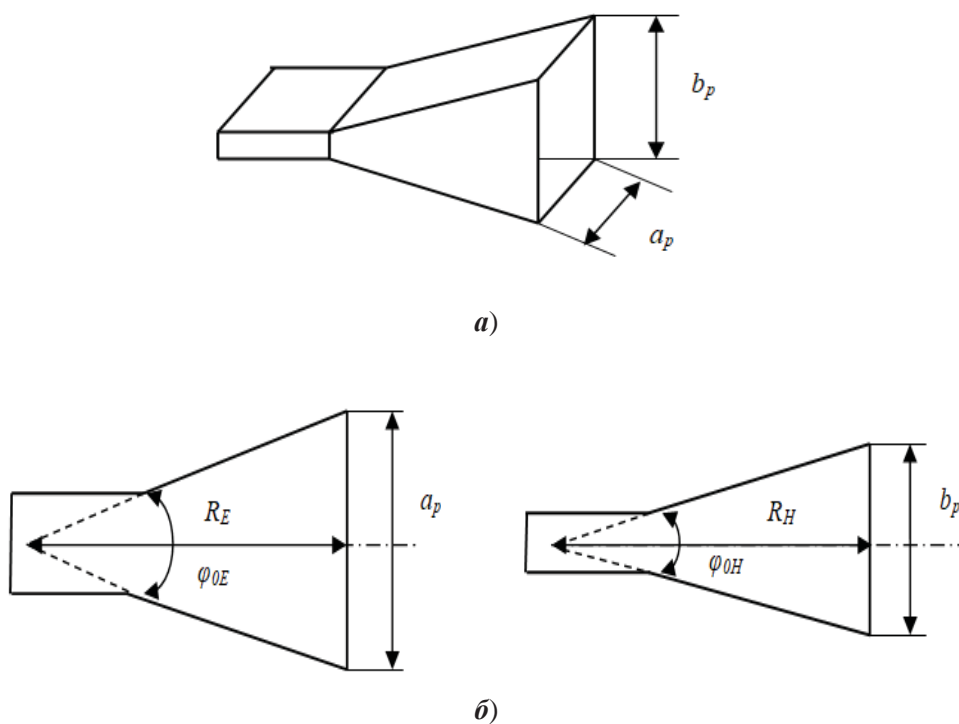


Рисунок 2 – Пирамидальная рупорная антенна: *a* – внешний вид; *б* – геометрические размеры

Методика выбора параметров приемопередающих рупорных антенн состоит в следующем.

1. Исходя из выбранного места расположения антенн наземного пункта, определяется расстояние  $R_0$  между антеннами стационарного комплекта и центром остановки ТС.

2. Затем выбирается значение продольных размеров области  $\pm \Delta R$  в пределах которой необходимо обеспечить уверенную связь. Обычно, в расчетах принимается  $\pm \Delta R = 5$  м. Учитывая постоянное место установки антенн ТС, размеры раскрыва антенн в плоскости  $H$  могут выбираться из конструктивных соображений.

3. Воспользовавшись зависимостями  $\alpha_H = f(R_0)$ ,  $\alpha_E = f(R_0)$  [3], определяющими дальность размещения антенн радиолиний с требуемой шириной диаграммы направленности, находим значения требуемой ширины ДН в плоскости  $E$  и  $H$  на уровне 0,707.

4. Используя графики  $a_p = f(\alpha_H)$ ,  $b_p = f(\alpha_E)$  [3], определяем значения параметров раскрыва антенн  $a_p$  и  $b_p$  обеспечивающие необходимую ширину диаграммы направленности.

5. Исходя из допустимых габаритов места установки приемопередающих антенн, выбираем значение длин рупора в плоскости  $E$  и  $H$  ( $R_E$  и  $R_H$ ), со-

ответственно. Как правило, в расчетах принимается  $R_E = R_H = 5\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны сигнала.

6. Воспользовавшись зависимостями  $D_E = f(b_p/\lambda)$ ,  $D_H = f(a_p/\lambda)$  [3], находим значения коэффициентов направленного действия антенны в плоскостях  $E$  и  $H$ , соответственно.

7. Вычисляем коэффициент усиления рупорной антенны, необходимый для проведения энергетического расчета,  $G = D\eta$ , где  $\eta$  – коэффициент полезного действия рупорной антенны;  $D$  – коэффициент направленного действия антенны, при расчетах можно воспользоваться упрощенной формулой  $D \cong 0,1D_E D_H$ .

**Энергетический расчет.** Энергетический расчет заключается в определении мощности сигнала в месте приема  $P_{пр}$  и расчета отношения

$$q^2 = E_c^2 / H_0^2,$$

где  $E_c$  – энергии сигнала;  $N_0$  – спектральная плотность мощности помехи.

Рассчитаем мощность сигнала на входе приемника при заданной выходной мощности передатчика по формуле [1]

$$P_{пр} = P_{пер} G_{пер} G_{пр} \eta_{пер} \eta_{пр} \frac{\lambda^2}{16\pi^2 R_0^2},$$

где  $P_{пер}$  – мощность передатчика, Вт;  $G_{пер}, G_{пр}$  – соответственно, коэффициент усиления по мощности передающей и приемной антенны;  $\eta_{пер}, \eta_{пр}$  – соответственно, коэффициент полезного действия антенно-фидерного тракта передающего и приемного устройства;  $R_0$  – расстояние между точками передачи и приема, м.

На рисунке 3 приведена зависимость  $P_{пр} = f(R_0)$  для случая, когда при остановке оси диаграмм направленности передающей и приемной антенн совпадают, при этом принималось:  $P_{пер} = 5 \times 10^{-3}$  Вт;  $\eta_{пер} = \eta_{пр} \approx 1$ ;  $\lambda = 3 \times 10^{-2}$  м.

Из представленных зависимостей видно, что с увеличением расстояния между приемником и передатчиком, мощность сигнала на входе приемника падает по экспоненциальному закону. Так, при  $R_0 = 10$  м величина мощности сигнала составляла  $17,5 \times 10^{-7}$  Вт. При  $R_0 = 50$  м она уменьшилась до  $0,7 \times 10^{-7}$  Вт.

На практике место остановки ТС случайно, и может быть ограничено лишь некоторой зоной  $\pm \Delta R = L$ . В результате может произойти, что оси диаграмм направленности передающей и приемной антенн не совпадут. В этом случае мощность сигнала на входе приемника может быть найдена, исходя из выражения

$$P_{пр} = \frac{K}{R_x^2} F(\alpha) F(\beta),$$

где  $K = P_{пер} G_{пер} G_{пр} \eta_{пер} \eta_{пр} \frac{\lambda^2}{16\pi^2}$ ;  $R_x = \sqrt{y_0^2 + (x_0 + x)^2}$ ;  $x_0, y_0$  – координаты точка установки передающей антенны, характеризующейся диаграммой на-

правленности  $F(\alpha)$ ;  $x$  – текущее местоположение антенны, установленное на ТС характеризующее диаграммой направленности  $F(\beta)$ .

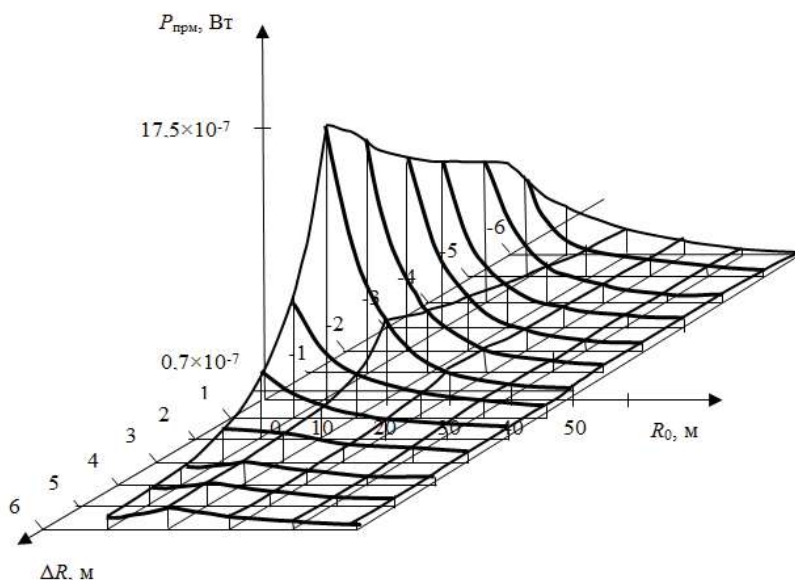


Рисунок 3 – Зависимость мощность сигнала на входе приемника от  $R_0$  и  $\Delta R$

Зависимость  $P_{\text{пр}} = f(R_0; \Delta R)$ , когда оси диаграмм направленности антенн не совпадают, представлены на рисунке 3.

**Помехоустойчивость дуплексного канала ближнего действия к замираниям сигнала при когерентном приеме.**

В результате интерференции прямого  $\dot{E}_{\text{пр}}$  и отраженного от подстилающей поверхности  $\dot{E}_{\text{отр}}$  электромагнитного поля, в апертуре приемной антенны возникают замирания сигнала, оказывающие определяющее воздействие на помехоустойчивость дуплексного канала, при его работе на малых расстояниях.

При одиночном приеме суммарное поле  $\dot{E}_{\Sigma}$  можно описать как:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{\Sigma} = \dot{E}_{\text{пр}} + \dot{E}_{\text{отр}} = & 0,5\sqrt{30P_1\eta_1G_1}F_{\text{пр}}(\alpha)\exp\left\{-i\frac{2\pi}{\lambda}r_1\right\}F_{\text{пр}}(\beta) + \\ & + \int_{D(x,y)} |\Phi(x,y)| \frac{\sqrt{30P_1\eta_1G_1}}{r_2} F_{\text{пр}}(\alpha + \Delta\alpha)F_{\text{пр}}(\beta + \Delta\beta) \\ & \times \exp\left\{-i\frac{2\pi}{\lambda}r_2 + i\beta_{\Phi}\right\} ds(x,y), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $P_1, \eta_1, G_1$  – соответственно, мощность излучения, КПД и коэффициент усиления антенно-фидерного тракта передающей антенны;  $F_{\text{пр}}(\alpha), F_{\text{пр}}(\beta)$  – соответственно, характеристики направленности передающей

и приемной антенны;  $\alpha$  – угол между направлением максимального излучения и направлением на центр приемной апертуры;  $\beta$  – угол между максимумом ДН приемной антенны и направленности на передающую антенну;  $|\Phi(x, y)|$  – модуль коэффициента отражения, учитывающий уменьшение амплитуды волны при отражении от подстилающей поверхности;  $\beta_\phi$  – фаза  $\Phi(x, y)$ , учитывающая ее изменение при отражении;  $C(x, y)$  – текущая точка, формирующая отраженную волну, находящаяся на подстилающей поверхности  $D(x, y)$ .

Углы  $\Delta\alpha, \Delta\beta$  и значения  $r_1 = AB$  и  $r_2 = AC + CB$  пояснены на рисунке 4.

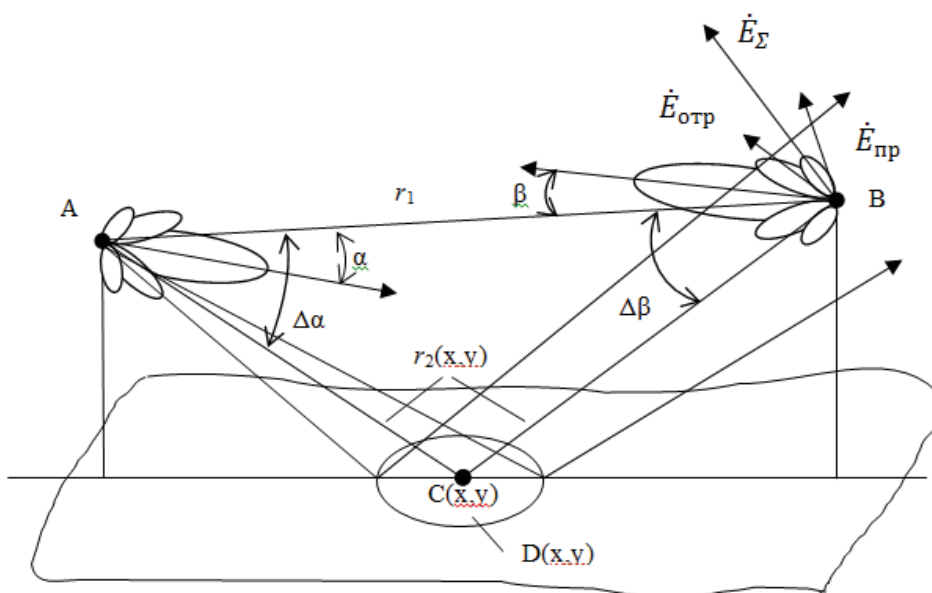


Рисунок 4 – Геометрическое пояснение процесса отражения от подстилающей поверхности

В амплитудных множителях можно приближенно считать, что  $r_1 \approx r_2 \approx r$ . В этом случае выражение (1) можно преобразовать к виду:

$$\dot{E}_\Sigma = \dot{E}_0 [F_{\text{пр}}(\alpha)F_{\text{пр}}(\beta) + J_1(\alpha, \Delta\alpha, \beta, \Delta\beta)] = \dot{E}_0 V,$$

где

$$J_1(\alpha, \Delta\alpha, \beta, \Delta\beta) = \int_{D(x,y)} F_{\text{пр}}(\alpha + \Delta\alpha(x, y))F_{\text{пр}}(\beta + \Delta\beta(x, y)) \times \\ \times |\Phi(x, y)| \exp\{i[k\Delta r(x, y) + \beta_\phi(x, y)]\} ds(x, y);$$

$\dot{E}_0 = \frac{1}{r} \sqrt{30P_1 \eta_1 G_1} \exp\left\{i \frac{2\pi}{\lambda} r_1\right\}$  – напряженность электромагнитного поля при распространении сигнала в свободном пространстве;  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;  $\Delta r(x, y)$  – расстояние до точки  $C(x, y)$ , формирующей отраженную волну, находящейся на подстилающей поверхности  $D(x, y)$ .



В [1] показано, что  $[F_{\text{пр}}(\alpha)F_{\text{пр}}(\beta) + J_1(\alpha, \Delta\alpha, \beta, \Delta\beta)]$ , есть не что иное, как множитель ослабления, характеризующий интерференцию прямой и отраженной волн.

Для практических приложений наибольший интерес представляет модуль множителя ослабления

$$|V| = \sqrt{F_{\text{пр}}(\alpha)F_{\text{пр}}(\beta) + \text{Re}J_1(\alpha, \Delta\alpha, \beta, \Delta\beta)^2 + \text{Im}J_1(\alpha, \Delta\alpha, \beta, \Delta\beta)^2}.$$

Воспользовавшись методом стационарной фазы, вычислим  $J_1(\cdot)$ . Для этого представим подстилающую поверхность  $D(x, y)$  как совокупность  $N$  участков, в пределах каждого из которых волна может считаться локально плоской.

Тогда

$$\begin{aligned} J_1(\alpha, \Delta\alpha, \beta, \Delta\beta) &= \sum_{i=1}^N \int_{D(x,y)} F_{\text{пр}}(\alpha + \Delta\alpha(x, y)) \times \\ &\times F_{\text{пр}}(\beta + \Delta\beta(x, y)) \times |\Phi(x, y)| \exp\{i[k\Delta r(x, y) + \beta_\phi(x, y)]\} = \\ &= \sum_{i=1}^N F_{\text{пр}}(\alpha + \Delta\alpha(x_i, y_i)) \times F_{\text{пр}}(\beta + \Delta\beta(x_i, y_i)) |\Phi(x_i, y_i)| \times \\ &\times \exp\{i[k\Delta r(x_i, y_i) + \beta_\phi(x_i, y_i)]\}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $(x_i, y_i)$  – координаты точки локального участка  $D_i(x, y)$  с стационарной фазой.

Если, размеры отраженной поверхности  $D(x, y) \ll r_1$  и  $r_2$ , а  $N = 1$ , то с учетом обозначений,  $|V|$  может быть преобразован к виду:

$$\begin{aligned} |V| &= (F^2(\alpha, \beta) + F(\alpha, \Delta\alpha, \beta, \Delta\beta)^2) |\Phi(x, y)| 2F(\alpha, \beta) \times \\ &\times F(\alpha, \Delta\alpha, \beta, \Delta\beta) |\Phi(x, y)| \cos\varphi. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь

$$F^2(\alpha, \beta) = F_{\text{пр}}(\alpha)F_{\text{пр}}(\beta);$$

$$F(\alpha, \Delta\alpha, \beta, \Delta\beta) = F_{\text{пр}}(\alpha + \Delta\alpha)F_{\text{пр}}(\beta + \Delta\beta);$$

$\varphi$  – фаза сигнала.

Рассмотрим помехоустойчивость дуплексного канала.

При использовании амплитудной модуляции и некогерентного приема, вероятность ошибки элемента передаваемого сигнала определяется соотношением [5]

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{2} \exp\left\{-\frac{q^2}{2} |V|^2\right\}, \quad (4)$$

где  $q^2 = P_c T / N_0^2$ ;  $P_c$  – мощность элемента сигнала длительностью  $T$ ;  $N_0^2$  – спектральная плотность белого нормального шума.

Заметим, что в данном случае величина  $q^2$  играет роль отношения сигнала к шуму (ОСШ).

Обозначив в (3)  $A_0 = F^2(\alpha, \beta)$ ;  $B_0 = F^2(\alpha, \Delta\alpha, \beta, \Delta\beta) |\Phi(x, y)|$  преобразуем (4) к виду

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{2} \exp\left\{-\frac{q^2}{2} (A_0^2 + B_0^2 + 2A_0B_0 \cos\varphi)\right\}.$$

Как правило, относительно распределения фаз делается предположение

$$\varphi \in W(\varphi) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi}; & \varphi \in [-\pi; \pi] \\ 0; & \varphi \notin [-\pi; \pi] \end{cases},$$

где  $W(\varphi)$  – плотность распределения вероятностей (ПРВ) фазы. С учетом сделанных предположений вероятность ошибки будет

$$P_{\text{ош}}\left(\frac{q}{A_0 B_0}\right) = \int_{-\pi}^{\pi} P_{\text{ош}}\left(\frac{q}{A_0 B_0, \varphi}\right) W(\varphi) = \\ = \frac{1}{4\pi} \exp\left\{-\frac{q^2}{2}(A_0^2 + B_0^2)\right\} I_0(A_0 B_0 q^2), \quad (5)$$

где  $I_0(\cdot)$  – функция Бесселя нулевого порядка.

Выражение (5) характеризует случайный характер огибающей сигнала отраженного от подстилающей поверхности.

Так как  $D(x, y)$  может рассматриваться как протяженная поверхность, то относительно ПРВ  $W(B_0)$  справедливы те же предположения, что и для протяженных целей.

Рассмотрим модели отражений:

– модель с доминирующей «блестящей» точкой

$$W(B_0) = \frac{B_0}{\sigma_B^2} \exp\left\{-\frac{B_0^2 + a_b^2}{2\sigma_B^2}\right\} I_0(B_0 a_b), \quad (6)$$

где  $\sigma_B^2$  – дисперсия флуктуирующего сигнала, отраженного от поверхности  $D(x, y)$ ;  $a_b$  – характеризует амплитуду сигнала отраженного от доминирующей блестящей точки.

– модель без доминирующей «блестящей» точки

$$W(B_0) = \frac{2m^m B_0^{2m-1}}{\Gamma(m)\sigma_B^{2m}} \exp\left\{-\frac{mB_0^2}{\sigma_B^2}\right\}, \quad (7)$$

где  $m$  – параметр распределения;  $\Gamma(\cdot)$  – гамма функция.

Заметим, что выражение (7) называется распределением Накагами.

При  $m = 1$ , оно (7) переходит в релейский закон, при  $m > 1$  – в обобщенное распределение Релея.

Рассмотрим эти случаи.

Произведя усреднение (5) по параметру  $B_0$  подчиняющемуся закону распределения (6), получим, что вероятность ошибки в этом случае будет определяться как:

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{4\pi\sigma_B^2} \exp\left\{-\frac{q^2 A_0^2}{2} - \frac{a_b^2}{2\sigma_B^2}\right\} \int_0^\infty B_0 \exp\left\{-B_0^2 \left(\frac{q^2}{2} - \frac{1}{2\sigma_B^2}\right)\right\} \times \\ \times I_0\left(\frac{B_0 a_b}{\sigma_B}\right) I_0(A_0 B_0 q) dB_0.$$

Воспользовавшись тем, что интеграл в правой части является табличным [2]

$$\int_0^\infty x \exp\{-\rho x^2\} I_\nu(\alpha, x) I_\nu(\beta, x) dx = \frac{1}{2\rho^2} \exp\left\{-\frac{\alpha^2 + \beta^2}{4\rho^2}\right\} I_\nu\left(\frac{\alpha\beta}{2\rho}\right).$$

Тогда для  $P_{\text{ош}}$  найдем

$$P_{\text{ош}} = \frac{\exp\{-Q\}}{2\pi\sigma_B^4} I_0\left(\frac{A_0 a_b}{\sigma_B^2 q}\right), \quad (8)$$

где

$$Q = \frac{(q^4 A_0^2 \sigma_B^4 + q^4 \sigma_B^2 a_b^2 + q^2 2A_0^2 \sigma_B^4 + 2a_b)}{2q^4 \sigma_B^4}.$$

Если  $(a_b^2 + A_0^2) \ll q$ , то выражение (8) упрощается  $\sigma_B^2 = 1$

$$P_{\text{ош}} = \frac{\exp\left\{-\frac{q^2 A_0^2 \sigma_B^2 + a_b^2}{2\sigma_B^2}\right\}}{2\pi\sigma_B^2 q^4} I_0\left(\frac{A_0 a_b}{\sigma_B^2 q}\right). \quad (9)$$

Зависимости  $P_{\text{ош}} = f(q^2)$ , при различных значениях величин  $A_0$ ,  $a_b$  и  $\sigma_B^2$ , представлены на рисунке 5.

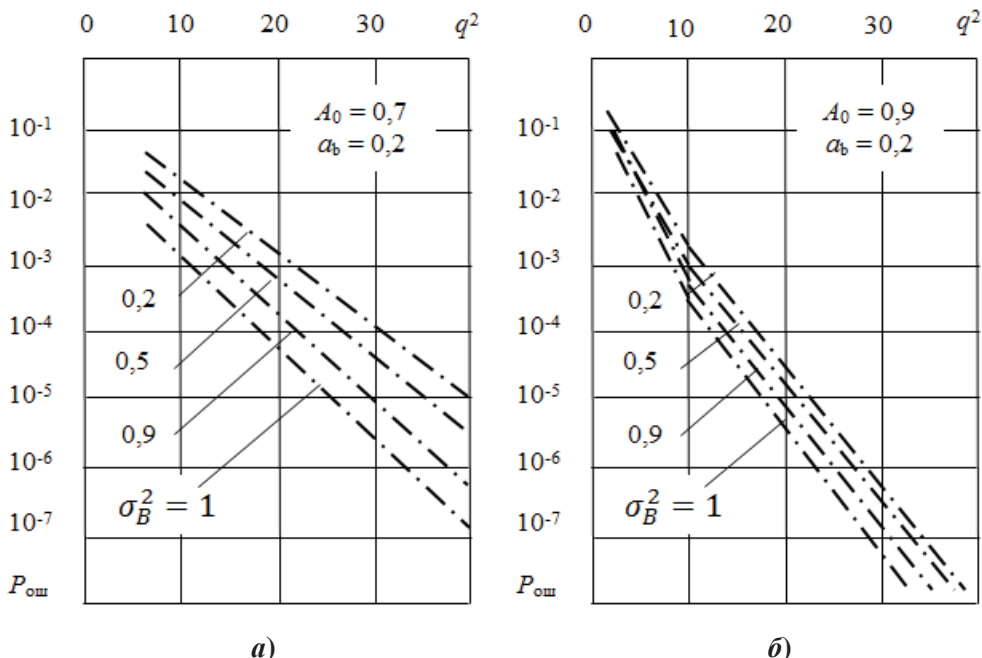


Рисунок 5 – Зависимость вероятности ошибки от величины ОСШ при различных значениях  $A_0$  равных: а – 0,7; б – 0,9

Перейдем к рассмотрению случая, когда  $W(B_0)$  описывается выражением (7)

$$P_{\text{ош}} = \frac{2m^m \exp\left\{-\frac{q^2 A_0^2}{2}\right\}}{4\pi\Gamma(m)\sigma_B^{2m}} \int_0^\infty B_0^{2m-1} \exp\{-B_0^2 \chi\} I_0(A_0 B_0 q) dB_0,$$

где  $\chi = \frac{q^2}{2} + \frac{m}{\sigma_B^2}$ .

Воспользовавшись соотношением [2]

$$\int_0^\infty x^\mu \exp\{-\alpha x^2\} I_\nu(\beta, x) dx = \frac{\beta^\nu \Gamma\left(\frac{1}{2}\nu + \frac{1}{2}\mu + \frac{1}{2}\right)}{2^{\nu+1} 2^{0,5(\mu+\nu+1)} \Gamma(\nu+1)} {}_1F_1\left(\frac{\nu+\mu+1}{2}; \nu+1; -\frac{\beta^2}{4\alpha}\right),$$

где  ${}_1F_1(\alpha, \beta, \gamma)$  – вырожденная гиперболическая функция.

Тогда окончательно найдем

$$P_{\text{ош}} = \frac{m^m \exp\left\{-\frac{q^2 A_0^2}{2}\right\}}{4\pi\sigma_B^{2m} \chi^m} {}_1F_1\left(m, 1, -\frac{A^2 q^4}{4\chi}\right). \quad (10)$$

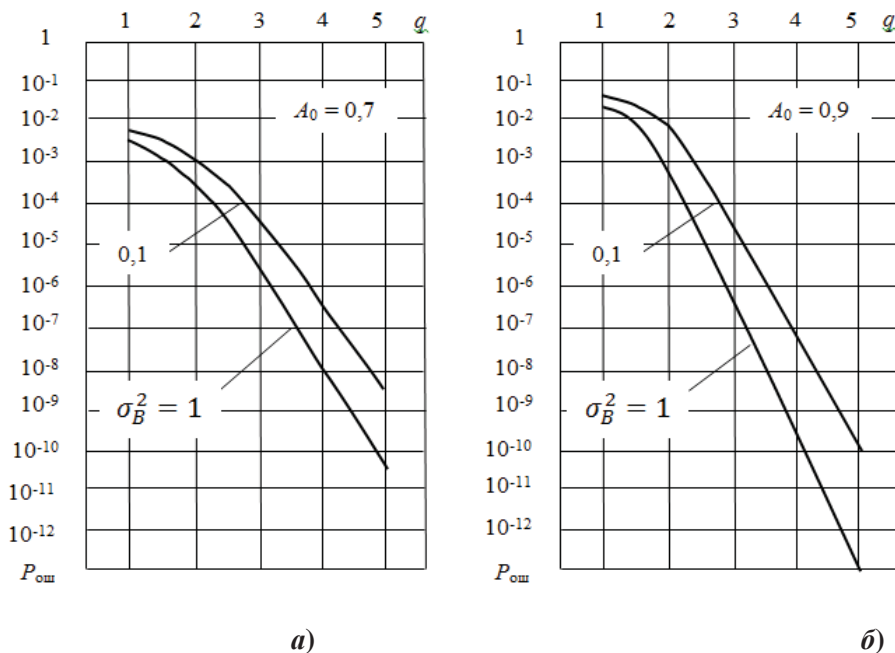
В случае, когда  $m = 1$ , то есть  $W(B_0)$  релеевоe распределение, справедливо равенство

$${}_1F_1\left(1, 1, -\frac{A^2 q^4}{4\alpha}\right) = \exp\left\{-\frac{A_0^2 q^4}{4\chi}\right\}.$$

Откуда

$$P_{\text{ош}} = \frac{\exp\left\{-\frac{q^2 A_0^2}{2}\left(1 + \frac{q^2}{2\chi}\right)\right\}}{4\pi\sigma_B^2\chi}. \quad (11)$$

Зависимости  $P_{\text{ош}} = f(q)$ , при различных значениях величин  $A_0$ , и  $\sigma_B^2$ , представлены на рисунке 6.



**Рисунок 6 – Зависимость вероятности ошибки от величины ОСШ при различных значениях  $\sigma_B^2$ , для случаев: а –  $A_0 = 0,7$ ; б –  $A_0 = 0,9$**

Таким образом, рассмотрена и проанализирована организация и работа дуплексной радиолинии СВЧ диапазона служащей для обмена информацией между транспортным средством и наземной станцией.

Проанализирована методика выбора параметров приемопередающих рупорных антенн, осуществлен энергетический расчет СВЧ радиолинии. Проанализирована помехоустойчивость дуплексного канала ближнего действия к замираниям сигнала при когерентном приеме.

Результаты моделирования помехоустойчивости показали, что вероятность ошибки, в условиях замирания СВЧ сигнала, может достигать менее  $10^6 \dots 10^8$  на знак.

*Литература*

1. Айзенберг Г.З. и др. Антенны УКВ. Под ред. Г.З. Айзенберга. В. 2 ч. // М.: Связь. 1977. 384 с.
2. Ван дер Варден Б.Л. Математическая статистика // М.: ИЛ. 1960. 360.
3. Сасонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ // М.: Высшая школа. 1988. 427 с.
4. Теоретические основы радиолокации / А.А. Коростелев, Н.Ф. Клюев, Ю.А. Мельник и др.; Под ред. В.Е. Дулевича // М.: Сов. радио. 1978 г. 608 с.
5. Тихонов В.И., Харисов В.И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем // М.: Радио и связь. 1991. 608 с.

УДК 621.391.01

**Анализ описания негауссовских случайных процессов, сигналов и помех с помощью кумулянтных функций**

**В.И. Воловач**, доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Информационный и электронный сервис»  
Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования,

Поволжский государственный университет сервиса, г. Тольятти,

**В.М. Артюшенко**, доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой информационные технологии и управляющие системы,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области  
«Технологический университет», г. Королев Московская область

*Рассмотрены и проанализированы вопросы, связанные с моментным и кумулянтным описанием негауссовских случайных процессов. Показано, что если негауссовские случайные процессы заданы как моментными так и кумулянтными функциями то считается, что такие процессы полностью заданы. Рассмотрены спектральные характеристики негауссовских случайных процессов. Показано, что высшие спектральные плотности существуют только для негауссовских случайных процессов.*

Плотность распределения вероятностей, негауссовские случайные процессы, метод кумулянтных функций, моменты распределения.

**Transformation of non-Gaussian random processes, signals and noise in thenonlinear differential systems by the method of cumulative functions**

**V.I. Volovach**, doctor of technical Sciences, associate Professor head of the Department «Information and electronic service»,  
State budgetary educational institution of higher education,  
Volga region state University of service, Tolyatti,

**V.M. Artyushenko**, doctor of Technical Sciences, Professor,  
State Educational Institution of Higher Education  
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

*Reviewed and analyzed the issues linked with the torque and naguszewski cumulant description of random processes. It is shown that if non-Gaussian random processes are given by both instantaneous and cumulative functions, it is assumed that such processes are fully specified. Spectral characteristics of non-Gaussian random processes are considered. It is shown that higher spectral densities exist only for non-Gaussian random processes.*

Probability density distribution, non-Gaussian random processes, the method of cumulative functions, moments of distribution.

**Введение.** Проведенные многочисленные исследования показывают, что наиболее полная информация о статистических случайных процессах имеющих как гауссовский, так и негауссовский характер содержится в многомерных плотностях распределения вероятностей (ПРВ) и функциях распределения [1, 2, 6]. Однако, для негауссовских процессов, за исключением отдельных случаев, например, при независимых процессах, марковских процессов, в явном виде информация о многомерных ПРВ отсутствует. Поэтому, в статистической радиотехнике для описания негауссовских процессов, сигналов и помех, широкое применение нашел метод моментов или кумулянтных функций.

Рассмотрим метод кумулянтных функций для оценки негауссовских случайных процессов с простейшего случая – рассмотрение негауссовских случайных величин. Так как этот случай имеет вспомогательный характер, дадим его в виде кратной сводки формул и выражений, необходимых для последующего изложения.

**Моментное и кумулянтное описание случайных величин.** Пусть случайная величина  $\xi$  задана одномерной ПРВ  $W_\xi(\xi)$ . В этом случае, начальные моменты распределения будут определяться интегралами

$$m_n^\xi = \langle \xi^n \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \xi^n W_\xi(\xi) d\xi, \quad n = 1, 2, \dots,$$

где  $\langle \cdot \rangle$  – знак усреднения по множеству;  $m_n$  – начальный момент  $n$ -го порядка.

Центральные моменты распределения будут определяться исходя из выражений

$$M_n^\xi = \langle \xi^{0n} \rangle = \langle (\xi - \langle \xi \rangle)^n \rangle,$$

где  $\xi^0$  – центрированная случайная величина.

Полагая  $m_0 = 1$ ,  $M_0 = 0$ , выразим взаимосвязь  $m_n$  и  $M_n$  с помощью выражений:

$$m_n = \sum_{\lambda=0}^n c_n^\lambda m_1^\lambda M_{n-\lambda}; \quad M_n = \sum_{\lambda=0}^n (-1)^\lambda c_n^\lambda m_1^\lambda m_{n-\lambda};$$

$$m_1^\xi = \langle \xi \rangle = m_\xi; \quad M_2^\xi = \langle (\xi - \langle \xi \rangle)^2 \rangle = \sigma_\xi^2.$$

Бесконечные последовательности  $\{m_n^\xi\}$  и  $\{M_n^\xi\}$  полностью характеризуют случайную величину  $\xi$ .

Иногда, в некоторых задачах статистической радиотехники, вместо ПРВ гораздо удобнее использовать характеристические функции  $\Theta_\xi(u)$ , представляющие собой преобразование Фурье от ПРВ.

Так, например, для одномерных ПРВ

$$\Theta_\xi(u) = \int_{-\infty}^{\infty} W_\xi(\xi) \exp\{ju\xi\} d\xi = \langle \exp\{ju\xi\} \rangle_\xi.$$

Соответственно, обратное преобразование от  $\Theta_\xi(u)$  к  $W_\xi(\xi)$  будет



$$W_{\xi}(\xi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Theta_{\xi}(u) \exp\{-ju\xi\} d\xi.$$

Начальные моменты и характеристические функции однозначно связаны:

$$m_n = j^{-n} \left[ \frac{d^n \Theta(u)}{du^n} \right]_{u=0}; \quad \Theta(u) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{m_n}{n!} (ju)^n.$$

В статистической радиотехнике, наряду с моментами, широкое распространение получили кумулянты (семиинварианты) ПРВ, связанные с характеристической функцией [4]

$$\kappa_k = j^{-k} \left[ \frac{d^k \ln \Theta(u)}{du^k} \right]_{u=0}.$$

Кумулянты и начальные моменты связаны соотношениями [4]

$$\begin{aligned} \kappa_1 &= m_1 = m; \\ \kappa_2 &= m_2 - m_1^2 = \sigma^2; \\ \kappa_3 &= m_3 - 3m_1m_2 + 3m_1^2; \\ \kappa_4 &= m_4 - 3m_2^2 - 4m_1m_3 + 12m_1^2m_2 - 6m_1^4. \end{aligned} \quad (1)$$

Начальные моменты, в свою очередь, связаны с кумулянтами, как

$$\begin{aligned} m_1 &= \kappa_1; \\ m_2 &= \kappa_2 + \kappa_1^2; \\ m_3 &= \kappa_3 + \kappa_1\kappa_2 + \kappa_1^3; \\ m_4 &= \kappa_4 + 3\kappa_2^2 + 4\kappa_1\kappa_3 + 6\kappa_1^2\kappa_2 + \kappa_1^4. \end{aligned} \quad (2)$$

Заметим, что в ряде случаев, кумулянтное описание ПРВ более предпочтительно, чем моментное. Связано это с тем, что во многих практических случаях, высшими кумулянтами, в отличие от моментов, можно пренебрегать.

Так, например, для гауссовских ПРВ

$$\begin{aligned} \kappa_1 &= m; \\ \kappa_2 &= \sigma^2; \\ \kappa_3 &= \kappa_4 = \dots = 0. \end{aligned}$$

В то же время как ни один из моментов не равен нулю.

Как известно, кумулянтные коэффициенты асимметрии  $\gamma_a = \frac{\kappa_3}{\kappa_2^{1.5}}$  и эксцесса  $\gamma_3 = \frac{\kappa_4}{\kappa_2^2}$  характеризуют степень отклонения ПРВ от гауссовской.

Характеристическая функция и многомерная ПРВ связаны между собой прямым и обратным преобразованиями Фурье

$$\begin{aligned} \Theta_{\xi}(u_1, \dots, u_n) &= \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \exp\{j(u_1\xi_1 + \dots + u_n\xi_n)\} d\xi \times \\ &\times W_n(\xi_1, \dots, \xi_n, t_1, \dots, t_n) d\xi_1, \dots, d\xi_n; \\ W_n(\xi_1, \dots, \xi_n, t_1, \dots, t_n) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \exp\{-j(u_1\xi_1 + \dots + u_n\xi_n)\} \times \\ &\times \Theta_{\xi}(u_1, \dots, u_n) du_1, \dots, du_n. \end{aligned}$$

Таким образом, моменты и кумулянты многомерного распределения могут быть введены соответствующим образом.

Так, моменты двумерного распределения запишутся как

$$\begin{aligned} m_{nm}^{\xi\eta} &= \langle \xi^n \eta^m \rangle = \langle \xi_1^n \xi_2^m \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \xi^n \eta^m W_{\xi_n}(\xi, \eta) d\xi d\eta; \\ M_{nm}^{\xi\eta} &= \langle \xi^{0n} \eta^{0m} \rangle = \langle (\xi - \langle \xi \rangle)^n (\eta - \langle \eta \rangle)^m \rangle = \end{aligned}$$

$$= \langle (\xi_1 - \langle \xi_1 \rangle)^n \rangle \langle (\xi_2 - \langle \xi_2 \rangle)^n \rangle.$$

Заметим, что порядком момента будет сумма  $n + m$ .

Аналогично могут быть введены кумулянты двумерного распределения:

$$\kappa_{nm} = (-j)^{n+m} \left[ \frac{\partial^{n+m} \ln \theta(u,v)}{\partial u^n \partial v^m} \right]_{u=v=0}.$$

Связь между двумерными моментами и кумулянтами определяется выражениями [4]

$$m_{11} = \kappa_{11} + \kappa_{10}\kappa_{01};$$

$$m_{21} = \kappa_{21} + \kappa_{20}\kappa_{01} + 2\kappa_{11}\kappa_{10} + \kappa_{10}^2\kappa_{01};$$

$$m_{31} = \kappa_{31} + 3\kappa_{20}\kappa_{11} + 3\kappa_{21}\kappa_{10} + \kappa_{30}\kappa_{01} + 3\kappa_{20}\kappa_{10}\kappa_{01} + 3\kappa_{11}\kappa_{10}^2 + \kappa_{10}^3\kappa_{01}.$$

Соответственно, для кумулянтов

$$\kappa_{11} = m_{11} - m_{10}m_{01};$$

$$\kappa_{21} = m_{21} - 2m_{10}m_{11} - m_{20}m_{01} + 2m_{10}^2m_{01};$$

$$\kappa_{31} = m_{31} - 3m_{10}m_{21} - m_{01}m_{30} - 3m_{20}m_{11} + 6m_{10}m_{01}m_{20} + 6m_{10}^2m_{11} - 6m_{10}^3m_{01}.$$

Из-за громоздкости математических выкладок при описании негауссовских процессов кумулянтами и моментами, а также кумулянтными и моментными функциями, в [4, 5] было предложено использовать ряд обозначений.

*Моментные скобки.* Это скобки статистического усреднения:

$$\langle \xi, \eta, \varepsilon, \dots, \omega \rangle = m_{111\dots 1}^{\xi\eta\varepsilon\dots\omega}.$$

*Кумулянтные скобки.* Это скобка с различными аргументами

$$\langle \xi, \eta, \varepsilon, \dots, \omega \rangle = \kappa_{111\dots 1}^{\xi\eta\varepsilon\dots\omega},$$

являющаяся тем совместным кумулянтом совокупности  $\{\xi, \eta, \varepsilon, \dots, \omega\}$ , в которую каждая случайная величина входит один раз.

Кумулянтные скобки связаны с моментными скобками аналогично связи кумулянтов и моментов:

$$\langle \xi\eta\varepsilon \rangle = \langle \xi, \eta, \xi \rangle + \langle \xi \rangle \langle \xi, \eta \rangle + \langle \eta \rangle \langle \xi, \xi \rangle + \langle \xi \rangle \langle \eta, \xi \rangle + \langle \xi \rangle \langle \eta \rangle \langle \xi \rangle.$$

*Скобка симметризации  $\{ \}_s$ .* Эта скобка вместе со стоящей передней цифрой представляет собой выражение, полностью симметричное относительно входящих в нее аргументов. Цифра указывает, сколько членов содержится в скобке, если ее полностью раскрыть. Например,

$$3\{\langle \xi \rangle \langle \eta, \xi \rangle\}_s = \langle \xi \rangle \langle \eta, \xi \rangle + \langle \eta \rangle \langle \xi, \xi \rangle + \langle \xi \rangle \langle \xi, \eta \rangle.$$

Зависимость кумулянтов случайной величины  $\eta = \eta(\xi)$  от кумулянтов входной переменной устанавливается системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial \kappa_1^\eta}{\partial \kappa_s^\xi} = \frac{1}{s!} \langle \frac{d^s}{d\xi^s} \eta \rangle;$$

$$\frac{\partial \kappa_2^\eta}{\partial \kappa_s^\xi} = \frac{1}{s!} \langle \frac{d^s}{d\xi^s} [\eta^2 - 2\langle \eta \rangle \eta] \rangle;$$

$$\frac{\partial \kappa_3^\eta}{\partial \kappa_s^\xi} = \frac{1}{s!} \left\langle \frac{d^s}{d\xi^s} [\eta^3 - 3\langle \eta \rangle \eta^2 + (6\langle \eta \rangle^2 - 3\langle \eta^2 \rangle) \eta] \right\rangle;$$

$$\frac{\partial \kappa_4^\eta}{\partial \kappa_s^\xi} = \frac{1}{s!} \left\langle \frac{d^s}{d\xi^s} [\eta^4 - 4\langle \eta \rangle \eta^3 + (12\langle \eta \rangle^2 - 6\langle \eta^2 \rangle) \eta^2 + [24\langle \eta \rangle \eta^2 - 4\langle \eta^3 \rangle - 24\langle \eta^3 \rangle] \eta] \right\rangle, s = 1, 2, 3, \dots,$$

которые показывают, что любой кумулянт зависит от всех кумулянтов входной ПРВ.

**Кумулянтные функции.** Для осуществления дальнейшего анализа, одномоментной ПРВ будем называть ПРВ  $W(\xi, t)$ , с помощью которой можно описать случайный процесс в момент времени  $t$ .

Для полного описания случайного процесса рассматривают  $N$ -моментные ПРВ  $W_\xi(\xi_1, t_1, \xi_2, t_2, \dots, \xi_N, t_N)$ ,  $N = 1, 2$ , которые представляют собой совместную ПРВ совокупности  $N$  случайных значений процесса  $\xi(t)$ , взятых в моменты времени  $t_i, i = \overline{1, N}$ .

Для  $N$ -моментной ПРВ случайного процесса  $\xi(t)$  определяется  $N$ -моментная характеристическая функция:

$$\Theta_\xi(u_1, t_1, \dots, u_N, t_N) = \langle \exp\{j[u_1 \xi_1 + u_2 \xi_2 + \dots + u_N \xi_N]\} \rangle =$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \exp\{j[u_1 \xi_1 + u_2 \xi_2 + \dots + u_N \xi_N]\} \times$$

$$\times W_\xi(\xi_1, t_1, \xi_2, t_2, \dots, \xi_N, t_N) d\xi_1, \dots, d\xi_N,$$

где  $\xi_i = \xi(t_i)$ .

Введем понятие моментной функции  $s$ -го порядка:

$$m_{k_1, k_2, \dots, k_n}^\xi(t_1, t_2, \dots, t_n) = (-j)^s \left[ \frac{\partial^s \Theta_\xi(u_1, t_1, \dots, u_N, t_N)}{\partial u_1^{k_1}, \dots, \partial u_n^{k_n}} \right]_{u_j=0, j=\overline{1, s}} =$$

$$= \langle \xi^{k_1}(t_1) \xi^{k_2}(t_2), \dots, \xi^{k_n}(t_n) \rangle = \int \dots \int \xi^{k_1}(t_1) \xi^{k_2}(t_2), \dots, \xi^{k_n}(t_n) \times$$

$$\times W_\xi(\xi_1, t_1, \dots, \xi_n, t_1, t_2, \dots, t_n) d\xi_1, \dots, dn,$$

и кумулянтной функции  $s$ -го порядка  $s = (k_1 + k_2 + \dots + k_n)$ :

$$\kappa_{k_1, k_2, \dots, k_n}^\xi(t_1, t_2, \dots, t_s) = (-j)^s \left[ \frac{\partial^s \ln \Theta_s(u_1, t_1, \dots, u_N, t_N)}{\partial u_1^{k_1}, \dots, \partial u_n^{k_n}} \right]_{u_j=0}.$$

Центральные моменты функции

$$M_{k_1, k_2, \dots, k_n}(t_1, t_2, \dots, t_n) = \langle [\xi(t_1) - m_1(t_1)]^{k_1}, \dots, [\xi(t_n) - m_1(t_n)]^{k_n} \rangle.$$

Если негауссовские случайные процессы заданы как моментными так и кумулянтными функциями то считается, что такие процессы полностью заданы.

Например, двумоментная ПРВ представляется кумулянтными функциями:

- 1-го порядка  $\kappa_1(t_1); \kappa_1(t_2);$
- 2-го порядка  $\kappa_2(t_1, t_1); \kappa_2(t_1, t_2); \kappa_2(t_2, t_2);$
- 3-го порядка  $\kappa_3(t_1, t_1, t_1); \kappa_3(t_1, t_1, t_2); \kappa_3(t_1, t_2, t_2); \kappa_3(t_2, t_2, t_2);$
- 4-го порядка  $\kappa_4(t_1, t_1, t_1, t_1); \kappa_4(t_1, t_1, t_1, t_2); \kappa_4(t_1, t_1, t_2, t_2);$   
 $\kappa_4(t_1, t_2, t_2, t_2); \kappa_4(t_2, t_2, t_2, t_2);$

.....

$s$ -го порядка  $\kappa_s(t_1^{(s)})$ ;  $\kappa_s = \kappa_s(t_1^{(s-i)}, t_2), \dots, \kappa_s(t_1, t_2^{(s-i)})$ ;  $\kappa_s(t_2^{(s)})$ .

Полный набор кумулянтных функций описывает все степени статистической связи значений случайного процесса  $\xi(t)$ , взятых в моменты  $t = t_1, t = t_2$ .

Одномоментная ПРВ  $W(\xi, t)$  полностью определяется кумулянтами  $\kappa_s(t)$ , и вся специфика случайного процесса заложена в характере зависимости кумулянтов от времени.

Соотношения, связывающие между собой моменты и кумулянтные функции, имеют вид:

$$\begin{aligned} \kappa_1(t) &= m_1(t); \\ \kappa_2(t_1, t_2) &= m_2(t_1, t_2) - m_1(t_1)m_1(t_2); \\ \kappa_3(t_1, t_2, t_3) &= m_3(t_1, t_2, t_3) - 3\{m_1(t_1)m_2(t_2, t_3)\}_s + \\ &+ 2m_1(t_1)m_1(t_2)m_1(t_3); \\ \kappa_4(t_1, t_2, t_3, t_4) &= m_4(t_1, t_2, t_3, t_4) - 3\{m_2(t_1, t_2)m_2(t_3, t_4)\}_s - \\ &- 4\{m_1(t_1)m_3(t_2, t_3, t_4)\}_s + 12\{m_1(t_1)m_1(t_2)m_2(t_3, t_4)\}_s - \\ &- 2m_1(t_1)m_1(t_2)m_1(t_3)m_1(t_4). \end{aligned}$$

Заметим, что здесь  $\{\}_s$  – скобки симметризации, которые раскрываются, например, следующим образом:

$$3\{m_1(t_1)m_2(t_2, t_3)\}_s \equiv m_1(t_1)m_2(t_2, t_3) + m_1(t_2)m_2(t_1, t_3) + m_1(t_3)m_2(t_1, t_2).$$

Соответственно, для моментов:

$$\begin{aligned} m_1(t_1) &= \kappa_1(t_1); \\ m_2(t_1, t_2) &= \kappa_2(t_1, t_2) + \kappa_1(t_1)\kappa_1(t_2); \\ m_3(t_1, t_2, t_3) &= \kappa_3(t_1, t_2, t_3) + 3\{\kappa_1(t_1)\kappa_2(t_2, t_3)\}_s + \\ &+ \kappa_1(t_1)\kappa_1(t_2)\kappa_1(t_3); \\ m_4(t_1, t_2, t_3, t_4) &= \kappa_4(t_1, t_2, t_3, t_4) + 3\{\kappa_2(t_1, t_2)\kappa_2(t_3, t_4)\}_s + \\ &+ 4\{\kappa_1(t_1)\kappa_3(t_2, t_3, t_4)\}_s + 6\{\kappa_1(t_1)\kappa_1(t_2)\kappa_2(t_3, t_4)\}_s + \\ &+ \kappa_1(t_1)\kappa_1(t_2)\kappa_1(t_3)\kappa_1(t_4). \end{aligned}$$

Заметим, что если в соотношениях для моментных и кумулянтных функций все моменты времени  $t_i$  равны, то эти формулы преобразуются в выражения для моментов (см. (1)) и кумулянтов (см. (2)).

Кумулянтные функции стационарного случайного процесса зависят лишь от разностей моментов времени  $\tau_k = t_k - t_1$ , так что

$$\kappa_s(t_1, t_2, \dots, t_s) = \kappa_s(0, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_s).$$

В частности, в кумулянтные функции двумоментной ПРВ стационарного случайного процесса входит только одна переменная  $\tau = t_2 - t_1$ , и кумулянтные функции имеют вид:

$$\begin{aligned} 1\text{-го порядка } \kappa_1(0) &= \kappa_1(\tau) = m = \text{const}; \\ 2\text{-го порядка } \kappa_2(0,0) &= \kappa_2(\tau, \tau) = \sigma_\xi^2 = \text{const}; \kappa_2(0, \tau); \\ 3\text{-го порядка } \kappa_3(0^{(3)}) &= \kappa_3(\tau^{(3)}) = \text{const}; \kappa_3(0,0, \tau); \kappa_3(0, \tau, \tau); \\ 4\text{-го порядка } \kappa_4(0^{(4)}) &= \kappa_4(\tau^{(4)}) = \text{const}; \kappa_4(0,0,0, \tau); \kappa_4(0,0, \tau, \tau); \\ \kappa_4(0, \tau, \tau, \tau). \end{aligned}$$

Соответственно, моменты двумоментного распределения  $m_{ij}(0, \tau)$

стационарного процесса будут иметь вид

$$\begin{aligned}
 m_{11}(0, \tau) &= M\xi(t)\xi(v) = \kappa_2(0, \tau) + m^2; \\
 m_{12}(0, \tau) &= M\xi(t)\xi^2(v) = \kappa_3(0, \tau, \tau) + m[\kappa_2(0,0) + 2\kappa_2(0, \tau)] + m^3; \\
 m_{13}(0, \tau) &= M\xi(t)\xi^3(v) = \kappa_4(0, \tau, \tau, \tau) + 3\kappa_2(0,0)\kappa_2(0, \tau) + \\
 &+ m[\kappa_3(0,0,0) + 3\kappa_3(0, \tau, \tau)] + 3m^2[\kappa_2(0,0) + \kappa_2(0, \tau)] + m^4; \\
 m_{22}(0, \tau) &= M\xi^2(t)\xi^2(v) = \kappa_4(0,0, \tau, \tau) + \kappa_2^2(0,0) + 2\kappa_2^2(0, \tau) + \\
 &+ 2m[\kappa_3(0, \tau, \tau) + \kappa_3(0,0, \tau)] + 2m^2[\kappa_2(0,0) + 2\kappa_2(0, \tau)] + m^4; \\
 m_{23}(0, \tau) &= M\xi^2(t)\xi^3(v) = \kappa_5(0,0, \tau, \tau, \tau) + [\kappa_2(0,0)\kappa_3(0,0,0) + \\
 &+ 2\kappa_2(0,0)\kappa_3(0,0, \tau) + \kappa_2(0,0)\kappa_3(0, \tau, \tau) + 6\kappa_2(0, \tau)\kappa_3(0, \tau, \tau)] + \\
 &+ m[3\kappa_4(0,0, \tau, \tau) + 2\kappa_4(0, \tau, \tau, \tau)] + m[3\kappa_2^2(0,0) + 6\kappa_2^2(0, \tau) + \\
 &6\kappa_2(0,0)\kappa_2(0, \tau) + \\
 &+ m^2[\kappa_3(0,0,0) + 3\kappa_3(0,0, \tau) + 6\kappa_3(0, \tau, \tau)] - m^3[4\kappa_2(0,0) + \\
 &6\kappa_2(0, \tau) + m^5.
 \end{aligned}$$

В статистической радиотехнике наиболее распространенной моделью принимаемого сигнала является аддитивная смесь полезного сигнала и шума (помехи):

$$y(t) = s(t) + n(t).$$

Рассмотрим случай, когда сигнал является детерминированной полностью известной функцией, а шум (помеха) – стационарным негауссовским случайным процессом с нулевым математическим ожиданием и кумулянтными функциями

$$\kappa_2(\tau_2); \kappa_3(0, \tau_2, \tau_3); \kappa_4(0, \tau_2, \tau_3, \tau_4).$$

Тогда, моментные функции шума (помехи) общего вида будут иметь вид:

$$\begin{aligned}
 m_{1n} &= Mn(t) = 0; \\
 m_{2n}(t_1, t_2) &= Mn(t_1)n(t_2) = \kappa_2(t_2 - t_1) = \kappa_2(\tau_2); \\
 m_{3n}(t_1, t_2, t_3) &= Mn(t_1)n(t_2)n(t_3) = \kappa_2(t_2 - t_1) = \kappa_3(0, \tau_2, \tau_3); \\
 m_{4n}(t_1, t_2, t_3, t_4) &= Mn(t_1)n(t_2)n(t_3)n(t_4) = \kappa_4(0, \tau_2, \tau_3, \tau_4) + \\
 &+ \kappa_2(\tau_2)\kappa_2(\tau_3) + \kappa_2(\tau_3)\kappa_2(\tau_4) + \kappa_2(\tau_4)\kappa_2(\tau_3).
 \end{aligned}$$

Моментные функции процесса  $y(t)$ , когда полезный сигнал  $s(t)$  является детерминированной функцией, будут равны:

$$\begin{aligned}
 m_{1y} &= My(t) = s(t); \\
 m_{2y}(t_1, t_2) &= My(t_1)y(t_2) = \kappa_2(\tau_2) + s(t_1)s(t_2); \\
 m_{3y}(t_1, t_2, t_3) &= My(t_1)y(t_2)y(t_3) = \kappa_3(0, \tau_2, \tau_3) + s(t_1)\kappa_2(\tau_3) + \\
 &+ s(t_2)\kappa_2(\tau_3) + s(t_3)\kappa_2(\tau_4) + s(t_1)s(t_2)s(t_3); \\
 m_{4y}(t_1, t_2, t_3, t_4) &= My(t_1)y(t_2)y(t_3)y(t_4) = \kappa_4(0, \tau_2, \tau_3, \tau_4) + \\
 &+ \kappa_2(\tau_2)\kappa_2(\tau_3) + \kappa_2(\tau_3)\kappa_2(\tau_4) + \kappa_2(\tau_4)\kappa_2(\tau_3) + \\
 &+ s(t_1)\kappa_3(0, \tau_2, \tau_3) + s(t_2)\kappa_3(0, \tau_3, \tau_4) + s(t_3)\kappa_3(0, \tau_2, \tau_4) + \\
 &+ s(t_4)\kappa_3(0, \tau_2, \tau_3) + s(t_1)s(t_2)\kappa_2(\tau_3) + s(t_1)s(t_3)\kappa_2(\tau_4) + \\
 &+ s(t_1)s(t_4)\kappa_2(\tau_2) + s(t_2)s(t_3)\kappa_2(\tau_4) + s(t_1)s(t_2)s(t_3)s(t_4).
 \end{aligned}$$

Моментные функции шума (помехи) двумоментного распределения запишутся как:

$$m_{2n}(t_1, t_2) = \kappa_2(t_2 - t_1) = \kappa_2(\tau);$$

$$m_{3n}(\tau) = My(t_1)y^2(t_2) = \kappa_3(0, \tau, \tau);$$

$$m_{4n}(\tau, \tau) = My^2(t_1)y^2(t_2) = \kappa_4(0, 0, \tau, \tau) + \kappa_2^2 + 2\kappa_2^2(\tau);$$

$$m_{4n}(\tau, \tau, \tau) = My(t_1)y^3(t_2) = \kappa_4(0, \tau, \tau, \tau) + 3\kappa_2(\tau)\kappa_2(\tau).$$

Моментные функции двумоментного распределения процесса  $y(t)$  при детерминированном сигнале  $s(t)$

$$m_{1y} = s(t);$$

$$m_{2y}(t, v) = \kappa_2(\tau) + s(t)s(v);$$

$$m_{3y}(t, v, v) = \kappa_3(0, \tau, \tau) + s(t)\kappa_2(\tau) + 2s(v)\kappa_2(\tau) + s(t)s^2(v);$$

$$m_{4y}(t, t, v, v) = \kappa_4(0, 0, \tau, \tau) + \kappa_2^2 + 2\kappa_2^2(\tau) + 2s(t)\kappa_3(0, \tau, \tau) + 2s(v)\kappa_3(0, 0, \tau) + s^2(t)\kappa_2 + 4s(t)s(v)\kappa_2(\tau) + s^2(v)\kappa_2 + s^2(t)s^2(v).$$

**Спектральные характеристики негауссовских случайных процессов.** Любой стационарный случайный процесс с непрерывным спектром может быть записан в виде интеграла Фурье – Стильтьеса [3]:

$$\xi(t) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(j\omega t) X(\omega, d\omega). \quad (3)$$

Соответственно, для процессов с дискретным спектром

$$\xi(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=-N}^N \exp(j\omega_i t) X(\omega_i).$$

Случайные бесконечно малые величины  $X(\omega, d\omega)$  называются спектральными мерами стационарного случайного процесса. С ними тесно связаны случайные гармонические колебания  $x(\omega, d\omega, t)$  многие статистические свойства которых оказываются более простыми, чем у исходного случайного процесса  $\xi(t)$ . Этим и объясняется внимание к спектральным методам анализа, особенно нелинейных инерционных систем.

В [7] установлено, что при весьма общих предположениях о  $\xi(t)$  ПРВ спектральной меры  $X(\omega, \Delta\omega)$  и колебания  $(\omega, \Delta\omega, t)$  при  $\Delta\omega \rightarrow 0$  подчиняется гауссовской ПРВ с параметрами  $m = 0$ ;  $\sigma^2 = M(\omega, \Delta\omega)$ , где  $M_2(\omega, \Delta\omega)$  – спектральный момент второго порядка (спектральная моментная функция)

В общем случае

$$M_{11\dots 1}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n, d\omega_1, d\omega_2, \dots, d\omega_n) = \langle X(\omega_1, d\omega_1) \dots X(\omega_n, d\omega_n) \rangle.$$

Спектральные меры  $X(\omega_i, d\omega_i), X(\omega_k, d\omega_k)$  гауссовского случайного стационарного процесса независимы, а любые спектральные моменты четвертого порядка выражаются через спектральные моменты второго порядка, то есть

$$M_{21}(\omega, d\omega) = (2l - 1)!! M_2^l(\omega, d\omega).$$

Отличие гауссовского процесса  $\xi(t)$  от негауссовского в том, что у первого спектральные меры  $X(\omega_1, d\omega)$  и  $X(\omega_2, d\omega)$  при  $\omega_1 + \omega_2 \neq 0$  являются независимыми величинами, а у второго – зависимыми, но некоррелированными.

Важно отметить, что и для гауссовского и для негауссовского случайного процесса спектральная мера имеет гауссовский закон распределения.

Таким образом, негауссовский случайный стационарный процесс, как

видно из выражения (3), можно представить в виде суммы зависимых случайных процессов с одномерными гауссовскими ПРВ.

Как известно, суммирование случайных величин приводит к ПРВ, в общем случае, отличающейся от гауссовского.

Спектральная плотность мощности  $s_\xi$  случайного стационарного процесса  $\xi(t)$  определяется через преобразование Фурье от корреляционной функции

$$B_\xi(\tau) = R_\xi(\tau) + m_\xi^2,$$

поэтому

$$s_\xi(\omega) = F\{B_\xi(\tau), -\omega\tau\} + m_\xi^2\delta(\omega) = \mathcal{K}_2^\xi(0, \omega + m_\xi^2\delta(\omega)),$$

где

$$F\{B_\xi(\tau), -\omega\tau\} = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} B_\xi(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\omega.$$

Первое слагаемое описывает спектр флуктуационной составляющей случайного процесса, второе – спектр постоянной составляющей.

Рассматривая  $(s-1)$ -мерную трансформацию Фурье от кумулянтной функции, можно получить спектральную плотность  $s$ -го порядка:

$$\hat{\mathcal{K}}_s = (0, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_s) = \frac{1}{(2\pi)^{s-1}} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{K}_s(0, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_s) \times \\ \times \exp\{-j[\omega_2\tau_2 + \omega_3\tau_3 + \dots + \omega_s\tau_s]\} d\tau_2 d\tau_3, \dots, d\tau_s = \\ = F^{s-1}\{\mathcal{K}_s(0, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_s); -\omega_2\tau_2 - \omega_3\tau_3 - \dots - \omega_s\tau_s\}.$$

Таким образом, заданному набору кумулянтных функций

$$\mathcal{K}_1; \mathcal{K}_2(0, \tau); \mathcal{K}_3(0, \tau_2, \tau_3), \dots, \mathcal{K}_s(0, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_s),$$

соответствует набор спектральных плотностей

$$\mathcal{K}_1^2\delta(\omega); \hat{\mathcal{K}}_2(0, \omega); \hat{\mathcal{K}}_3(0, \omega_2, \omega_3); \hat{\mathcal{K}}_s(0, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_s).$$

Так же как и кумулянты, они исчерпывающим образом описывают случайный стационарный негауссовский процесс.

Если процесс гауссовский, то все высшие спектральные плотности равны нулю и спектральная плотность  $\mathcal{K}_2(0, \omega)$  вместе с  $\mathcal{K}_1^2\delta(\omega)$  полностью описывают гауссовский процесс.

Высшие спектральные плотности существуют только для негауссовских случайных процессов.

Происхождение высокочастотных негауссовских процессов может быть самым разнообразным, например, в результате нелинейных, инерционных и безинерционных преобразований гауссовских процессов или в результате линейных преобразований негауссовского дельта-процесса и т.д. Получающиеся после преобразований кумулянтные функции высших порядков могут иметь различные выражения, а, следовательно, и спектры, соответствующие этим кумулянтным функциям, могут существенно различаться.

**Выводы.** Рассмотрены и проанализированы вопросы, связанные с анализом описания негауссовских случайных процессов, сигналов и помех, с помощью кумулянтных функций. Показано, что из-за громоздкости математических выкладок при описании негауссовских процессов кумулянтами и моментами, а также кумулянтными и моментными функциями, предложено



использовать ряд обозначений: моментные и кумулянтные скобки; скобки симметризации. Проанализированы кумулянтные функции. Показано, что если негауссовские случайные процессы заданы как моментными так и кумулянтными функциями то считается, что такие процессы полностью заданы. Рассмотрен случай, когда сигнал является детерминированной полностью известной функцией, а шум (помеха) – стационарным негауссовским случайным процессом с нулевым математическим ожиданием и известными кумулянтными функциями. Рассмотрены спектральные характеристики негауссовских случайных процессов. Показано, что негауссовский случайный стационарный процесс можно представить в виде суммы зависимых случайных процессов с одномерными гауссовскими распределениями. Показано, что спектральные плотности исчерпывающим образом описывают случайный стационарный негауссовский процесс, причем высшие спектральные плотности существуют только для негауссовских случайных процессов.

*Литература*

1. Кунченко Ю.П. Нелинейная оценка параметров негауссовских радиофизических сигналов // Киев: Вища школа. 1987. 191 с.
2. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники // М.: Сов. Радио. 1974. 552 с.
3. Леонов В.П., Ширяев А.Н. Некоторые вопросы спектральной теории старших моментов. Ч.2. // Теория вероятностей и ее применения. 1960. Т.5. Вып. 4. С.460-469.
4. Малахов А.Н. Кумулятивный анализ случайных негауссовских процессов и их преобразований // М.: Сов. Радио. 1978. 376 с.
5. Стратонович Р.Л. Избранные вопросы теории флуктуаций в радиотехнике // М.: Сов. радио. 1961. 560 с.
6. Тихонов В.И., Кульман Н.К. Нелинейная фильтрация и квазикогерентный прием сигналов // М.: Сов. радио. 1975. 704 с.
7. Ширяев А.Н. Некоторые вопросы спектральной теории старших моментов. Ч.1. // Теория вероятностей и ее применения. 1960. Т. 5. Вып. 3. С.293-313.

УДК 621.391

**Проектирование КИХ-фильтров в среде Matlab на базе  
русского микропроцессора «Спутник»**

**О.Н. Сальников**, инженер,  
**А.Д. Полубан**, инженер 2-ой категории,  
АО «Научно-производственное объединение измерительной техники»,  
г. Королёв, Московская область

*В статье рассматриваются вопросы проектирования цифровых фильтров с конечной импульсной характеристикой в базе отечественного микропроцессора. В данном исследовании рассматриваются основные методы моделирования фильтров с использованием программных средств пакета Matlab, без использования аппаратных средств проектирования и наладки электронных изделий. В работе рассматривается ориентация на отечественную промышленность создающую элементную базу для ракетно-космической промышленности, позволяющую избежать существенных рисков..*

КИХ-фильтр, моделирование, импортозамещение, обработка сигналов, телеметрия, космос, Matlab.

**Designing FIR filters in the Matlab environment based on the Russian  
microprocessor «Sputnik»**

**O.N. Salnikov**, engineer,  
**A.D. Poluban**, engineer of the 2nd category,  
JSC «Scientific and Production Association of Measuring Equipment»,  
Korolev, Moscow region

*The article deals with the design of digital filters with finite impulse response in the basis of the domestic microprocessor. In this research, the main methods of modeling filters using the software package Matlab, without the use of hardware design and setup of electronic products. The paper considers the orientation on domestic industry creating an element base for the rocket and space industry, which allows to avoid significant risks.*

FIR filter, simulation, import substitution, signal processing, telemetry, space, Matlab.

**Введение**

В связи с введенными санкциями, Россия проводит импортозамещение в различных отраслях производства, чтобы снизить процент зависимости от других стран и тем самым укрепить свое положение в мире. Российские раз-

работчики микроэлектронной техники рассчитывают выйти в ближайшее время на европейские рынки сбыта продукции для космоса. Специалисты из компании «Цифровые решения» приступили к испытаниям образцов современной радиационно-стойкой микроэлектроники для применения в изделиях для космического применения. По окончании этих работ станет возможно заменить на отечественную до 90% иностранной микроэлектроники, которая используется сейчас в космической и других стратегических отраслях экономики России [1].

Переход к производству нового поколения электронных компонентов в космической отрасли и ликвидация отставания от мирового уровня – задача, которая сейчас стоит перед Роскосмосом. Кроме того, власти России намерены снизить зависимость космической отрасли от импорта комплектующих, чтобы обезопасить аппаратуру от шпионских «закладок» и минимизировать риски ограничения поставок в случае международных осложнений. Полностью закрыть рынок для иностранных производителей космической аппаратуры в настоящее время вряд ли возможно: для выхода на новый технологический уровень России ещё требуется сотрудничество с западными компаниями [2].

Таким образом является процессор «Спутник» (микросхема 5023BC016) разработанный компанией «Ангстрем» совместно с НПП «Цифровые технологии».

## **Основные технические характеристики процессора**

### **Назначение и применение**

- Системы управления
- Обработка телеметрии и телекоманд в соответствии с требованиями ГОСТ Р 56096-2014, CCSDS-231.0-B-2 и CCSDS-131.0-B-2
- Преобразование интерфейсов
- Управление источниками питания
- Обработка информации датчиков и измерительных систем

### **Характеристики**

- 32-х разрядная RISC архитектура ARM Cortex-M0
- Максимальная тактовая частота до 80 МГц
- Встроенная память данных 128 кбайт с ECC (SEC-DED) и аппаратной функцией поиска и исправления ошибок (Scrubber)
- Контроллер прямого доступа к памяти
- Кэш 16 кбайт
- Энергопотребление от 9,6 до 38,5 мВт/МГц, в зависимости от режима работы
- Контроллер внешней статической памяти с ECC (SEC-DED)
- Максимальный объем внешней памяти 64 Мбайт (поддержка до 4-х chipselect)
- Сторожевой таймер watchdog, защищенный от сбоя
- Технология изготовления кристаллов: КМОП 180 нм объемный кремний

- Предельная накопленная доза 100 крад
- Пороговая ЛПЭ возникновения тиристорного эффекта  $96 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$

### Интерфейсы

- 4 контроллера последовательного интерфейса по ГОСТ Р 52070 - 2003 с резервированием
- 2 контроллера интерфейса SpaceWire со скоростью передачи данных до 100 Мбит/с
- Внутрикристалльная схема отладки с интерфейсом JTAG (IEEE 1149.1)
- Стандартная периферия: 6 x UART, 2 x CAN, 2 x SPI, I<sup>2</sup>C, 4 x Timer
- До 61 вывода портов общего назначения
- Набор аппаратных декодеров для приема телекоманд по стандарту CCSDS-231.0-B-2 (БЧХ (63,56), Витерби)
- Набор аппаратных кодеров для передачи телеметрии по стандарту CCSDS-131.0-B-2 (Рида-Соломона (255, 223), CCSDS-131.0-B-2 (Рида-Соломона (255, 223), (255, 239), турбо кодер со скоростью кодирования 1/2, 1/3, 1/4, 1/6, LDPC (8160,7136), сверточный 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 или 7/8) [3].

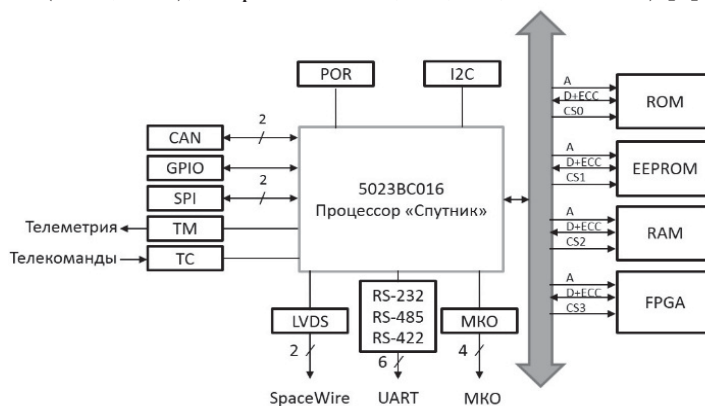


Рисунок 1 – Типовая схема включения ИМС «Спутник»

### Теоретическая часть

Наличие в данной ИМС интерфейса I<sup>2</sup>C позволяет подключить до 127 аналого-цифровых преобразователей (АЦП), что в свою очередь позволяет осуществить получение и обработку сигналов от различных датчиков.

Как известно реальные АЦП во многом отличаются от идеальных. Шум, приведенный ко входу, представляет собой, отклонение от идеала. Его влияние на передаточную функцию АЦП показано на рисунке 2. По мере увеличения аналогового входного напряжения «идеальный» АЦП (показанный на рисунке 2а) поддерживает на выходе постоянный код до тех пор, пока не будет достигнута область перехода. В этой точке выходной код скачкообразно переходит к следующему значению и сохраняется до тех пор, пока не будет достигнута следующая область перехода. Теоретически идеальный АЦП имеет нулевой шум перехода кода, и ширина переходной области равна нулю. У реального АЦП имеется определенная величина шума

перехода кода и, следовательно, конечная ширина области перехода. На рисунке 2б показан реальный АЦП: здесь ширина шума перехода кода от пика до пика приблизительно равна единице младшего значащего разряда (LSB) [4].

Шум АЦП оценивается на основе линейной модели. При округлении данных оценки входного шума АЦП  $e_{Aвх}(n)$  в любой момент времени  $n$  совпадают с оценками ошибки квантования [5].

$$\max_n |e_{Aвх}(n)| = \frac{Q_A}{2} \quad (1)$$

$$\mu_{e_{Aвх}} = 0 \quad (2)$$

$$\delta_{e_{Aвх}}^2 = \frac{Q_A^2}{12} \quad (3)$$

$$P_{e_{Aвх}} \approx -(6,02b_A + 10,79)(\text{дБ}) \quad (4)$$

где  $Q_A = 2^{-b_A}$  – шаг квантования,  $b_A$  – число значащих битов АЦП.

Выходной шум АЦП  $e_{Aвых}(n)$  определяется по формуле свёртки

$$e_{Aвых}(n) = \sum_{m=0}^{\infty} h(m)e_{Aвх}(n-m),$$

где  $h(n)$  – импульсная характеристика линейной дискретной системы.

КИХ-фильтры характеризуются следующими особенностями:

- возможность обеспечить строго линейную фазо-частотную характеристику;

- устойчивостью по определению.

Линейная фазо-частотная характеристика обеспечивается в том случае, если для его импульсной характеристики  $h(n)$  выполняется одно из двух условий:

- симметрии

$$h(n) = h(N-1-n);$$

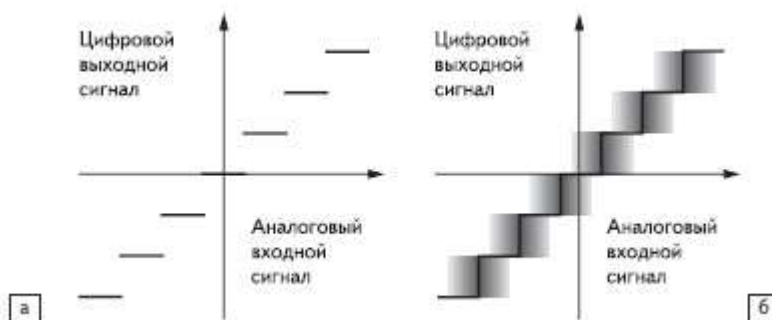
- антисимметрии

$$h(n) = -h(N-1-n),$$

где ось симметрии/антисимметрии импульсной характеристики  $h(n)$  проходит через точку  $n = R/2$ .

Одной из распространённых операций цифровой обработки сигналов является фильтрация сигналов, для реализации которой могут быть использованы программно-аппаратные ресурсы микропроцессоров; ПЛИС по архитектуре FPGA (программируемые пользователем вентиляльные матрицы); различные операционные устройства: регистры, умножители,

сумматоры; программная реализация с использованием различных языков программирования высокого уровня.



**Рисунок 2 – Шум перехода кода (шум, приведённый к входу) и его влияние на передаточную функцию АЦП: а) идеальный АЦП; б) реальный АЦП**

Цифровой фильтр представляет собой линейную дискретную систему, выполняющую преобразование входной последовательности в выходную по алгоритму, описываемому разностным уравнением, который отображается заданной структурой цифрового фильтра, реализованной программно или аппаратно.

Вид импульсной характеристики цифрового фильтра определяет их деление на фильтры с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтры) и фильтры с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтры). Широкое применение цифровых КИХ-фильтров вызвано тем, что свойства их хорошо исследованы. Использование особенностей архитектуры программируемых логических интегральных схем FPGA позволяет проектировать компактные и быстрые КИХ-фильтры с использованием распределённой арифметики [6].

КИХ-фильтр описывается передаточной функцией:

$$H(z) = \sum_{i=0}^{N-1} b_i z^{-i} = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) z^{-n} \quad (5)$$

Длиной и порядком КИХ-фильтра называют соответственно число коэффициентов  $N$  и порядок  $R$  передаточной функции (5), равный  $R = N - 1$ .

Для расчёта КИХ-фильтра воспользуемся пакетом программ Matlab/Simulink, данное программное обеспечение позволяет моделировать динамические системы и процессы происходящие в них, визуализировать полученные результаты, проводить их анализ. Среда Fdatool входящая в пакет Matlab представляет графический интерфейс для расчета параметров фильтров и просмотра их характеристик. При проектировании КИХ-фильтра в среде Fdatool будем использовать метод: Equiripple – синтез фильтров с равно-

мерными пульсациями АЧХ методом Ремеза.

### Экспериментальная часть

Для расчёта КИХ-фильтра используем следующие данные:

Response Type: Lowpass

Design Method: FIR – Equiripple

Filter Order: Minimum Order

Frequency Specifications: Units – Hz,

Fs – 8000, Fpass – 1000, Fstop – 1500

Magnitude Specifications: Units – dB,

Apass – 0.4455, Astop – 40.

После задания параметров КИХ-фильтра, нажимаем кнопку Design Filter. Сохранить полученный график можно используя инструмент Filter Visualization Tool.

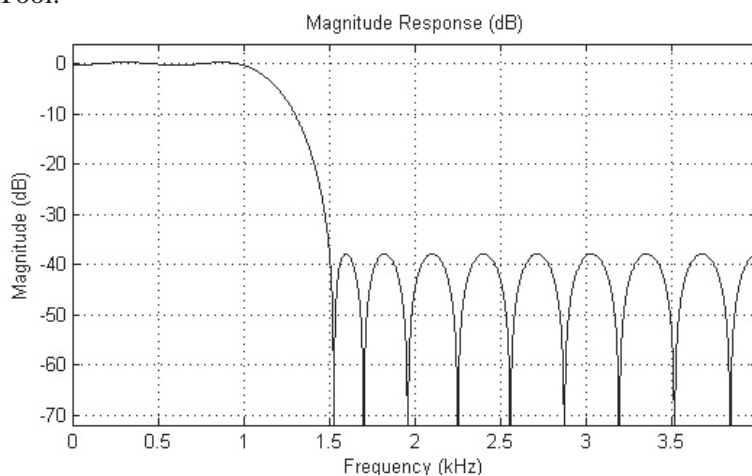


Рисунок 3 – АЧХ разработанного КИХ-фильтра

Для дальнейшего анализа, полученного КИХ-фильтра импортируем фильтр в рабочую область Matlab в виде блока с именем Filter\_Fir\_Fix, для этого в нижнем левом углу нажимаем пиктограмму Realize Model указываем параметры экспорта и нажимаем кнопку Realize Model. Затем создаём S-модель, в качестве входных данных используем блок Band-Limited White Noise который моделирует белый шум в канале данных, со следующими параметрами:

Noise power: [0.1]

Sample time: 0.1

Seed: [23341]

Построенная S-модель показана на рисунке 4. Результат работы фильтра продемонстрирован на рисунке 5б, исходный сигнал без фильтра на рисунке 5а.



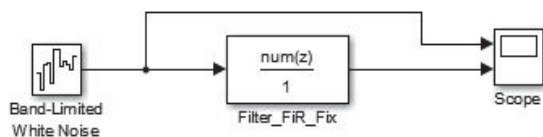


Рисунок 4 – S-модель системы с КИХ-фильтром

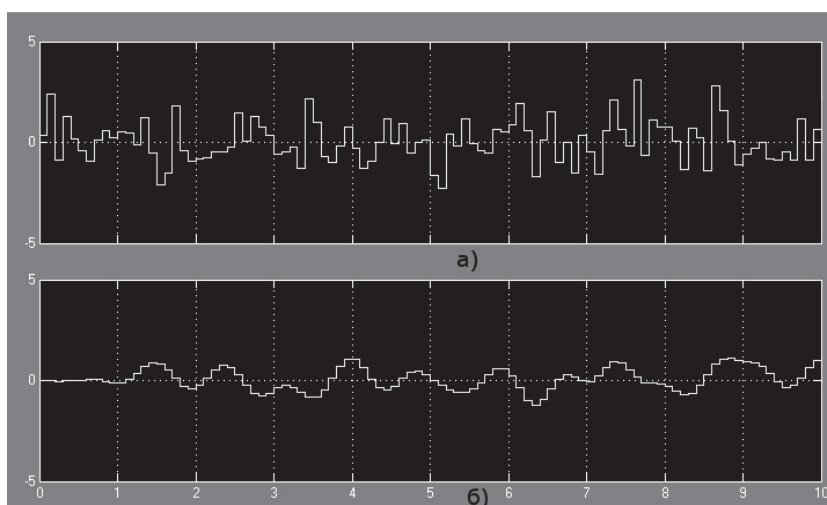


Рисунок 5 – а) исходный сигнал; б) отфильтрованный сигнал

Пакет Matlab позволяет формировать описание цифрового фильтра на языке описания аппаратуры (VHDL), используемое для размещения и трассировки цифрового фильтра в ПЛИС. Для выполнения этой операции необходимо вызвать диалоговое окно Generate HDL (рисунок 6), из меню FDATool Targets – Generate HDL.

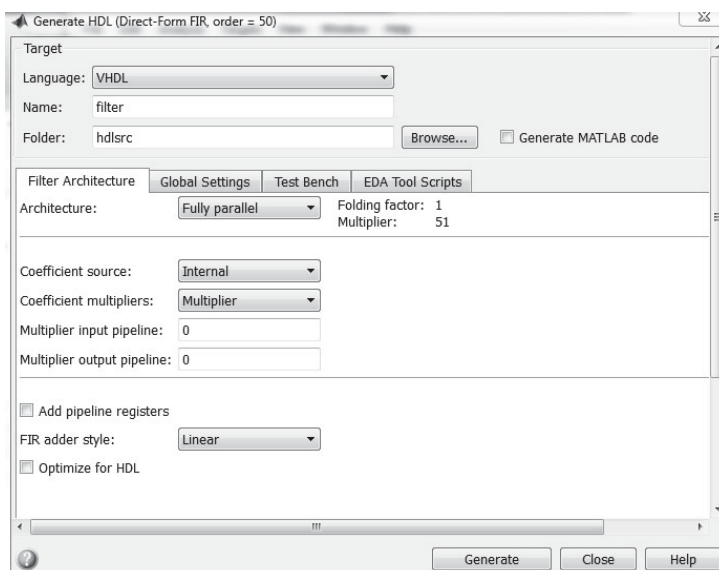


Рисунок 6 – Диалоговое окно Generate HDL

### Вывод

Развитие современной отечественной архитектуры и элементной базы ПЛИС оказало в последнее время существенное влияние не только на практическую сторону проектирования систем цифровой обработки сигналов, но и позволило аппаратно реализовать такие алгоритмы, которые ранее не имели практической значимости ввиду крайне низкой производительности использования стандартных вычислительных средств.

Использование пакета Signal Processing( среда FDATool) системы Matlab/Simulink позволяет осуществлять проектирование цифровых фильтров на основе универсальных и специализируемых процессоров цифровой обработки сигналов с использованием арифметики с фиксированной и плавающей точкой. Основными этапами проектирования является выбор спецификации фильтра, расчет коэффициентов, архитектурная реализация, анализ ошибок (шум округления при квантовании результатов арифметических операций, ошибки квантования коэффициентов и влияние длины входного слова – эффекты конечной разрядности) и реализация в аппаратной и/или программной форме.

В статье рассмотрены этапы моделирования цифровых КИХ-фильтров на ПЛИС «Спутник» Российского производства. На основании полученных результатов в ходе моделирования КИХ-фильтра можно сделать вывод о повышении качества сигнала на выходе аналого-цифрового устройства, путём сглаживания его АЧХ-характеристик.

### Литература

1. Игнатова К.И., Грачева А.С. Импортзамещение в космосе // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. № 12. С.338-340.

2. Анфимова Мария Лаура Игоревна Об импортозамещении в ракетно-космической промышленности // Бизнес в законе. 2014. № 2. С.36-37.
3. Микросхема интегральная 5023BC016. Техническое описание. Версия 2.04 от 01.09.2017 // [Электронный ресурс]. URL: [http://dsol.ru/projects/plis\\_n\\_sbis/sputnik/](http://dsol.ru/projects/plis_n_sbis/sputnik/) (дата обращения 25.12.2017).
4. Трошкова Елена, Кестер Уолт Входной шум АЦП: хороший, плохой и опасный. Хорошо ли, когда его нет? // Компоненты и Технологии. 2008. № 86. С.42-46.
5. Солонина А.И. Цифровая обработка сигналов в зеркале Matlab: учеб.пособие / А.И. Солонина // СПб.: БХВ-Петербург. 2018. 560 с.
6. Строгонов А.В., Борисов Д.А. Проектирование КИХ-фильтров в базисе плис фирмы Altera // Вестник ВГТУ. 2009. № 6. С.86-89.

УДК 620.92

**Алгоритм выявления предпочтений оператора, управляющего  
робототехнической системой в игровой среде**

**В.Я. Вилисов**, д.э.н., к.т.н., профессор кафедры  
«Математики и естественнонаучных дисциплин»,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области  
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

*Предложен подход и один из алгоритмов обучения робототехнической системы (РТС), действующей в условиях противодействия, целесообразному (оптимальному) поведению. Подход основан на аппроксимации игровой моделью предпочтений лица, принимающего решения (ЛПР), в интересах которого действует РТС. Итерационная настройка параметров модели выполняется на основе данных о решениях, принимаемых ЛПР, полученных в процессе нормального функционирования РТС под управлением оператора (ЛПР), либо по результатам тестирования. На имитационном модельном примере продемонстрирована успешная адаптация игровой модели, подтверждавшая работоспособность алгоритма и эффективность подхода.*

Робототехническая система, антагонистическая матричная игра, модель, обратная задача, оценивание.

**Algorithm of detection of preferences of the operator, governing  
the robotechnical system in the game environment**

**V.Ya. Vilisov**, D.Sc., Ph.D. Professor of the Department  
«Mathematics and Natural Sciences»,  
Institution of Higher Academic Education of Moscow Region  
«University of Technology», Korolev, Moscow Region

*The article proposes an approach and one of the algorithms for training a robotic technical system (RTS) operating under counteraction conditions, expedient (optimal) behavior. The approach is based on the approximation by the game model of the preferences of the person making the decision (PMD), in whose interests the RTS operates. Iterative adjustment of the model parameters is performed on the basis of data on decisions made by PMD received during the normal operation of the RTS under the control of the operator (PMD) or by the results of testing. On the simulation model example, the successful adaptation of the game model, which confirmed the efficiency of the algorithm and the effectiveness of the approach, was demonstrated.*

Robotic technical system, antagonistic matrix game, model, inverse problem, estimation.

### **Введение**

Большую группу прикладных отраслей, где существует острая потребность в использовании максимально автономных РТС, составляют сферы с экстремальными условиями [7, 9, 11, 12]. Их можно разделить на две группы:

1. среды с большим риском для персонала – пожаро-, химически- и радиационноопасные. Здесь среда пассивно агрессивна, она не противодействует преднамеренно. Ее особенность заключается в наличии высокого уровня опасности для персонала и потенциального ущерба;

2. среды с активным противодействием противоборствующих сторон – военные, игровые и т.п. Эта группа сред преднамеренно действует во вред оперирующей стороне. Уровень потенциального ущерба здесь, как правило, также высок.

Управление системами в средах первого типа осуществляется на основе методов *принятия решений в условиях риска и неопределенности* [6, 10], в средах второго типа используют *игровые модели* [5, 10]. В данной работе рассмотрена вторая группа ситуаций, которые могут быть описаны антагонистическими матричными играми (АМИ) с нулевой суммой.

Применение тех или иных моделей в практике проектирования систем или управления ими основано на выборе типа (структуры) и параметров моделей, в максимальной степени адекватных объекту. Для обеспечения адекватности моделей в подавляющем большинстве случаев используется нормативный подход [5, 6, 10], при котором структура и параметры моделей выбираются и обосновываются априори, на стадии их разработки и начальной настройки. При этом обоснование правильности обычно выполняется на основе логических построений.

Предлагаемый в данной работе подход к обеспечению адекватности модели основан на принципах адаптации структуры и параметров модели к целевым предпочтениям ЛПР, в интересах которого функционирует РТС. Предполагается, что модель может настраиваться в процессе функционирования системы в соответствии с изменяющимися предпочтениями ЛПР, которые, в свою очередь, могут быть следствием изменяющихся условий среды и/или концепции применения системы. Адаптивный подход позволяет обеспечить высокий уровень эффективности, живучести и автономности РТС для широкого круга прикладных задач [1].

### **Игровые ситуации и модели в управлении РТС**

Как отмечается в ряде работ [2, 3, 7, 12], управление РТС значительно осложняется в условиях организованного (активного) противодействия. Примерами таких задач могут быть, например, игра роботов в футбол или ведение группами роботов боевых действий [2, 12]. Далее будем иметь в виду второй тип задач.

В качестве модельного примера, иллюстрирующего предлагаемый подход, рассмотрим модель взаимодействия обороняемых наземных целей с атакующими их летательными аппаратами. Исходные данные приведены ниже в разделе *Модельный пример*.

Существует достаточно много сценариев применения групп роботов в боевых условиях. Группы могут быть, например, гетерогенными, состоящими из различных типов боевых и обеспечивающих роботов. Тогда чистыми стратегиями их применения могут быть, например, различные конфигурации функциональных подгрупп, последовательности их действий, вариантов целевого распределения и т.п. Группы могут быть и гомогенными, тогда чистые стратегии могут формироваться как варианты реакции роя роботов на те или иные состояния среды.

В качестве чистых стратегий могут рассматриваться не только элементарные варианты (например, количество выделяемых средств того или иного типа), но и сценарии поведения, что может существенно снизить размерности векторов стратегий игроков.

В ряде работ [2, 3, 7, 12] отмечается, что в настоящее время большое количество ответственных операций все еще выполняется оператором, управляющим РТС в удаленном режиме. Следует отметить, что наличие ЛПП в контуре оперативного управления РТС создает дополнительные проблемы (защищенные каналы связи, скрытность, и т.п.) и приводит к снижению эффективности операций, проводимых с участием РТС. Поэтому в настоящее время очень актуальной является проблема повышения эффективной автономности РТС.

Для прикладного использования любых моделей требуется знание структуры и параметров целевого функционала. В игровых моделях в этой роли выступает платежная матрица (ПМ). В реальных приложениях игровая задача многокритериальна, поэтому платежная матрица должна отражать разнообразие показатели. Однако в классической АМИ платежи предполагаются скалярными. Поэтому, для обеспечения максимальной адекватности АМИ, ПМ должна быть интегральной сверткой множества целевых показателей. Для реальной игровой ситуации задать многокритериальную ПМ нормативным способом представляется маловероятным. Этим и обусловлена *априорная неопределенность* [1] при использовании АМИ на практике.

Кроме априорной имеет место еще *текущая неопределенность*, обусловленная нестационарностью целевых предпочтений ЛПП, возможно, вызванной изменениями в среде. Возникающая текущая неопределенность, для поддержания адекватности АМИ, должна инициировать подстройку параметров платежной матрицы игры.

Оба эти вида неопределенности в неадаптивных системах управления приводят к снижению эффективности РТС. Снять неопределенности позволяет адаптивный подход, применяемый в данной работе для управления РТС в игровых ситуациях и средах.

Параметрами АМИ размерности  $m \times n$  являются элементы ПМ  $A = \|a_{ij}\|_{mn}$ , где  $a_{ij}$  отражают выигрыш оперирующей стороны (ЛПР, т.е. первого игрока – И1) и одновременно проигрыш второго игрока (И2). Задачу поиска решения АМИ при известной ПМ будем называть прямой АМИ (ПАМИ), а восстановление платежной матрицы по наблюдениям - обратной АМИ (ОАМИ).

Решение ПАМИ представляется в виде пары оптимальных смешанных стратегий соответственно для И1 и И2:  $\bar{p} = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_m]^T$ ,  $\bar{q} = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T$ , и цены игры  $V = \bar{p}^T A \bar{q}$ , где  $T$  - символ транспонирования. Для компонентов векторов  $\bar{p}$  и  $\bar{q}$  должно выполняться условие нормировки:  $\sum_{i=1}^m p_i = 1$ ;  $\sum_{j=1}^n q_j = 1$ . Решение ПАМИ может быть полученное одним из известных способов, например, сведением игры к задаче линейного программирования или итерационным методом Брауна-Робинсон.

### Решение обратной игровой задачи

Рассмотрим, какие данные входят в состав наблюдений и что необходимо найти в результате решения обратной АМИ. Обратная задача в практике управления не подменяет ПАМИ, а дополняет ее [1], т.к. назначение ОАМИ – аккумулировать положительный опыт принятия решений в виде оценок элементов ПМ  $A$ . Затем в новых аналогичных ситуациях с помощью оценок элементов ПМ следует отыскивать тройку  $(\bar{p}, \bar{q}, V)$  одним из методов решения ПАМИ. При решении ОАМИ предполагается, что смешанные стратегии игроков и платеж измеримы. При этом выигрыш рассматривается как усредненная по совокупности ходов реакция игровой среды. Таким образом, многократно повторяемых разыгрываемых партий игры больше, чем наблюдений, пригодных для обработки, за счет временного лага реакции среды. Наблюдения  $(\bar{p}_k, \bar{q}_k, V_k)$  производятся в дискретные -е моменты времени.

Обратная АМИ по структуре относится к задачам параметрической идентификации [8], в которой оцениваемыми параметрами являются элементы платежной матрицы  $A$ . Для АМИ уравнение измерений примет вид:

$$V_k = \bar{p}_k^T A \bar{q}_k + \varepsilon_k,$$

где  $\varepsilon_k$  – невязка в -ом наблюдении.

Тогда задача оптимального оценивания методом наименьших квадратов (МНК) примет вид:

$$\sum_{k=1}^N (V_k - \bar{p}_k^T A \bar{q}_k)^2 \rightarrow \min_A$$

Для удобства построения рекуррентного алгоритма оценивания представим матрицу  $A$  в виде вектора, составленного из ее столбцов:  $\bar{a} = [\bar{a}_1^T \ \bar{a}_2^T \ \dots \ \bar{a}_n^T]^T$ , где  $\bar{a}_j$  – это -й столбец матрицы  $A$ .

$$\bar{p}_k^T A \bar{q}_k = \bar{q}_k^T A \bar{p}_k = \bar{q}_k^T \begin{bmatrix} \bar{p}_k^T & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \bar{p}_k^T & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \bar{p}_k^T \end{bmatrix} \bar{a} = \bar{r}_k^T \bar{a},$$



где  $\bar{r}_k = [q_k^{(1)} \bar{p}_k^T \quad q_k^{(2)} \bar{p}_k^T \quad \dots \quad q_k^{(n)} \bar{p}_k^T]^T$ ,  $q_k^{(j)}$  – это  $j$ -й компонент вектора  $\bar{q}_k$ .

С учетом этих обозначений задача оптимального оценивания примет вид:

$$\sum_{k=1}^N (V_k - \bar{r}_k^T \bar{a})^2 \rightarrow \min_{\bar{a}}$$

Стандартные преобразования [1, 4, 8] приводят к следующей паре рекуррентных уравнений оценивания элементов платежной матрицы:

$$\hat{a}_{N+1} = \hat{a}_N + Q_N \bar{r}_{N+1} [\bar{r}_{N+1}^T Q_N \bar{r}_{N+1} + 1]^{-1} [V_{N+1} - \bar{r}_{N+1}^T \hat{a}_N],$$

$$Q_{N+1} = Q_N - Q_N \bar{r}_{N+1} [\bar{r}_{N+1}^T Q_N \bar{r}_{N+1} + 1]^{-1} \bar{r}_{N+1}^T Q_N,$$

где  $N$  – номер наблюдения;  $\hat{a}_N$  – вектор оценок элементов ПМ,  $Q_N$  – дисперсионная матрица оценок.

Начальные значения вектора оценок обычно задают [1, 4, 8] нулевыми, а дисперсионной матрице придают диагональный вид с достаточно большими диагональными элементами.

### Модельный пример

В качестве имитационного эксперимента, иллюстрирующего элементы адаптивной процедуры управления РТС рассмотрен упрощенный вариант игровой ситуации, в которой РТС функционирует в условиях активного противодействия. Пусть игрок И1, имеющий два самолета, оснащенных поражающими средствами, стремится вывести из строя объект, охраняемый игроком И2. У игрока И2 имеются четыре зенитных ракетных комплекса (ЗРК), при помощи которых осуществляется оборона объекта. Для разрушения объекта достаточно хотя бы одного прорвавшего оборону самолета, а с уничтожением одного самолета с большой вероятностью справится один ЗРК. Для подлета к объекту И1 может использовать четыре воздушных коридора.

У И1 есть две чистые стратегии: 1 – самолеты подлетают по любым разным коридорам; 2 – оба самолета подлетают по какому-то одному из коридоров.

Чистые стратегии И2 следующие: 1 – поставить по одному ЗРК на каждый коридор; 2 – поставить по два ЗРК на два любые коридора (остальные два коридора остаются неприкрытыми); 3 – поставить два ЗРК на один из коридоров и по одному ЗРК еще на два коридора; 4 – поставить три ЗРК на один из коридоров и один ЗРК еще на один коридор; 5 – поставить все четыре ЗРК на один из коридоров.

С учетом вероятностей выбора сторонами коридоров и объема средств для нападения и защиты можно определить вероятности выполнения первым игроком (И1) своей задачи при тех или иных сочетаниях чистых стратегий игроками. Смысловым содержанием цены игры также является вероятность выполнения задачи первым игроком.

Анализ платежной матрицы показывает, что при решении прямой АМИ она не имеет седловой точки, а значит, решение следует искать в смешанных стратегиях. Из чистых стратегий второго игрока 4-я и 5-я оказываются доминируемыми, а если решить игру, то 3-я чистая стратегия будет неак-

тивной, т.е. вероятность ее использования в составе оптимальной смешанной стратегии будет нулевой. Этот предварительный анализ показывает, что в составе данных, используемых при решении обратной задачи, будут участвовать лишь первые две стратегии И2, а значит в модельном примере, для упрощения представления данных, можно рассматривать лишь по две стратегии каждого из игроков (см. табл. 1).

**Таблица 1 – Платежная матрица игры (для И1) и ее решение**

		Чистые стратегии И2		Оптимальная смешанная стратегия И1
		1	2	
Чистые стратегии И1	1	0	0.833	0.375
	2	1	0.500	0.625
Оптимальная смешанная стратегия И2		0.250	0.750	Цена игры $V = 0.625$

В подобных прикладных задачах эффект обычно проявляется с некоторым лагом – через несколько партий игры (в данном модельном примере – через 3 партии). Таким образом, в состав одного наблюдения входят реализации (оценки) оптимальных стратегий И1, И2 и цены игры (как средний платеж за три партии).

Для решения обратной задачи следует использовать лишь те данные наблюдений, по которым принятые ЛПП решения можно считать оптимальными (удачными, хорошими, эффективными и т.п.). Ретроспективный анализ оптимальности принятых оператором РТС решений, как правило, проводится лицом, полномочным оценивать решения. Результатом решения обратной АМИ является построенная игровая модель, аппроксимирующая положительный опыт ЛПП – оператора РТС. Далее эта модель может быть использована в режиме решения прямой АМИ для управления РТС, что обеспечит высокую оперативность, автономность и качество управления, близкое к «ручному».

Для решения обратной задачи АМИ было смитировано 100 комплектов реализаций (партий игры). Наблюдения послужили скользящие оценки по очередным трем партиям игры. На рисунке 1 приведены пошаговые изменения оценок элементов платежной матрицы в результате решения обратной АМИ по данным наблюдений. На рисунке 2 представлено изменение длины вектора невязки, т.е. нормированного расстояния между точкой фактических (модельных) значений элементов платежной матрицы (см. табл. 1) и точкой оценок этих значений ( $\hat{a}$ ), на каждом шаге наблюдений.

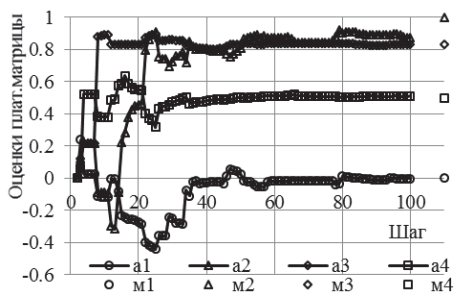


Рисунок 1 – Сходимость оценок платежной матрицы

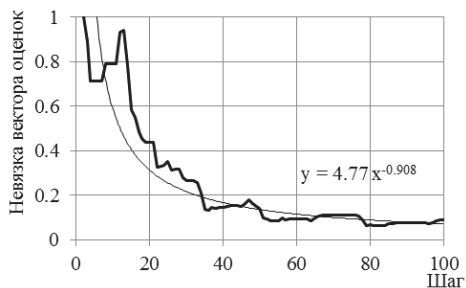


Рисунок 2 – Сходимость невязки оценок платежей

В качестве меры достаточности настройки модели можно использовать, например, функцию аппроксимации невязки (для данного модельного примера:  $y = 4.77x^{-0.908}$ ). Другим вариантом правила останковки рекуррентной процедуры оценивания (настройки) параметров модели может быть минимальная величина уменьшения невязки вектора оценок.

Поскольку построение платежной матрицы игры по наблюдениям не является конечной целью использования АМИ в управлении РТС, то качество итерационного процесса настройки модели можно контролировать и по «конечному продукту» – качеству решений, принимаемых по матрице оценок на каждом шаге настройки. Для этого следует решать прямую АМИ на каждом шаге итерационного процесса, что даст пару оптимальных смешанных стратегий игроков и цену игры. Как результат этого, на рис. 3 приведена нормированная невязка оптимальных смешанных стратегий игроков относительно оптимальных стратегий модели, приведенных в таблице 1. На рисунке 4 показано приближение оценки цены игры, полученной по матрице оценок платежей, к величине цены игры, полученной по модельной матрице, приведенной в таблице 1.

Видно, что темпы сходимости решений, полученных по матрице оценок платежей, примерно те же, что и оценок элементов матрицы платежей. А это означает, что правило останковки процесса настройки игровой модели можно строить как по оценкам элементов платежной матрицы, так и по решениям, полученным по этой матрице.

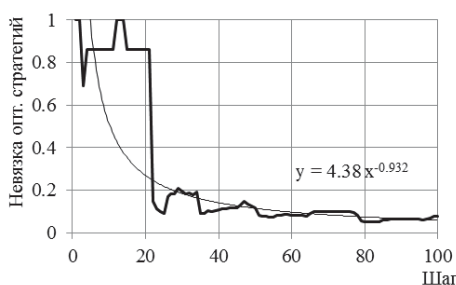


Рисунок 3 – Сходимость невязки оптимальных стратегий

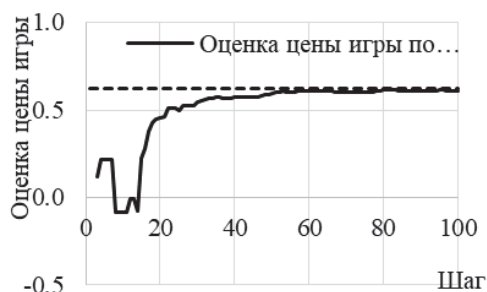


Рисунок 4 – Сходимость цены игры

По оценкам матрицы построить правило остановки проще т.к. для остановки не требуется вычислять оптимальные решения.

### Выводы

Исследования адаптивного алгоритма управления РТС, основанного на решении обратной и прямой АМИ, показали устойчивый характер сходимости по оценкам и по решениям, и для других размерностей модели, других вариантов скользящих интервалов наблюдений.

Использование методов оптимального планирования эксперимента в процессе решения обратной задачи позволит сократить время адаптации модели к предпочтениям ЛПР.

Настроенная и заложенная в РТС модель является в высокой степени адекватной предпочтениям ЛПР, а принимаемые РТС решения по качеству не будут уступать решениям «учителя» игровой модели. Однако, в отличие от управления РТС оператором, управление его «двойником» – моделью игры, позволяет:

- существенно сократить продолжительность цикла управления;
- снизить значимость каналов связи, подверженным воздействию средств радиоборьбы;
- повысить автономность РТС.

При появлении признаков нестационарности среды или при изменении предпочтений ЛПР, модель вновь может быть настроена и перезагружена в РТС. Процесс настройки (обучения) модели может проходить и в специальных ситуационных центрах с привлечение групп экспертов, а настроенная для новых условий игровая модель может быть загружена, как «горячее» обновление, не прерывая текущего нормального функционирования РТС.

### Литература

1. Вилисов В.Я. Адаптивный выбор управленческих решений. Модели исследования операций как средство хранения знаний ЛПР // Саарбрюкен (Германия): LAP LAMBERT Academic Publishing. 2011. 376 с.
2. Каляев И.А. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов // М: Физматлит. 2009. 280 с.

3. Каляев И.А. Проблемы группового управления роботами // Мехатроника, автоматизация, управление. № 6. 2009. С. 33-40.
4. Ли Р. Оптимальные оценки, определение характеристик и управление // М.: Наука. 1966. 176 с.
5. Оуэн Г. Теория игр // М.: Мир. 1971. 230 с.
6. Райфа Г. Анализ решений // М.: Наука. 1977. 408 с.
7. Рудианов Н.А. Наземные робототехнические комплексы как элемент системы обороны объектов и территорий РФ // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» // СПб: Политехника-Сервис. 2015. С. 16-17.
8. Сейдж Э. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении // М.: Связь. 1976. 496 с.
9. Синица С.Г. Разработка модели боевой робототехнической системы для участия в робототехнических соревнованиях // Труды международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» // СПб: Политехника-Сервис. 2015. С. 275-279.
10. Таха Х.А. Введение в исследование операций // М.: Изд. дом Вильямс. 2005. 912 с.
11. Цариченко С.Г. Особенности применения БПЛА в интересах МЧС // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» // СПб: Политехника-Сервис. 2015. С. 24-29.
12. Шеремет И.Б. О необходимости разработки концепции построения и применения автономных робототехнических комплексов военного назначения // Труды международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» // СПб: ООО «АП4Принт». 2016. С. 35-39.

УДК 621.398

## **Разработка каркаса безопасного приложения с клиент-серверной архитектурой**

**Л.А. Корнева**, магистр,

**П.Б. Хорев**, к.т.н., доцент, профессор,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский университет  
«Московский энергетический институт» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»),  
г. Москва

*При создании программных систем разработчикам требуется выбрать наиболее эффективные проектные решения, в роли которых могут выступать каркасы (фреймворки), созданные другими разработчиками. Подобный каркас может использоваться как основа для новых приложений. Не все доступные разработчикам клиент-серверных приложений каркасы уделяют должное внимание безопасности таких приложений. Поэтому возникает необходимость в разработке фреймворка для создания безопасного клиент-серверного приложения. Для создания такого фреймворка выбран язык программирования Java. В статье представлен набор компонентов, необходимых для создания каркаса, ориентированного на обеспечение информационной безопасности веб-приложений.*

Информационная безопасность, веб-приложение, фреймворк, набор компонентов.

## **Development of framework secure application with client-server architecture**

**L.A. Korneva**, master,

**P.B. Khorev**, Ph.D., Associate Professor, professor,

Federal state educational budget institution of higher education  
«National Research University «Moscow Power Engineering Institute»  
(FSEBI HE «NRU «MPEI»), Moscow

*When creating software systems developers need to choose the most effective design solutions, which may make frameworks, created by other developers. Such a framework can be used as a basis for new applications. Not all available client-server application developers frameworks give due regard to the safety of such applications. So there is a need to develop a framework to create a secure client-server application. To create such a framework in the Java programming language is selected. This article provides a set of components that are required to create a framework of information security-oriented Web applications.*

Information security, web application, framework, a set of components.

**Введение.** При создании программных систем перед разработчиками часто встает задача выбора тех или иных проектных решений. Эффективным решением в таких случаях являются каркасы (фреймворки) – существующие хорошо продуманные решения, созданные другими разработчиками [1, с.1]. Они, во-первых, существенно упрощают разработку и сокращают ее время, и, во-вторых, уменьшают вероятность появления ошибок в разрабатываемых приложениях. Систематизированные решения доступны менее опытным разработчикам, которые могут использовать такие каркасы как основу для своих приложений.

Для создания клиент-серверных приложений также можно воспользоваться готовыми каркасами, но, к сожалению, не все доступные решения уделяют должное внимание безопасности разрабатываемых приложений, что может подвергнуть приложение рискам случайного или преднамеренного вмешательства в его работу, приводящим к ущербу пользователям приложения.

В данной статье на основе анализа типовых угроз безопасности информации при использовании клиент-серверных приложений определен набор компонентов, необходимых для создания каркаса веб-приложения, ориентированного на обеспечение информационной безопасности. Приведены результаты разработки и тестирования безопасного фреймворка для создания клиент-серверного приложения.

#### **Основные угрозы безопасности клиент-серверных приложений.**

При использовании веб-приложений информация может подвергаться различным атакам со стороны нарушителей. Выделяют следующие классы атак [2, с.1]:

- «маскарад» (Authentication Attacks);
- превышение полномочий (Authorization Attacks);
- нарушение защищенности информации на стороне клиента (Client-side Attacks);
- выполнение потенциально опасного кода на стороне сервера (Command Execution);
- утечка информации (Information Disclosure);
- логические атаки (Logical Attacks).

Атаки «маскарада» используют уязвимости применяемых в веб-приложении методов и средств аутентификации (подтверждения подлинности имени) пользователя, службы или приложения.

Атаки превышения полномочий используют недостатки методов авторизации, применяемых веб-сервером для определения прав пользователя, службы или приложения на доступ к запрашиваемым объектам сервера. Безопасные клиент-серверные приложения должны разрешать только определенным пользователям получать доступ к защищаемым объектам на стороне сервера. В ходе атаки превышения полномочий нарушитель пытается получить отсутствующие у него права доступа.



Атаки для нарушения защищенности информации на стороне клиента (пользователя веб-сервера). После установления соединения между пользователем и сервером возникают доверительные отношения: пользователь ожидает, что сайт или портал предоставит ему только запрошенное обслуживание. В силу этого нарушитель получает возможность применения различных сценариев атак для реализации своих целей на стороне клиента.

Атаки, направленные на выполнение потенциально опасного кода на веб-сервере, основаны на том, что для обработки запросов клиентов серверы применяют данные, переданные пользователями вместе со своими запросами. Эти данные могут применяться, например, для составления команд серверу, которые управляют формированием динамического содержимого веб-страницы. В ходе такой атаки нарушитель может получить возможность нужным для себя образом изменять такие выполняемые на стороне сервера команды.

Атаки класса «утечка информации» направлены на получение нужной нарушителю информации об атакуемом клиент-серверном приложении. Используя имеющиеся уязвимости, нарушитель может определить применяемые дистрибутивы программного обеспечения, номера версий клиентской и серверной частей и установленные (или неустановленные) обновления. Также нарушитель может получить информацию о расположении на стороне сервера временных или резервных файлов. Чаще всего эти данные не требуются для обработки запросов пользователя. Поэтому необходимо минимизировать объем подобной информации для усложнения нарушителю задачи компрометации атакуемой системы.

Логические атаки направлены на использование функций приложения или его логики, которая представляет собой ожидаемое поведение программы при обработке запросов пользователей. Примерами являются восстановление паролей, регистрация пользователей. Для выполнения конкретной функции приложения пользователь должен правильно выполнить определенную последовательность действий. Нарушитель может обойти эти механизмы или использовать их в своих целях.

**Определение набора компонентов фреймворка.** Учитывая возможные атаки, которые могут возникнуть при использовании клиент-серверных приложений, определим следующий перечень компонентов, необходимых для создания нашего фреймворка:

- модуль регистрации пользователя,
- модуль проверки прав пользователя,
- модуль создания защищенного соединения,
- модуль ведения аудита.

Выбор данного набора компонентов обусловлен рядом причин:

1) На прикладном уровне взаимодействия сетевых приложений защита в основном связана с защитой веб-страниц, исключающей их просмотр неавторизованными пользователями. Поэтому каждое веб-приложение должно иметь формы регистрации пользователя при его первом входе на сайт и авто-

ризации при дальнейшей работе пользователя с сайтом, а разрабатываемый фреймворк должен содержать модуль регистрации пользователя.

2) Всякая система, предполагающая несколько участников (или пользователей), требует разграничения прав субъектов системы (участников) по отношению к ее объектам. Поэтому любое безопасное веб-приложение должно иметь механизм управления доступом к его ресурсам. В разрабатываемом нами фреймворке решать эту задачу будет модуль проверки прав пользователя. Кроме того, он поможет предотвратить атаки класса «Превышение полномочий (Authorization Attacks)», рассмотренные выше.

3) Для защиты от перехвата аутентифицирующей пользователя информации (пары значений «имя (логин)-пароль») и ее использования нарушителем для попытки входа под чужим именем, т.е. для защиты от атак класса «Маскарад (Authentication Attacks)», а также от атак класса «Нарушение защищенности информации на стороне клиента (Client-side Attacks)», следует использовать установку защищенного соединения с клиентом. Поэтому в разрабатываемом фреймворке необходим такой компонент, как модуль создания защищенного соединения сервера с клиентом.

4) Любые сведения о действиях субъектов (пользователей веб-приложения) при работе с ресурсами веб-приложения должны быть записаны в журналы (файлы аудита, «лог-файлы»), иначе действия нарушителя в случае несанкционированного доступа или попытки такого доступа, например, в ходе атаки класса «Логические атаки (Logical Attacks)», останутся незамеченными. Файлы аудита должны регулярно просматриваться администратором веб-приложения, поскольку такие файлы позволяют отслеживать потенциальные угрозы информационной безопасности. Кроме того, рекомендуется использовать запись сведений об ошибках при работе приложения в журнал, отключив вывод подробных сообщений об ошибках пользователю, поскольку подобная информация может дать нарушителям возможность искусственно вызвать нарушение работоспособности приложения либо использовать такую информацию для поиска других уязвимостей в атакуемом веб-приложении. В разрабатываемом фреймворке за ведение и использование журнала безопасности будет отвечать модуль ведения аудита.

**Проектирование компонентов фреймворка.** При проектировании компонентов фреймворка воспользуемся возможностями аспектно-ориентированного программирования (АОП) (Aspect Oriented Programming, AOP) [3, с.1; 4, с.75-76]. Эта методология программирования базируется на принципе разделения функционала программы для улучшения ее модульной структуры.

В основе аспектно-ориентированного программирования лежит понятие сквозной функциональности. Под ней в АОП понимается такой набор функций, который сложно или невозможно реализовать в отдельном компоненте (например, классе) программы методами, присущими процедурному или объектно-ориентированному программированию, т.к. эти функции необходимы в большинстве компонентов программы. Также функции из этого на-

бора не описываются непосредственно в функциональных спецификациях программы. Примером такой функции может быть протоколирование работы системы (ведение журнала ее работы).

Использование методологии АОП соответствует принципу разделения ответственности (разделения обязанностей или функций, *separation of concerns*), что приводит к сокращению сроков разработки клиент-серверного приложения, повышению качества его программной реализации, улучшению его модульной структуры и др.

Модуль регистрации пользователя разрабатываемого фреймворка реализован в виде совокупности классов – классов, определяющих построение объектов «Субъект (пользователь)», «Объект системы», «Разрешение на доступ субъекта к объекту», и классов, которые содержат методы, выполняющие работу с базой данных (БД) приложения. Классы, реализующие взаимодействие с БД, включают классы, которые содержат методы по добавлению, выбору, обновлению и удалению пользователей и объектов, и класс, реализующий назначение и сохранение прав пользователей. При решении задачи назначения прав используется модель дискреционного управления доступом, которая реализуется в виде матрицы прав субъектов на доступ к объектам системы [5, с. 69-73]. Под объектами системы понимаются веб-страницы, каталоги на сервере, доступные для загрузки файлы и др.

Таблица зарегистрированных пользователей должна содержать поля: *id* пользователя, его имя («логин»), адрес его электронной почты (*e-mail*), хеш-значение пароля пользователя, случайную «примесь» для хеширования пароля. Таблица объектов системы будет содержать поля: *id* объекта, имя объекта. И, наконец, в отдельной таблице будут содержаться записи о наличии у конкретного пользователя права на конкретное действие с конкретным объектом.

В АОП под аспектом (*aspect*) понимается совокупность среза (*pointcut*) и реализующего функционал программы совета (*advice*). Срез – это точка соединения (*joinpoint*), в которой выполняется определенная советом функция. В качестве точки соединения в программе выбирается такая точка, в которой можно выполнить необходимый код средствами АОП. Использование аспекта позволяет изменить остальной код программы: код совета выполняется в точках соединения, которые определены конкретным срезом.

Модуль проверки прав пользователя в разрабатываемом фреймворке удобно реализовать в виде аспекта: во-первых, проверка прав в виде аспекта будет осуществляться без участия разработчика веб-приложения, использующего разрабатываемый фреймворк. При разработке клиент-серверных приложений зачастую могут возникнуть угрозы безопасности из-за невнимательности разработчика. Реализация действия, нужного в одном месте, может быть описана совсем в другом, либо вовсе не описана. Использование аспекта предотвращает данную проблему. Во-вторых, при использовании аспекта нет риска возникновения ситуации, при которой разработчик, меняя код приложения, изменит код, реализующий функционал проверки прав. И, наконец,

при использовании аспектов код приложения становится более ясным.

Для создания защищенного соединения в разрабатываемом фреймворке будет использоваться протокол TLS. Протокол TLS (Transport Layer Security), как и его предшественник SSL (Secure Sockets Layer) – это защищенный протокол связи для передачи ценных документов по локальной сети и Интернету [6, с.1].

Соединение TLS служит для создания безопасного канала общения клиента и сервера. Под безопасностью в данном случае понимается:

- конфиденциальность – третье лицо не сможет ознакомиться с содержанием передаваемых данных;
- целостность – существуют механизмы, позволяющие понять, были ли изменены данные при их передаче по сети;
- аутентичность – существуют механизмы, позволяющие подтвердить личность отправителя данных.

При создании TLS-соединения непременно производится аутентификация сервера. Для проверки его подлинности серверу необходимо иметь сертификат и пару ключей асимметричного шифрования. Открытый ключ содержится в сертификате, закрытый же безопасно хранится на сервере. Клиент должен получить так называемый самоподписанный сертификат сервера по безопасному каналу, либо этот сертификат должен быть подписан доверенным удостоверяющим центром (Certification authority, CA).

В разрабатываемом фреймворке модуль создания защищенного соединения будет представлен в виде класса, выполняющего генерацию сертификата и пары ключей. Инструкции по применению и организации защищенного соединения (описание использования команд для экспорта сертификата в файл и импорта сертификата в список доверенных сертификатов), будут записаны в файле помощи (help-файле) для пользователя фреймворка (разработчика). Этот файл при использовании фреймворка будет автоматически открываться в текстовом редакторе сразу после генерации сертификата и пары ключей.

В разрабатываемом фреймворке за ведение журнала безопасности приложения будет отвечать модуль ведения аудита, который реализуется в виде аспекта. Аспект будет записывать в журнал сведения об имени, аргументах и результате выполнения вызванного в приложении метода целевого класса, снабженного аннотацией @Loggable языка Java [7, с.1].

Архитектура разрабатываемого фреймворка представлена диаграммой пакетов (рис. 1). При создании клиент-серверного приложения пользователю-разработчику предлагается воспользоваться конструктором (Constructor), в котором он сможет выбрать набор необходимых ему компонентов. Разработчику будет рекомендовано обязательно использовать компоненты «Модуль регистрации пользователя», «Модуль проверки прав пользователя», «Модуль защищенного соединения» для создания безопасного клиент-серверного приложения.

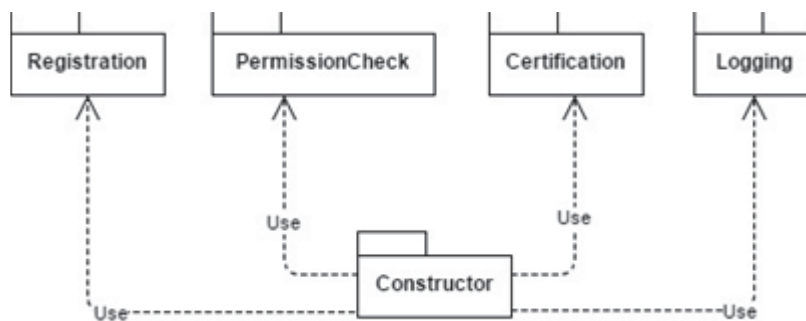


Рисунок 1 – Диаграмма пакетов разрабатываемого фреймворка

Кроме программного кода в каждом компоненте будут содержаться соответствующие файлы-инструкции, описывающие способ использования данного компонента.

После того, как выбранные компоненты будут созданы, разработчик сможет дополнить создаваемое веб-приложение необходимой бизнес-логикой и получить безопасное клиент-серверное приложение с требуемым функционалом.

**Тестирование разработанного фреймворка.** Проект фреймворка был реализован с использованием универсального фреймворка с открытым исходным кодом Spring для языка программирования Java [8, с.1]. Создаваемое с помощью фреймворка веб-приложение разворачивается на серверной стороне, а пользователь веб-приложения открывает браузер на клиентской стороне.

Для тестирования разработанного фреймворка были написаны unit-тесты на каждый из компонентов фреймворка. Для написания таких тестов использовалась библиотека для модульного тестирования JUnit [9, с.1]. Эффективность использования разработанного фреймворка была проверена при создании демонстрационного безопасного приложения с клиент-серверной архитектурой.

Для настройки защищенного соединения по протоколу TLS использовались команды утилиты Java Keytool [10, с.1] и веб-сервер Apache Tomcat [11, с.1].

**Заключение.** В статье представлены результаты проектирования и программной реализации фреймворка, включающего:

- модуль регистрации пользователя, осуществляющий добавление нового пользователя и назначение ему прав доступа (на основе дискреционного управления доступом);
- модуль проверки назначенных пользователю прав доступа, обеспечивающий такую проверку при вызове метода целевого класса, отмеченного разработчиком соответствующей аннотацией;
- модуль защищенного соединения, который генерирует сертификат и пару ключей для создания соединения и содержит инструкцию для дальнейших действий разработчика;

- модуль ведения аудита, который обеспечивает запись в журнал событий, связанных с вызовом снабженных соответствующей аннотацией методов целевого класса.

Использование предлагаемого фреймворка позволит разработчику создавать безопасные клиент-серверные приложения с необходимыми свойствами и в короткие сроки.

#### Литература

1. Фреймворк [Электронный ресурс]. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1171069> (дата обращения: 01.02.2018).
2. Web Application Security Consortium [Электронный ресурс]. URL: <http://www.webappsec.org/> (дата обращения: 01.02.2018).
3. Аспектно-ориентированное программирование [Электронный ресурс]. URL: <https://dvc.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/71104> (дата обращения: 01.02.2018).
4. Корнева Л.А. Применение технологии аспектно-ориентированного программирования при реализации компонентов фреймворка для создания безопасного клиент-серверного приложения // Современная наука: проблемы и перспективы: сборник статей II Международной научно-практической конференции. Ставрополь: Логос, 2017. С. 75-81.
5. Хорев П.Б. Методы и средства защиты информации в компьютерных системах: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Информатика и вычислительная техника» // М.: Издательский центр «Академия». 2008. 256 с.
6. TLS [Электронный ресурс]. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/83308> (дата обращения: 01.02.2018).
7. Руководство по аннотациям в Java [Электронный ресурс]. URL: <http://javadevblog.com/rukovodstvo-po-annotatsiyam-v-java.html> (дата обращения: 01.02.2018).
8. Spring Framework [Электронный ресурс]. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/182641> (дата обращения: 01.02.2018).
9. Тестирование программы, JUnit [Электронный ресурс]. URL: <http://java-online.ru/blog-junit.xhtml> (дата обращения: 01.02.2018).
10. Основы Java Keytool: работа с Java Keystore [Электронный ресурс]. URL: <https://www.8host.com/blog/osnovy-java-keytool-rabota-s-java-keystore/> (дата обращения: 01.02.2018).
11. Apache Tomcat [Электронный ресурс]. URL: [http://wiki.etersoft.ru/Apache\\_Tomcat](http://wiki.etersoft.ru/Apache_Tomcat) (дата обращения: 01.02.2018).



УДК 004.58

### **Программные средства реализации дистанционных образовательных технологий**

**Н.В. Мокрова**, д.т.н., доцент, профессор кафедры «Автоматизация и электроснабжение»,  
Национальный исследовательский  
Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),  
г. Москва,  
**А.М. Мокров**, инженер программист ЗАО «НОРСИ-ТРАНС», г. Москва

*В статье предложена система онлайн-вещания мультимедийных презентаций, основными преимуществами которой являются кроссплатформенность и скорость обработки данных, которые достигнуты за счёт использования современных технологий HTML5, JavaScript, NoSQL базы данных MongoDB и PDF. Полученный программный продукт позволяет проводить онлайн-вещание с использованием обычного браузера, также реализована аутентификация пользователей и возможность внесения лектором правок «на лету» с целью повышения качества обучения.*

Онлайн вещание, кроссплатформенные программные средства, аутентификация пользователей.

### **Software for implementing distance education technologies**

**N.V. Mokrova**, Professor, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow,  
**A.M. Mokrov**, Software Engineer, CJSC NORSI-TRANS, Moscow

*The system of online broadcasting of multimedia presentations is proposed. The main advantages are the cross-platform solution and data processing speed. These features achieved due to the use of modern technologies as HTML5, JavaScript, NoSQL MongoDB database and PDF. Elaborated software product allows to broadcast using native browser. Users' authentication and the possibility of the author's corrections on the fly are also represented to improve the quality of training.*

Online broadcasting, cross-platform solution, users' authentication.

### **Введение**

В настоящее время в образовании широко используются дистанционные технологии, известно достаточное количество программных средств онлайн вещания [2]. Одной из наиболее популярных платформ для Learning Management System (LMS) в высшем образовании является Blackboard – лицензионное, платное решение, требующее значительных затрат, в частности на обучение преподавателей. Популярные Moodle, Google Класс, и Edmodo [1]



условно бесплатны. Бесплатными могут быть, например, основные возможности (Schoology) или скачивание файлов с программным кодом с официального сайта при необходимости оплаты хостинга и услуг специалиста по установке, обновлению и обслуживанию платформы (Moodle).

С 2015 г. известен бесплатный хостинг MoodleCloud [5], который может быть использован для фрагментарного внедрения в образовательных организациях. Доступна бесплатная версия программы для проведения видеоконференций BigBlueButton, которая имеет следующие ограничения: максимальное количество участников – 6 человек, запись конференции невозможна. Общие ограничения MoodleCloud: 50 пользователей, максимум 200 Mb места на диске, необходимость совместного использования любых других облачных сервисов для хранения «больших» файлов, привязка к одному номеру телефона только одного сайта.

Предложенное в работе [10] приложение позволяет транслировать и просматривать презентации в режиме реального времени, сохранять визуальное изображение и предназначено для сопровождения устного доклада с возможностью просмотра презентации на экране мобильного устройства. В данной статье приведен обзор программных продуктов данного назначения, отмечено, что только SlideShare позволяет синхронизировать презентацию и видеотрансляцию, а Join.me имеет дополнительную возможность управления происходящим на экране.

Следует отметить, что опыт использования программных средств реализации дистанционных образовательных технологий имеют многие образовательные организации, в то же время говорить о повсеместном и общем их использовании нельзя. Дистанционные курсы есть не на всех кафедрах даже вузов, которые активно внедряют дистанционное обучение, некоторые преподаватели не участвуют в данном процессе.

В данной статье предложены основные технические решения для ведения управляемой трансляции мультимедийной презентации, создания удобного пользователю интерфейса. Следует отметить, что перед авторами не стояла задача предложить платформу, обладающую всеми основными функциями LMS-систем. Целью работы было создание базового кроссплатформенного веб-интерфейса для отображения и управления файлами формата pdf, реализации функции рисования на страницах презентации, хранения данных созданных трансляций.

### **Разработка системы онлайн-вещания мультимедийных презентаций**

Обоснованно выбранные кроссплатформенные программные решения реализованы в системе онлайн-вещания мультимедийных презентаций с элементами управления. Система онлайн-вещания состоит из хост-компьютера, на котором через веб-браузер пользователя выполняется вещание презентации; сервера и компьютера клиента. Хост выполняет не только просмотр, но и изменяет параметры трансляции презентации, поэтому связь между хостом и

сервером двухсторонняя. В свою очередь, клиент осуществляет только просмотр трансляции и только получает данные от сервера через веб-интерфейс.

Разработан базовый веб-интерфейс для отображения и управления файлами формата pdf. Для снижения нагрузки на сервер рендеринг файла презентации выполнен на стороне клиента с помощью движка PDF.js, который является свободным и написан на JavaScript [7], что обеспечивает высокую совместимость, так как данный язык поддерживается подавляющим большинством современных браузеров и позволяет достичь высокой интерактивности конечного веб-интерфейса. Использование JavaScript в комбинации со средствами HTML5 позволяет не прибегать к технологии Adobe Flash [3] и подобным, что даёт значительный рост производительности, обеспечивает максимальную кроссплатформенность. Основным преимуществом PDF.js является полная интеграция с HTML5 без использования сторонних мультимедийных платформ [6, 9]. Функционирование PDF.js основано на использовании технологии Promises. Такой подход позволяет средствами PDF.js асинхронно загрузить все страницы файла, а по завершению загрузки перейти к следующему действию (например, рендерингу тоже асинхронному) с полной уверенностью, что все данные уже загружены, или вызвать функцию обработки ошибки, если в процессе загрузки возникла ошибка.

Для реализации функции рисования на страницах презентации использован элемент HTML5 canvas, предназначенный для создания растрового двумерного изображения средствами JavaScript. Движок PDF.js поддерживает рендеринг страниц pdf-файла на canvas. Для увеличения быстродействия веб-интерфейса и снижения количества запросов к серверу, содержащему pdf-файл, предложено сразу выполнять рендеринг всех страниц в процессе загрузки страницы трансляции в массив неотображаемых элементов canvas, а для отображения конкретной страницы производить копирование данных соответствующего странице элемента canvas на видимый пользователю canvas.

Система онлайн-вещания презентаций представляет собой веб-интерфейс, главная страница которого позволяет войти в личный кабинет для управления своими трансляциями и учетными записями или подключиться к открытой трансляции, выбрав её из списка существующих или введя название трансляции в поле ввода.

Важной особенностью дистанционных образовательных технологий является возможность персонализации процесса обучения и, следовательно, более гибкой адаптации образовательного процесса к требованиям потребителей. В рамках решения задачи персонализации для получения доступа к личному кабинету предусмотрена авторизация, после прохождения которой лектору, в отличие от студента, открыт доступ к функциям управления трансляциями и учетными записями, он может добавить или удалить пользователей, имеющих доступ к данным разделам. Для создания новой трансляции следует ввести название трансляции и выбрать файл формата pdf из облака Dropbox. После создания трансляции в личном кабинете можно перейти к требуемой

трансляции или закрыть открытую трансляцию, поменять пароль, а также управлять учетными записями пользователей.

Основой управления трансляцией является панель управления (рис. 1). Масштабирование выполняется с помощью колёсика мыши.



Рисунок 1 – Кнопки панели управления в режиме трансляции

Функции кнопок панели управления: 1-2 – переключение страниц; также поддерживается «Page Up» и «Page Down»; 3 – ввод номера требуемой страницы; 4 – восстановление начального масштаба страницы; 5 – включение и выключение режима рисования, при выключенном режиме рисования включается режим перетаскивания; 6 – выбор цвета изображаемых в режиме рисования линий; 7 – выбор толщины линий; 8 – отмена последнего действие рисования; 9 – отмена всех действий по рисованию; 10 – закрытие трансляции.

#### Трансляция презентаций в режиме онлайн

Рассмотрим особенности онлайн трансляции презентаций. Клиент, подключившийся к открытой трансляции по её уникальному имени, может просматривать страницы презентации с текущими изменениями лектора, либо переключиться в режим индивидуального просмотра презентации. Кнопки панели управления для индивидуального просмотра презентации позволяют: вернуться в режим просмотра трансляции; выполнять переключение и выбор страниц; осуществлять масштабирование и сброс параметров масштабирования; перетаскивание.

Для хранения данных созданных трансляций использована документно-ориентированная система управления базами данных с открытым исходным кодом MongoDB, которая позволяет хранить неоднородные данные, а также выполнять горизонтальное масштабирование без лишних затрат, что крайне важно при дальнейшем расширении количества необходимых для хранения данных. Хранение данных в формате JSON/BSON упрощает их дальнейшую передачу клиенту, что немаловажно для частой передачи данных веб-браузерам, выполняющим трансляцию. В качестве хранимых данных выступает не только информация о трансляции, но и другая управляющая информация, например, массив линий, нарисованных лектором в ходе управления презентацией.

Пример одной записи о трансляции под названием «test» представлен на рисунке 2.

```
{ "_id" : ObjectId("54fffc27528645162696666f3"),  
  "file" : "https://dl.dropboxusercontent.com/1/view/t72122ayl3bixsm/basic.pdf",  
  "guid" : "d1610831-b56a-48bc-839e-42db4698c34c",  
  "line" :  
  [{"color" : "000000",  
    "id" : 0,  
    "point" :  
    [{"y" : 110.66875653082549, "x" : 731.3312434691745},  
     {"y" : 110.66875653082549, "x" : 741.2789968652038}],  
    "size" : 2}],  
  "name" : "test",  
  "page" : 1,  
  "scale" : 1,  
  "sx" : 0,  
  "sy" : 0}
```

Рисунок 2 – Фрагмент записи о трансляции

В предложенном фрагменте содержатся: ссылка на файл презентации, название трансляции, текущая страница, параметры масштаба, массив нарисованных линий с необходимой информацией, а также уникальный идентификатор для привязки трансляции к сессии браузера посредством cookies.

Пользователь получает информацию об изменениях при просмотре презентации без дополнительных запросов, для этого поддерживается постоянное HTTP-соединение с клиентом (модель работы веб-приложения – Comet). Таким образом, при изменениях в презентации, вносимых лектором, данные отправляются на сервер, сохраняются в базе данных, затем происходит вещание изменений клиентам, просматривающим данную трансляцию. При переходе клиента в режим индивидуального просмотра, применение изменений трансляции продолжается на невидимом элементе canvas, это позволяет моментально вернуться к просмотру трансляции без повторной загрузки данных.

В качестве Comet-сервера использована разработка `dklab_realplexor`, создатели которой гарантируют поддержку до 100000 одновременных соединений [4]. Для каждой трансляции создается свой канал с идентификатором, совпадающим с её названием, просматривающие трансляцию клиенты в свою очередь выполняют подписку на этот канал и при получении данных применяют изменения, необходимые для синхронизации транслируемой информации.

Следует отметить, что созданная трансляция привязана к текущей сессии браузера, а не к пользователю, поэтому один и тот же пользователь может создавать любое количество трансляций с разных компьютеров. Использование системы онлайн-вещания позволяет просматривать презентацию, управляемую лектором, на компьютерах в аудиториях, а также на собственных устройствах, наличие внешнего сервера позволяет просматривать презентацию с

правками преподавателя не только на занятиях, но и в любом другом удобном для этого месте. В процессе разработки удалось добиться достаточно высокой кроссплатформенности конечной системы благодаря корректному выбору средств реализации и добавлению инструментов поддержки большинства современных устройств.

### **Организация контроля знаний**

В процессе обучения необходим механизм обратной связи, позволяющий студентам и преподавателям анализировать результаты работы и эффективно взаимодействовать. Удобной платформой для организации такого взаимодействия являются облачные технологии [8].

Оценивая знания, преподавателю приходится сталкиваться с огромным количеством электронных документов зачетные, контрольные, курсовые работы и т.п. В случае проведения контроля знаний в аудитории в выделенные часы удобным инструментом идентификации файлов является маска времени сохранения документа. В случае хранения сложной структуры папок факультетов, групп и т.д., например, в облаке Dropbox, поступлении отчётных файлов в разное время с разными реквизитами файлов задача идентификации обучающихся становится всё сложнее и сложнее, особенно в рамках дистанционного образования.

В целях организации контроля знаний аутентифицированных пользователей реализован веб-интерфейс для поиска идентичных файлов в общей папке облака Dropbox. В ходе создания выборки необходимых для сверки файлов использована маска пути файла, что позволяет реализовать проверку файлов, расположенных в разных директориях, а также задать их расширение. Метод поиска одинаковых файлов заключается в подключении к Dropbox посредством Dropbox API с последующим поиском по маске файлов, размер которых совпадает. Так как совпадение размеров разных файлов маловероятно, но не является полной гарантией их идентичности, для таких файлов проводится дополнительная проверка совпадения их хеш-сумм. Результатом работы данного алгоритма является список одинаковых файлов.

### **Заключение**

По результатам исследований предложена система онлайн-вещания, которая состоит из хост-компьютера, сервера и компьютера клиента. Предложен базовый веб-интерфейс для отображения и управления файлами формата pdf. Для реализации функции рисования на страницах презентации применены элемент HTML5 canvas и движок PDF.js. Для хранения данных созданных трансляций использована система управления базами данных с открытым исходным кодом MongoDB. С целью получения доступа к личному кабинету предусмотрена авторизация, для каждой трансляции создается свой канал, на который клиенты выполняют подписку, выполняется синхронизация транслируемой информации. Решена задача выявления идентичных файлов в общей облачной папке Dropbox, что способствует индивидуализации процесса контроля знаний.

Апробированная система онлайн-вещания мультимедийных презентаций с использованием внешнего сервера позволяет в любое удобное время просматривать презентацию, управляемую лектором.

Таким образом, в процессе разработки достигнута высокая кроссплатформенность конечной системы благодаря обоснованному выбору средств реализации и инструментов поддержки большинства современных устройств.

#### *Литература*

1. 5 популярных систем управления обучением. [Электронный ресурс]. URL: <http://teachtech.ru/moodle/5-populyarnyx-sistem-upravleniya-obucheniem.html#more-2407> (дата обращения: 17.04.17).
2. 10 Popular Tools for Broadcasting Live Video Online. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.lifewire.com/tools-for-broadcasting-live-video-3486110> (дата обращения: 11.11.17).
3. Deliver breakthrough web experiences across platforms and devices. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.adobe.com/ru/products/flashplayer.html> (дата обращения: 23.10.17).
4. dkLab | Конструктор | Dklab\_Realplexor: Comet-сервер промышленного масштаба с API для PHP и JavaScript [Электронный ресурс]. URL: [http://dklab.ru/lib/dklab\\_realplexor/](http://dklab.ru/lib/dklab_realplexor/) (дата обращения: 27.12.14).
5. MOODLECLOUD – новый бесплатный хостинг для MOODLE-сайтов. [Электронный ресурс]. URL: <http://teachtech.ru/moodle/moodlecloud-novyyj-besplatnyj-xosting-dlya-moodle-sajtov.html> (дата обращения: 23.04.17).
6. PDF.js – Examples [Электронный ресурс]. URL: <http://mozilla.github.io/pdf.js/examples/> (дата обращения: 25.12.14).
7. pdf.js — свободная реализация PDF-рендерера на JavaScript – Новости (nixp.ru) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nixp.ru/news/11287.html> (дата обращения: 17.12.16).
8. Understanding cloud-native applications after 10 years of cloud computing [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0164121217300018> (дата обращения: 07.10.17).
9. Рендеринг PDF с помощью HTML5 и JavaScript (pdf.js) / Хабрахабр [Электронный ресурс]. URL: <http://habrahabr.ru/post/122034/> (дата обращения: 25.12.16).
10. Сервис для online-трансляции презентаций. Front-end разработка. Кудрявцева С., Плетнев М. / Новые информационные технологии в автоматизированных системах. № 18 / 2015 Научная библиотека КиберЛенинка. [Электронный ресурс]. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/servis-dlya-online-translyatsii-prezentatsiy-front-end-razrabotka#ixzz4gh7dCpOT> (дата обращения: 23.04.17).



УДК 539.234

**Обоснование получения качественного жаропрочного композиционного материала с применением металлов платиновой группы методом магнетронного распыления**

**Т.Н. Антипова**, д.т.н., профессор,

**А.А. Лабутин**, аспирант,

Государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования Московской области

«Технологический университет», г. Королев, Московская область

*В работе показана технологическая схема изготовления слоистого композиционного материала (СКМ) методом магнетронного распыления. Данная схема состоит из нескольких последовательных этапов: нанесение защитного покрытия на оправку, осаждение композиционного материала до необходимой толщины, удаление оправки. Для реализации этой схемы была изготовлена экспериментальная установка. Изготовлены катоды из жаропрочных материалов. Получен образец системы Ir–W–Nb.*

*Проведены исследования его микроструктуры. Разработана концептуальная модель системы количественных показателей качества получения композиционного материала. Система показателей позволяет получать математические зависимости показателей качества изделий от показателей технологических операций на всех этапах производства, а, следовательно, обосновывать оптимальные параметры данных режимов.*

Композиционный материал, технология, показатели качества.

**Justification of producing quality heat-resistant composite material using metals of platinum group by method of magnetic spray**

**T.N. Antipova**, Doctor Technical Science., Professor,

**A.A. Labutin**, a graduate student,

State Educational Institution of Higher Education

Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

*In the work the technological scheme of manufacturing of a laminated composite material (SCM) by the method of magnetron sputtering is shown. This scheme consists of several successive steps: applying a protective coating to the mandrel, depositing the composite material to the required thickness, removing the mandrel. To implement this scheme, an experimental setup was made. Cathodes made of heat-resistant materials are made. A sample of the Ir–W–Nb system was obtained. His microstructure was studied. The conceptual model of the system of quantitative indicators of the quality of composite material production is developed. The system of indicators allows to obtain mathematical dependences of the product*



*quality indicators on the indicators of technological operations at all production stages, and therefore to justify the optimal parameters of these modes.*

Composite material, technology, quality indicators.

В настоящее время в ракетно-космической отрасли не все материалы, которые применяются, способны выдерживать высокие нагрузки. Важными параметрами материалов, влияющими на повышение характеристик изделий, являются удельный вес, прочность и рабочая температура. Более выделяется задача увеличения рабочих температур до 1800 °С в агрессивной среде.

Материалы, существующие сегодня и традиционные технологии (прессование, литье, механическая обработка и др.) не способны обеспечить заданных характеристик, в связи с этим нужно применять нестандартные технологические подходы для создания принципиально новых материалов и готовых изделий из них.

В настоящее время особую актуальность приобретает направление по изготовлению готовых изделий, используя аддитивные технологии. Особенно популярно технологии с применением 3D принтеров. Основным достоинством этих технологий является возможность получения деталей сложной геометрии с высокой точностью размеров, как из полимерных, так и из металлических материалов [1,2].

Однако данные технологии не позволят получать оболочечные конструкции с диаметром от 2,5 мм до 10 мм с внутренним защитным покрытием, обеспечивающим работоспособность до 1750 °С.

Для решения этой задачи разработана технология получения оболочечных конструкций с применением методов осаждения покрытий [3,4].

Использование методов осаждения для получения оболочечных конструкций достаточно перспективно, так как эти методы позволяют использовать, как металлы, так и керамику, что сильно расширяет круг использования материалов. Технология состоит из следующих основных этапов - изготовлении технологической оправки, осаждение защитного покрытия, осаждение силового каркаса и удаление оправки химическим травлением.

Иридий является единственным металлом, способным выдерживать температуру 1800 °С без окисления [5].

Поэтому целесообразно его использовать в качестве защитного жаростойкого покрытия для оболочечной конструкции. В качестве материала силового каркаса необходимо подобрать тугоплавкие материалы с близкими коэффициентами термического расширения, а также с отсутствием взаимодействия или с образованием твердых растворов, не изменяющих объем при заданных температурах. Таким образом, наиболее подходящим металлом является вольфрам, так как он не изменяет свою геометрию при высоких температурах. Согласно двойной диаграмме состояния [6].

В системе Ir–W при температуре 1800 °С происходит растворимость иридия порядка 6% (ат), что благоприятно сказывается на системе ввиду об-

разования диффузионного переходного слоя от иридиевого покрытия к силовому каркасу. Вольфрам является достаточно хрупким металлом, поэтому необходимо разбивать его слоями более пластичного металла. Согласно диаграмме состояния, наиболее подходящим металлом является ниобий. Система W–Nb характеризуется образованием непрерывного ряда твердых растворов. Таким образом, в качестве защитного покрытия выбран иридий, а в качестве силового каркаса слоистый композиционный материал W–Nb.

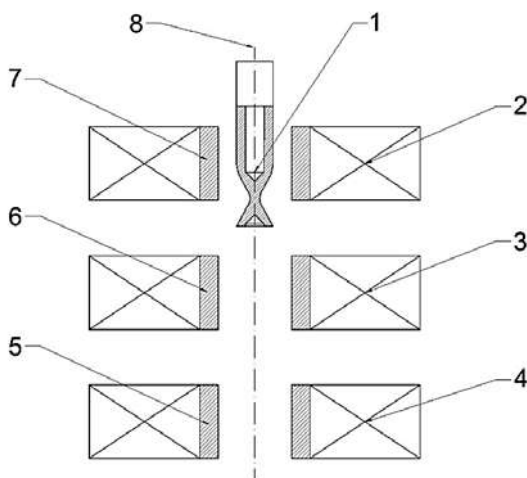


Рисунок 1 – Схема магнетронного напыления в кольцевых магнетронах.  
 1 – Оправка, 2, 3, 4 – магнитные системы, 5, 6, 7 – катоды из Ir,  
 W и Nb соответственно, 8 – подложкодержатель

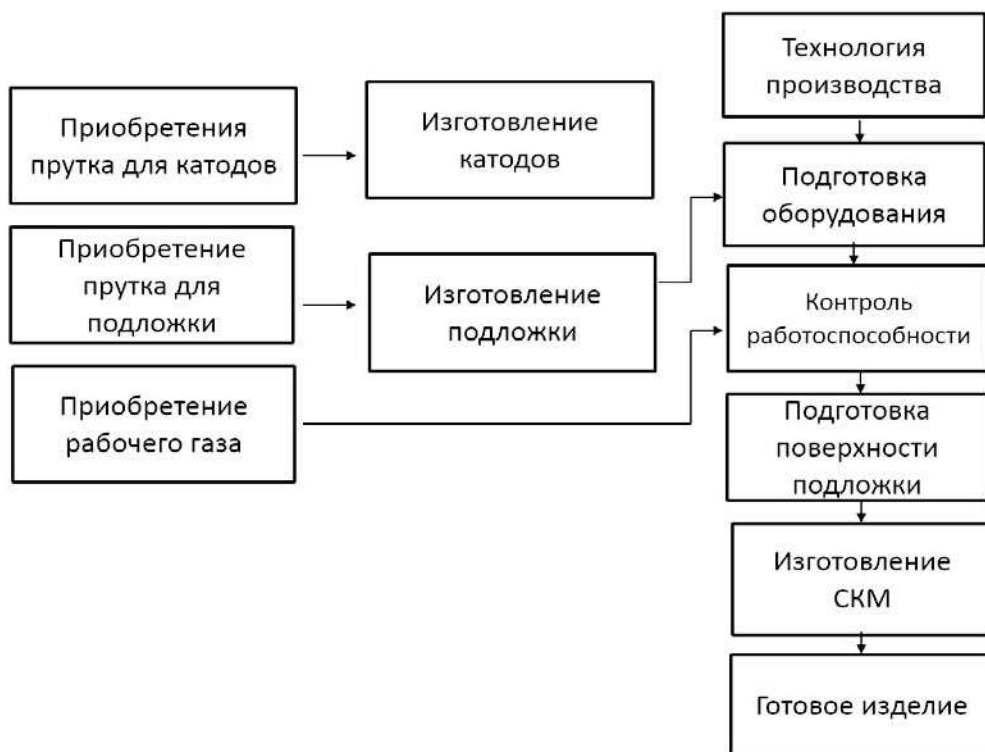
Методы физического осаждения активно используются для получения металлических покрытий. Магнетронное напыление получило широкое применение для получения тонких пленок в микроэлектронике, получения износостойких покрытий, напыления керамических материалов и др. Основным достоинством метода является отсутствие капель при напылении. Благодаря этому возможно получать плотные многослойные композиции и различных материалов. Поэтому целесообразно использовать данный метод для получения оболочечных конструкций. Основным недостатком метода является низкий коэффициент использования материала (КИМ) порядка 10–20%. Для повышения КИМ разработана схема напыления в кольцевых магнетронах (рис. 1). Повышение КИМ обеспечивается за счет осаждения напыляемого материала на противоположных стенках катода. Данная схема напыления реализована в экспериментальной установке МРМ1 (рис. 2).



**Рисунок 2 – Общий вид экспериментальной установки МРМ1**

Используя процессный подход как один из основополагающих методологических подходов в управлении качеством нами разработана модель подготовительных и технологических процессов получения слоистых композиционных материалов (рис. 3).

К группе подготовительных процессов относится приобретение материалов с последующим изготовлением из них катодов и подложки. К II группе относится непосредственно технология производства, где контролируется каждый этап для изготовления качественного готового изделия.



**Рисунок 3 – Модель подготовительных и технологических процессов получения слоистых композиционных материалов**

Одним из ключевых процессов получения слоистых композиционных материалов является технология производства. Предлагается выделять следующие этапы технологии производства слоистых композиционных материалов:

1 Предварительная подготовка поверхности напыления.

Поверхностью, требующей обработки, является поверхность технологической оправки при получении конструкционного металлокомпозиата или поверхность детали при получении на ней слоистого композиционного покрытия.

Цель подготовки поверхности – удаление следов масла и прочих загрязнений, которые при напылении могут служить промежуточным слоем, уменьшающим адгезию (сцепление покрытия и основы).

Подготовка проводится механическим удалением загрязнений и химическим обезжириванием. Покрываемую поверхность тщательно очищают и обезжиривают, в основном, в органических растворителях (нефрас, трихлорэтилен, четыреххлористый углерод, ацетон и др.).

Растворители могут применяться в сочетании с ультразвуковыми колебаниями. Ультразвуковой метод очистки позволяет осуществить быструю и высококачественную очистку изделий сложной конфигурации.

После обезжиривания поверхность просушивают.

2 Размещение технологических оправок или деталей в рабочей камере установки для вакуумного напыления.

Размещение и крепление оправок или деталей производится в соответствии с технологическим оснащением вакуумной камеры установки. Для напыления материалов на поверхности типа тел вращения, как правило, предусмотрен планетарный механизм перемещения, обеспечивающий вращение оправки или детали вокруг своей оси при напылении.

3 Герметизация и вакуумирование рабочей камеры установки.

Быстрая откачка воздуха из рабочих камер является важной характеристикой производительности процесса вакуумного напыления с учетом необходимости создания достаточно разреженной атмосферы, как правило, не ниже  $1 \cdot 10^{-4}$  Па. Наряду с заключенным в откачиваемой камере воздухом необходимо удалить пленки влаги и адсорбированных газов на напыляемых поверхностях и поверхности стенок камеры.

Существуют разнообразные схемы откачки, как по количеству, так и по типам насосов, применяемых в различных установках.

4 Очистка и активация поверхности перед напылением физическими методами.

Для улучшения адгезионного взаимодействия поверхности напыления с осаждаемым материалом в зависимости от применяемого метода напыления и возможностей оборудования непосредственно перед напылением в рабочей камере могут быть проведены следующие мероприятия:

- подогрев технологических оправок или деталей;
- очистка напыляемых поверхностей в плазме тлеющего разряда рабочего газа (аргона) от адсорбированной, так называемой мономолекулярной влаги, которая прочно связана поверхностными силами сцепления и не удаляется химическими способами;
- очистка поверхности напыления за счет бомбардировки ионами, образующимися при высоковольтном дуговом разряде в парах напыляемого материала.

5 Послойное напыление тугоплавких жаропрочных исходных компонентов.

Проводится поочередное напыление требуемого количества слоев тугоплавких жаропрочных исходных компонентов, для формирования слоистого композиционного материала на поверхности технологической оправки, или системы слоев, формирующих жаростойкое защитное покрытие на поверхности деталей высокотемпературных изделий.

б Извлечение напыленных изделий из рабочей камеры.

По окончании напыления изделия охлаждают в вакууме и после напуска воздуха в камеру, снимают с посадочных мест.

Для проведения эксперимента изготовлены кольцевые катоды из ниобия сплава Nb5VMЦ, вольфрама марки ВЧ и иридия с чистотой 99,98%. (рис. 4). В качестве материала оправки выбрана бронза сплава БРаж-10 с минимальным содержанием олова. Перед напылением оправку промывали в ультразвуковой ванне в нефрасе для очистки от масляных загрязнений.



Рисунок 4 – Кольцевые катоды, где а – вольфрам, б – ниобий, в – иридий

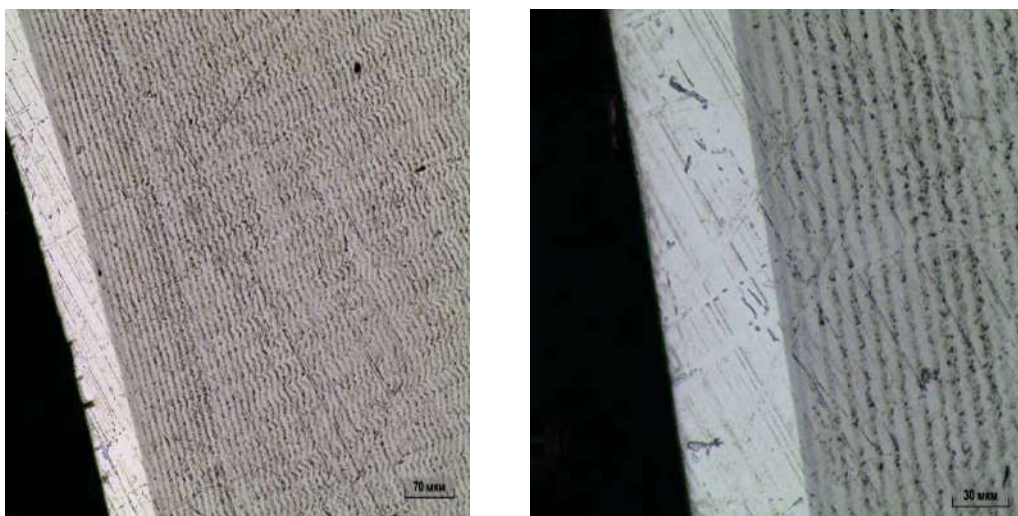
После промывки, оправку устанавливали в подложкодержатель установки и проводили вакуумирование до остаточного давления  $10^{-4}$  Па. Для повышения адгезии перед напылением проводили ионную очистку при давлении аргона 5 Па и напряжении на оправке 1100 В в течение 30 минут. Далее осаждали слой иридия при давлении 0,2 Па и токе на катоде 1 А в течение 60 минут. Затем проводили формирование силового корпуса путем поочередного осаждения слоев вольфрама и ниобия. Вольфрам наносили при давлении аргона 0,2 Па, при токе на катоде 1 А в течение 10 минут, а ниобий при давлении аргона 0,2 Па, при токе на катоде 1 А в течение 15 минут. В общей сумме нанесено 105 пар слоев вольфрама и ниобия. По окончании процесса оправка остывала в течение 24 часов, после чего проводили химическое травление оправки в растворе солей  $\text{CuSO}_4$  и  $\text{NaCl}$  смешанных в соотношении 1:3 соответственно. Травление проводилось в течение 48 часов при температуре  $100^\circ\text{C}$ . После удаления оправки получилась готовая оболочечная конструкция с внутренним защитным покрытием, не нуждающаяся в последующей механической обработке (рис. 5).





**Рисунок 5 – Оболочечная конструкция из Ir–W–Nb**

В настоящее время для оценки качества полученной конструкции применяются внешний осмотр и исследование микроструктуры на оптическом микроскопе. При внешнем осмотре оболочечной конструкции не обнаружено сколов, трещин и внешних дефектов на поверхности. Для более детального исследования изготавливали шлиф. Исследование проводили на оптическом микроскопе при увеличении  $\times 200$  и  $\times 500$  раз (рис. 6).



а

б

**Рисунок 6 – Микроструктура оболочечной конструкции Ir–W–Nb при увеличении а –  $\times 200$  и б –  $\times 500$ .**

На микроструктуре отчетливо видна слоистая структура, отсутствуют перемешивание слоев и расслоения. Толщина защитного покрытия из иридия составила примерно 50 мкм, а толщины слоев W и Nb 4,5 и 7 мкм соответственно. Рассмотрена зона между иридиевым покрытием и слоистым материалом (рис. 6 б). Отчетливо видно образование диффузионного слоя между покрытием и слоистым металлокомпозитом.



Однако, для научного обоснования характеристик режимов необходимы математические зависимости показателей качества изделий от показателей технологических операций на всех этапах производства композиционного материала. Для этого необходимо разработать систему количественных показателей качества, включающую показатели качества исходного материала и показатели качества технологических процессов. Нами разработана концептуальная модель такой системы (рис. 7).

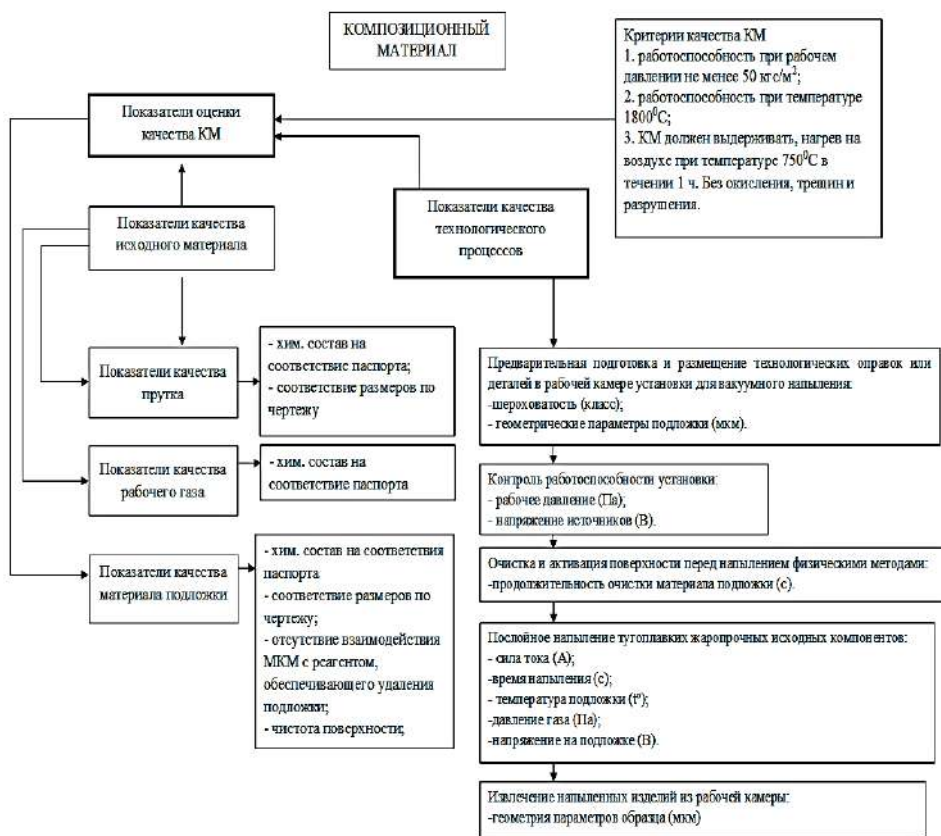


Рисунок 7 – Концептуальная модель системы количественных показателей качества получения композиционного материала

Разработана технологическая схема осаждения тугоплавких материалов с использованием кольцевых магнетронов. Изготовлена экспериментальная установка МРМ1 для ее реализации. Выбраны материалы для получения оболочечной конструкции с защитным покрытием. Получен образец оболочечной конструкции с внутренним жаростойким покрытием из иридия и силовым корпусом из слоистого металлокомпозита вольфрам-ниобий. Таким образом, подтверждена работоспособность данной технологии и показана ее

перспективность для получения изделий типа тел вращения со сложной геометрической формой из труднообрабатываемых тугоплавких материалов.

Разработана концептуальная модель системы количественных показателей качества получения композиционного материала, которая позволяет не только численно оценивать показатели качества изделий, но и получать математические зависимости данных показателей от показателей технологических режимов на всех этапах производства, а, следовательно, обосновывать оптимальные параметры данных режимов.

#### *Литература*

1. Балякин А.В., Смелов В.Г., Чемпинский Л.А. Применение аддитивных технологий для создания деталей камеры сгорания // Вестник СГАУ. 2012. № 3 (34). с 47–51.
2. Чумаков Д.М. Перспективы использования аддитивных технологий при создании авиационной и ракетно-космической техники // Электронный журнал «Труды МАИ». № 78.
3. Ленковец А.С., Моргунов С.В. Получение слоистых металлических композиционных материалов на основе сталей методом ионно–плазменного напыления // Перспективные материалы. 2011. В. 11. С. 370–372.
4. Лозован А.А., Ленковец А.С., Щитов Н.Н., Моргунов С.В. Ионно–плазменное оборудование для формирования наноструктурных упорядоченных покрытий в машиностроении и инструментальной промышленности // Технология машиностроения. 2012. № 8. С. 20–23.
5. Тимофеев Н.И., Ермаков А.В., Дмитриев В.А., Панфилов П.Е. Основы металлургии и технологии производства изделий из иридия // Екатеринбург УрОРАН. 1996 г.
6. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Том 3, книга 1 // Москва, машиностроение. 2001 г.

УДК 621.763

**Покрyтия из карбида кремния, полученные пиролизом  
монометилсилана, на реакционно-связанном карбиде кремния**

**Н.В. Ларионов**, аспирант кафедры управления качеством и стандартизации,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области  
«Технический университет», г. Королев, Московская область

*Одним из направлений применения SiC является его использование для изготовления оптических блоков телескопов наземного и космического базирования. Из всех известных технологий практическое значение для изготовления крупногабаритных изделий имеет технология реакционного спекания. Метод заключается в формировании заготовки из порошкообразного карбида кремния с углеродом, с последующей пропиткой расплавленным кремнием. Одной из основных проблем при этом остаётся обеспечение равномерной чистоты поверхности. В настоящей работе методами оптической и сканирующей микроскопии были изучены покрытия на поверхности полированных пластин.*

Покрyтие из карбида кремния, пиролиз ММС, реакционно-связанный карбид кремния.

**The coverings from silicon carbide received by pyrolysis  
of monomethylsilane on the reactionary and connected carbide of silicon**

**N.V. Larionov**, graduate first year of the Department of quality  
management and standardization,  
State Educational Institution of Higher Education  
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

*One of the directions of application of SiC is its use for production of optical blocks of telescopes of land and space basing. From all known technologies for production of large-size products the technology of reactionary agglomeration has practical value. The method consists in forming of procurement from powdery carbide of silicon with carbon, with the subsequent impregnation by the melted silicon. One of the main problems at the same time remains ensuring uniform purity of a surface. In this work as methods of the optical and scanning microscopy coverings on a surface of the polished plates were studied.*

Covering from silicon carbide, pyrolysis of a MMS, the reactionary and connected carbide silicon.

Карбид кремния – уникальный по набору свойств материал и поэтому

находит широкое применение в технике [5, 2]. Карбид кремния обладает физико-механическими свойствами, превосходящими аналогичные характеристики большинства известных материалов. Широко применяются карбидокремниевые изделия, использующие химическую инертность карбида кремния в агрессивных средах в широком диапазоне температур [4].

Еще одним перспективным направлением применения SiC является его использование для изготовления оптических блоков телескопов наземного и космического базирования, включающих в себя крупногабаритные облегчённые зеркала, главный шпангоут, несущие фермы, элементы космических платформ и т.д. [8].

Карбид кремния – соединение с преимущественным ковалентным типом химической связи. Такой тип связи отличается наибольшей прочностью. Ковалентный характер и высокая прочность связи определяют энергетическую и механическую прочность карбида кремния. Ковалентный тип химической связи определяет и низкую диффузионную подвижность атомов карбида кремния, что создает главную технологическую проблему при получении керамического карбида кремния методами порошковой металлургии. Процесс спекания порошка чистого карбида кремния не позволяет получить плотное изделие.

Относительно плотные изделия из карбида кремния можно получить горячим прессованием порошка с добавками алюминия и бора. Однако получить материал без пор не удастся, а примеси снижают прочность и теплопроводность. Кроме того, имеются существенные ограничения в размерах изделия.

Из всех известных технологий практическое значение для изготовления крупногабаритных изделий имеет технология реакционного спекания. Метод заключается в формировании заготовки из порошкообразного карбида кремния с углеродом, с последующей пропиткой расплавленным кремнием при температуре 1550 – 1800 °С в инертной среде или в вакууме. При этом углерод растворяется в расплавленном кремнии. После образования насыщенного раствора углерода в кремнии из раствора выделяется вторичный карбид кремния. Этот процесс приводит к образованию непрерывного карбидокремниевых каркаса с равномерно распределенной в нем кремниевой фазой [1, 6, 10, 7].

Размеры изделия ограничены рабочим объемом термического оборудования. Изготовление крупногабаритных изделий высокого качества из материалов на основе карбида кремния – сложная технологическая задача. Ее решение стало возможным благодаря комплексному изучению физических явлений, лежащих в основе базовых технологических операций. На основе этих исследований был разработан ряд технологических приемов и принципиально новых решений, которые позволили получить реакционно-связанный карбид кремния высокого качества. Среди них наибольший интерес представляют следующие: разработка приемов подготовки исходного порошка карбида кремния, позволяющих повысить его смачиваемость расплавленным крем-

нием; оптимизация рецептуры исходной шихты с целью ускорения образования вторичного карбида кремния и исключения из получаемого материала свободного углерода; разработка приемов введения расплавленного кремния в пористую заготовку, обеспечивающих сохранение капиллярного давления, достаточного для заполнения субмикронных пустот расплавленным кремнием.

Несмотря на высокий, достигнутый на сегодняшний день, уровень технологии получения качественного реакционно–связанного карбида кремния, одной из основных проблем при этом остаётся обеспечение равномерной чистоты поверхности. Это обусловлено структурой получаемого реакционно–связанного карбида кремния, которая формируется при спекании. Данная проблема может быть решена путём нанесения слоя карбида кремния методом химического осаждения из газовой фазы на поверхность полированной заготовки из реакционно–связанного карбида кремния.

В настоящей работе методами оптической и сканирующей микроскопии были изучены покрытия на поверхности полированных пластин диаметром 150 мм, изготовленных из реакционно–связанного карбида кремния (рис. 1).



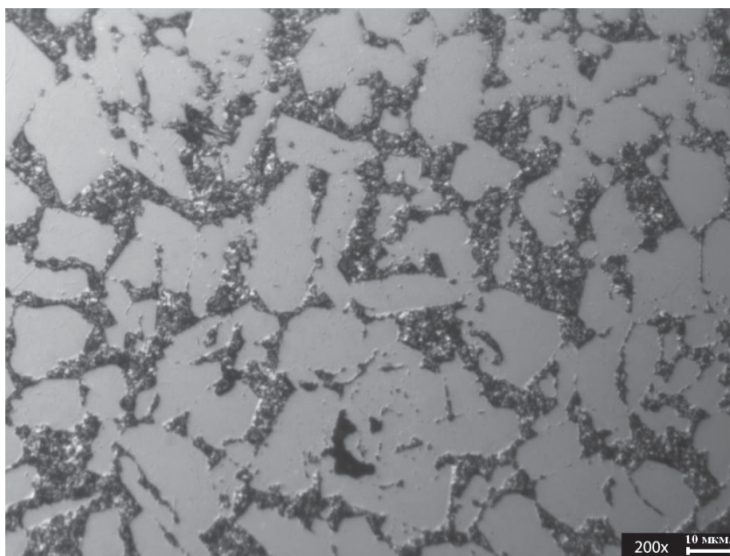
**Рисунок 1 – Полированная пластина из реакционно–связанного карбида кремния для осаждения карбида кремния**

Покрyтия получали методом химического осаждения из газовой фазы. В качестве исходного реагента использовали монометилсилан. Известно, что высокое качество оптической поверхности требует совпадения коэффициентов термического расширения покрытия и подложки. Проведенные исследования зависимости коэффициента термического расширения полученного реакционно–связанного карбида кремния позволили установить, что его значе-

ния в интервале температур 20-300 °С находятся в пределах  $2,5-3,5 \times 10^{-6}$  1/К. С другой стороны, ранее было установлено, что кристаллическая структура карбида кремния, осаждаемого из газовой фазы, характеризуется небольшой преимущественной ориентацией. Это может служить фактором, повышающим коэффициент линейного расширения покрытия в плоскости, параллельной плоскости подложки. При этом возникает проблема термомеханического согласования материалов покрытия и подложки, имеющих различную природу.

С учетом этих обстоятельств использование метилсилана в процессе нанесения слоев на поверхность подложек из реакционно-связанного SiC обеспечивает ряд преимуществ. Так, поскольку получение карбида кремния из метилсилана осуществляется при температурах значительно более низких, чем для хлорсодержащих реагентов [10], то это не приводит к значительным различиям в размерах покрытия и подложки при последующем охлаждении и позволит снизить вероятность растрескивания покрытия. Кроме этого, низкотемпературный процесс осаждения карбида кремния более легко может быть применен для нанесения покрытий на крупногабаритные заготовки зеркал.

На рисунке 2 представлена структура поверхности исходной полированной пластины из реакционно-связанного карбида кремния, которую использовали в качестве подложки для нанесения покрытия. Изображение получено с помощью оптического микроскопа.



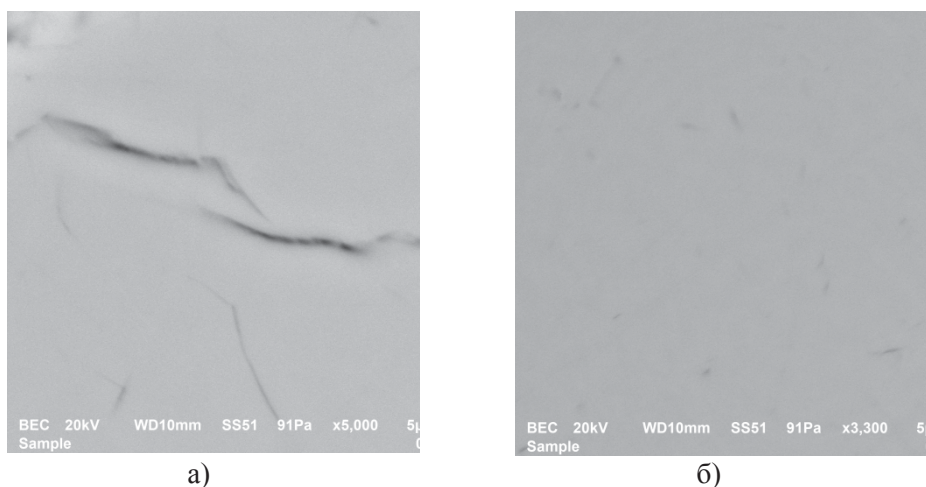
**Рисунок 2 – Структура поверхности исходной полированной подложки из реакционно-связанного карбида кремния**

Из снимка следует, что ввиду неоднородной структуры материала, состоящей из зерен карбида кремния и связки, существует трудность в достиже-



нии шероховатости оптической поверхности, позволяющей работать на длинах волн ниже ИК–диапазона.

На рисунке 3 представлена структура поверхности покрытия из карбида кремния, осажденного из метилсилана на подложку из реакционно–связанного карбида кремния. Изображение получено с помощью сканирующего электронного микроскопа. На снимках видно, что в структуре поверхности могут присутствовать дефекты различных типов. К первому типу можно отнести трещины, появившиеся, по–видимому, при охлаждении вследствие различия коэффициентов термического расширения покрытия и подложки. Второй тип – сколы и впадины (cavity) размером менее 1 мкм, которые могли возникнуть вследствие процесса шлифования.

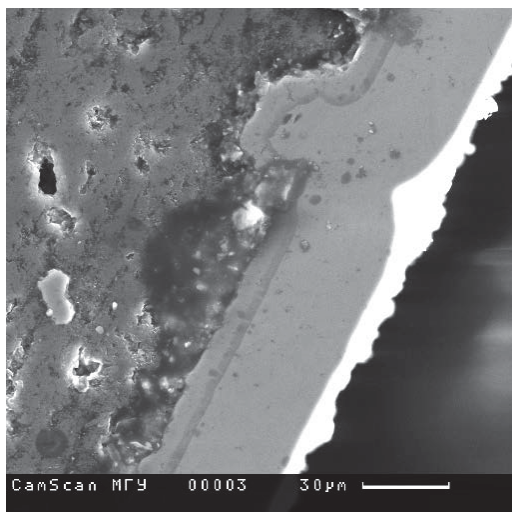


**Рисунок 3 – Структура поверхности покрытия на подложке в различных областях:**

**а – термоусадочные трещины; б – микродефекты малой протяженности**

Полученные результаты свидетельствуют о том, что, несмотря на низкие температуры процесса, избежать растрескивания покрытия, являющегося причиной различия коэффициентов термического расширения подложки и покрытия, не удаётся. По характеру трещин можно заключить, что коэффициент термического расширения SiC покрытия заметно выше. Так, для слоев карбида кремния, полученных осаждением из метилсилана на графите таких трещин обнаружено не было. На рисунке 4 представлено изображение поперечного шлифа графитовой подложки с нанесенным покрытием из карбида кремния.

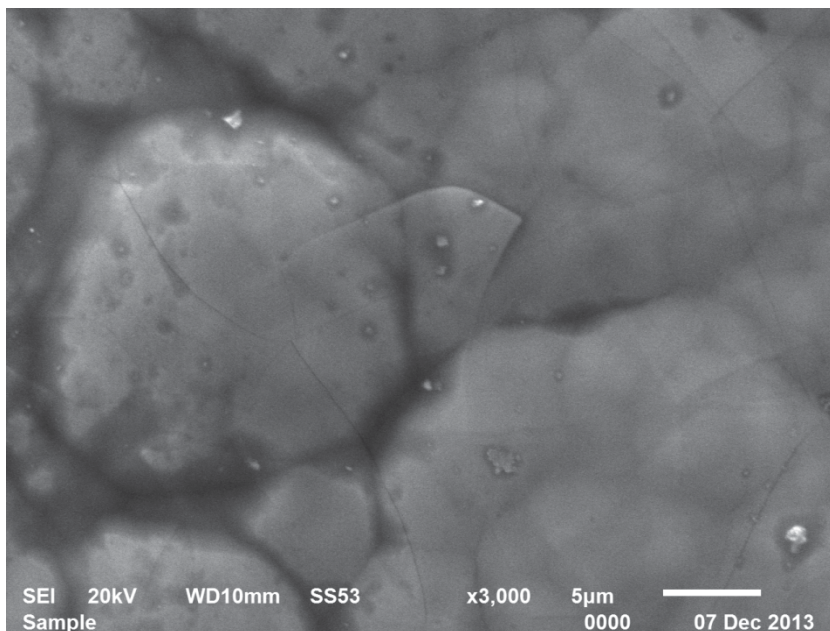




**Рисунок 4 – Поперечный шлиф графитовой подложки с карбидокремниевым покрытием, осажденным из метилсилана**

Из этого следует, что карбид кремния, осаждаемый из метилсилана, имеет хорошее согласование по термомеханическим характеристикам с графитом, для которого значения коэффициента термического расширения может достигать  $6-8 \times 10^{-6} 1/K$ , что существенно выше, чем для реакционно-вязанного карбида кремния.

Так же был проведен эксперимент по осаждению газофазного карбида кремния на пластины из титана. На рисунке 5 представлены снимки структуры поверхности, сделанные с помощью сканирующего электронного микроскопа.



**Рисунок 5 – Структура поверхности покрытия на подложке титана**

Поверхность покрытия не была отшлифована, поэтому нельзя судить о возможном появлении микродефектов возникающих от шлифования. Но на снимке хорошо видно, что размер термоусадочных трещин значительно снизился по сравнению с покрытием на подложке из реакционно-связанного карбида кремния, т.к. КТР титана более близок к газофазному карбиду кремния.

Таким образом, основным выводом, который можно сделать из проведенного исследования, является то, что КТР материала подложки должен соответствовать КТР покрытия, осаждаемого из ММС. Т.е. для нанесения газофазного карбида кремния на подложку из реакционно-связанного карбида кремния необходим промежуточный слой с близким значением КТР.

#### *Литература*

1. Гнесин Г.Г. Карбидокремниевые материалы // Москва. Металлургия. 1977.
2. Косолапова Т.Я. Карбиды // Москва. Металлургия. 1968.
3. Патент РФ № RU2130509, 20.05.1999. Способ получения композиционного материала // Тимофеев А.Н., Богачев Е.А., Габов А.В., Абызов А.М., Смирнов Е.П., Персин М.И. – опуб. 20.05.1999.
4. Самсонов Г.В. Физико-химические свойства элементов // Киев. Наукова думка. 1965.
5. Францевич И.Н., Гнесин Г.Г., Зубкова С.М. и др. // Карбид кремния, свойства и области применения // Киев. Наукова думка. 1965.
6. Koichi Yamada, Masahide Mohri // Properties and Applications of Silicon Carbide Ceramics, Silicon Carbide Ceramics – 1, Fundamental and Solid Reaction,

- ed. S. Sōmiya, Y. Inomata, Elsevier Applied Science, London and New York, (1991) pp. 13-44.
7. Kohsuke Nakamura, Kunihiro Maeda Hot-pressed SiC Ceramics, Silicon Carbide Ceramics – 2, Gas Phase Reactions, Fiber and Whisker, Joining, ed. S. Sōmiya, Y. Inomata, Elsevier Applied Science, London and New York, (1991) pp. 139-162.
  8. Ljubarsky S.V., Khimich Y.P. Lightweight mirrors for Space Telescopes, Proceedings of SPIE Vol. 2199 (1994) 938-944.
  9. Passing G., Riedel R., Petzow G. Influence of pyridine borane on the sintering behavior and properties of alpha-silicon carbide, Journal of The American Ceramic Society, 74 [3] 642-645 (1991).
  10. Shujie Li, Ying Zhou, Huiping Duan // Wettability and interfacial reaction in SiC/Ni plus Ti system, Journal of Materials Science, 37 (2002), pp. 2575-2579.

УДК 620.172.2

**Разработка оснастки для испытания на сдвиг при высоких температурах образцов из тонкостенных композиционных материалов**

**А.Н. Миронихин**, начальник сектора,  
**Д.С. Лисицын**, ведущий инженер,  
**К.В. Шаньгин**, инженер 2-ой категории,  
ОАО «Композит» г. Королев, Московская область

*Отражены результаты по разработке оснастки для испытаний на сдвиг при высоких температурах образцов из тонкостенных композиционных материалов. Описаны методы, применяемые при расчете, и конструкция разработанной оснастки. Даны схемы, общий вид оснастки. Анализ экспериментальных даны и итоговые графики нагружений образцов из композиционного материала. Разработанное приспособление позволяет проводить испытания образцов, вырезанных из тонкостенных композиционных материалов, на сдвиг в широком диапазоне температур: от комнатной до 2000 °С и более.*

Испытание на сдвиг при высоких температурах, тонкостенные композиционные материалы, оснастка на сдвиг.

**Development of test tools to be used in high temperature shear tests of thin wall composite materials**

**A.N. Mironikhin**, Head of Section,  
**D.S. Lisitsyn**, Leading Engineer,  
**K.V. Shangin**, 2<sup>nd</sup> Category Engineer,  
JSC «Kompozit», Korolev, Moscow region

*The paper outlines the results of the development of the test tools to be used in shear tests of thin-wall composite materials under high temperatures. The calculation methods and the configuration of the newly developed test tools are discussed. Drawings and the general outline of the test tools are shown. Analysis of the experimental data and the stress strain curves obtained for test samples of the thin-wall composite material are presented. With the newly developed test tools, it is possible to perform shear tests of test samples of thin-wall composite materials over a wide temperature range, namely, under RT to 2000 °C and even higher temperatures.*

High temperature shear test, thin-wall composite material, shear test tools.

Тонкостенные композиционные материалы (КМ) применяются при изготовлении многих теплонагруженных конструкций различного рода техники, в том числе и в авиаракетостроении [3]. При проектировании и проведении

прочностных расчётов рассматриваемых конструкций в самом общем случае нагружения необходимо располагать полным набором упругих и прочностных свойств материала в широком диапазоне температур от 20 °С до 2500 °С и более. В то же время корректное определение модуля сдвига и предела прочности при сдвиге в плоскости пластины тонкостенного КМ является трудоёмким процессом при комнатной температуре [1, 2], существующие и широко распространённые методы не пригодны для испытания тонкостенных КМ на сдвиг в плоскости пластины при высоких температурах (до 2000 °С). Решение этих задач обуславливает целесообразность разработки новых методов испытания на сдвиг, а также развития и совершенствования уже существующих. Одним из таких методов, подлежащих модификации, является метод испытания на сдвиг тонкостенных КМ, разработанный и внедрённый в ОАО «Композит».

Схема рассматриваемого метода испытания приведена на рисунке 1. Оснастка, включающая нижнюю опору и нагружающий индентор, является неохлаждаемой и изготавливается из высокоплотного УУКМ. Образец имеет четыре V-образных выреза, ограничивающих рабочую область. С целью предотвращения кручения и изгиба образца в поперечной плоскости в областях контакта с нижней опорой и нагружающим индентором на образец наклеиваются призматические накладки из УУКМ малой плотности (рис. 1). При этом клей должен обеспечивать надёжность соединения образца и накладки в широком диапазоне температур.

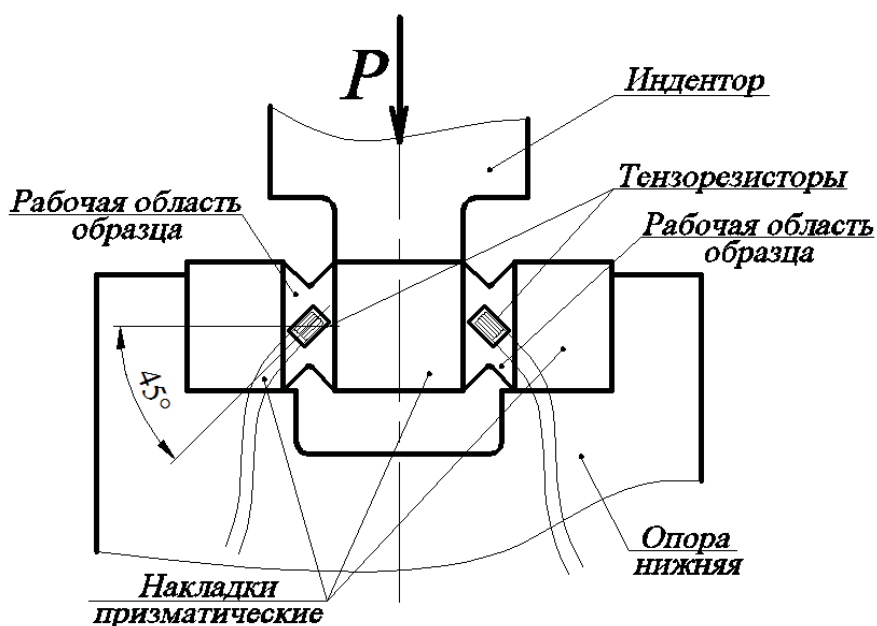


Рисунок 1 – Схема метода испытаний на сдвиг образца из тонкостенного КМ

При испытании образца на сдвиг согласно рассматриваемому способу предел прочности  $\tau_{сдв}$  определяется по следующей формуле [4]:

$$\tau_{СДВ} = \frac{P_p}{s_1 \cdot h_1 + s_2 \cdot h_2} \quad [\text{МПа}], \quad (1)$$

где  $P_p$  [Н] – усилие, соответствующее разрушению образца;

$s_1$  и  $s_2$  [мм] – толщины рабочего сечения образца;

$h_1$  и  $h_2$  [мм] – высоты рабочего сечения образца.

Для определения модуля сдвига при комнатной температуре и построения диаграммы деформирования образца при сдвиге « $\tau_{СДВ} - \gamma_{СДВ}$ » в рабочей области под углом  $45^\circ$  к продольной оси образца наклеиваются тензорезисторы (рис. 1). Деформация сдвига  $\gamma_{СДВ}$  определяется по следующей формуле [4]:

$$\gamma_{СДВ} = \left| \varepsilon_{45}^- \right| + \left| \varepsilon_{45}^+ \right| \quad [-], \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{45}^+$  и  $\varepsilon_{45}^-$  [-] – соответственно деформации растяжения и сжатия, измеренные тензорезисторами.

Для линейного участка диаграммы деформирования « $\tau_{СДВ} - \gamma_{СДВ}$ » модуль сдвига  $G$  вычисляется по следующей формуле:

$$G = \frac{\Delta \tau_{СДВ}}{\Delta \gamma_{СДВ}} \quad [\text{МПа}]. \quad (3)$$

Определение модуля сдвига при высоких температурах осуществляется косвенным пересчётом с использованием значений модуля сдвига при комнатной температуре и диаграмм нагружения образца « $\tau_{СДВ} - \nu$ ». Здесь  $\nu$  [мм] является перемещением траверсы испытательной машины.

Таким образом, данный способ позволяет определять упругие и прочностные свойства тонкостенных КМ в широком диапазоне температур. Тем не менее, метод имеет существенные недостатки:

- использование наклеиваемых накладок из УУКМ и соответственно высокотемпературного клея повышает стоимость и трудозатраты при изготовлении образцов;
- уменьшается технологичность испытания в целом: помимо точности механической обработки при изготовлении образца появляется влияние на результат испытания качества клеевого соединения накладок и образца; так в процессе испытания при  $1500^\circ\text{C}$  и более высоких температурах происходит отслоение накладок и, как следствие, занижение прочностных свойств КМ;
- использование накладок при испытании образцов при комнатной температуре ограничивает тип применяемых тензорезисторов, сильно усложняет их монтаж в рабочей области образца (рис. 1);
- геометрия нижней опоры слабо препятствует изгибу и скручиванию образца: боковая связь является односторонней (рис. 1) и лишь частично ограничивает поворот торцевых поверхностей образца.

Все вышеперечисленные недостатки были учтены при разработке оснастки нового типа, позволяющей испытывать образцы из тонкостенного КМ на сдвиг без использования накладок.

Схема установки образца в испытательное приспособление нового типа представлена на рисунке 2. Опора и нагружающий индентор являются неохла-

ждаемыми и изготавливаются из высокоплотного УУКМ. С целью повышения жёсткости нагружающего приспособления опора конструктивно выполнена в виде замкнутого контура. На верхней грани опоры имеется щелевидный паз шириной 4,5 мм, предназначенный для установки испытываемого образца внутри опоры в рабочее положение.

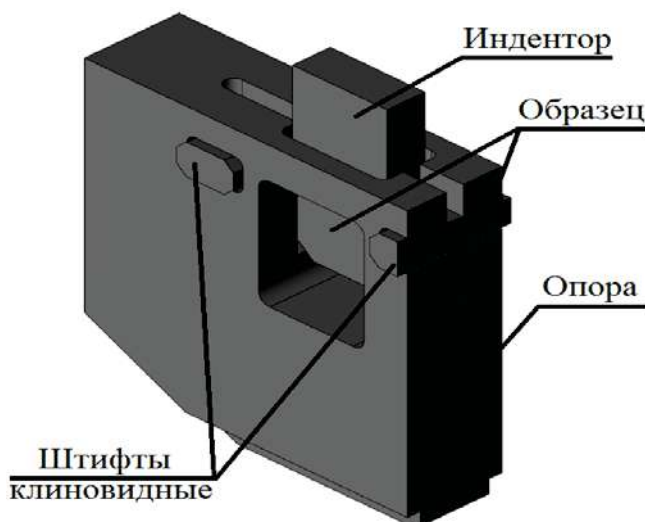


Рисунок 2 – Схема установки образца в испытательное приспособление нового типа

Для улучшения позиционирования тонкостенного образца в процессе нагружения допускается устанавливать между образцом и внутренними поверхностями опоры центрирующие прокладки, изготовленные из тонколистового углеродного материала «Графлекс». Для фиксации образца в рабочем положении используются два клиновидных штифта с малым углом клиновидности. Каждый штифт, зажимая концевую часть образца, имитирует защемление. Штифты изготовлены из УУКМ, причём материалы опоры и клиньев отвечают требованиям совместной работы:

- материалы опоры и штифтов должны обладать близкими значениями технических коэффициентов линейного расширения;
- с целью износа в контактной паре «опора – штифт» менее материалоёмкой и более простой в изготовлении детали Штифт, твёрдость и соответственно плотность материала клина должны быть меньше твёрдости и плотности материала опоры.

При испытании тонкостенного образца на сдвиг с применением данной оснастки прочностные и упругие свойства КМ определяются аналогично ранее рассмотренной методике: для вычисления предела прочности, сдвиговых деформаций и модуля сдвига используются соответственно формулы (1), (2) и (3). Благодаря отсутствию наклеиваемых накладок данный способ лишён свя-



занных с этим недостатков. Так для определения деформаций могут использоваться тензорезисторы с более крупной мерной базой, в частности, тензорезисторы с базой, составляющей 10 мм.

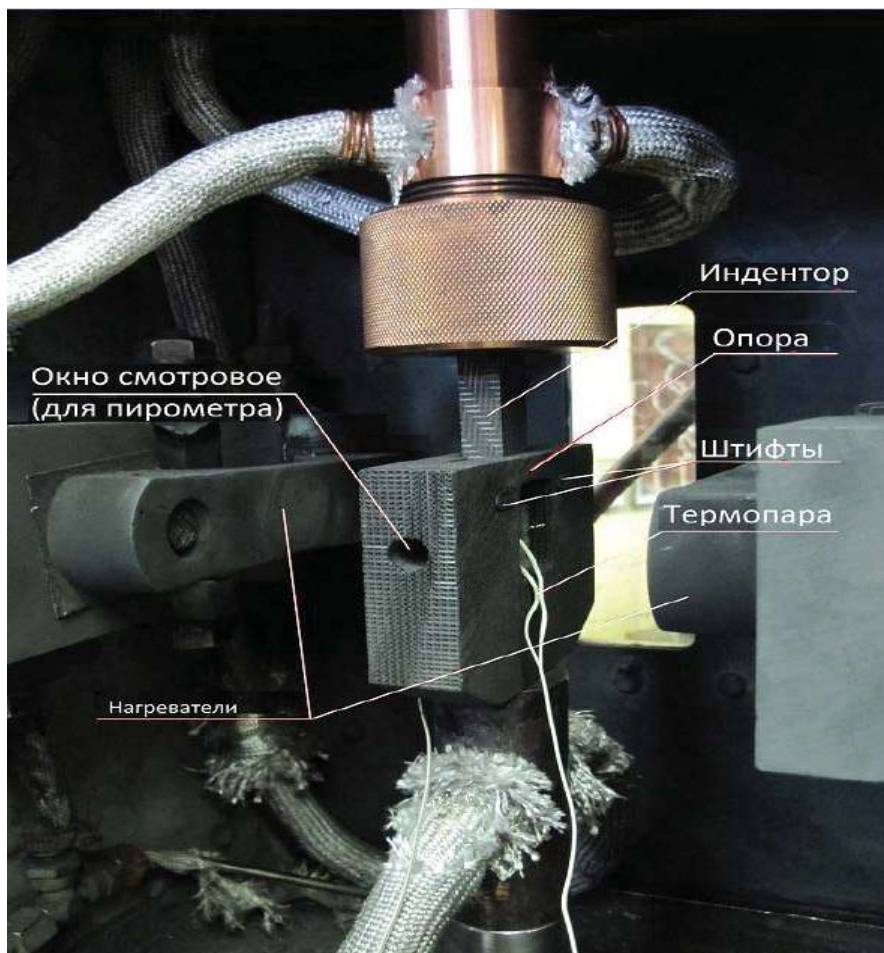


Рисунок 3 – Общий вид оснастки с установленными образцом и термопарой

При нагреве образцов контроль температуры осуществляется вольфрам–рениевой термопарой (типа А–2), установленной непосредственно в рабочей области образца, либо пирометром (рис. 3). Опора имеет два смотровых окна, симметрично расположенных в боковых стенках и предназначенных для наведения пирометра на торцевую поверхность испытываемого образца. Анализ результатов калибровочного нагрева образца, изготовленного из модельного УУКМ, с одновременным измерением температуры пирометром и термопарой свидетельствует о разности в показаниях пирометра и термопары. Таким образом, для температурного поля вдоль продольной оси образца характерна

некоторая неоднородность, обусловленная особенностями системы нагрева. При испытании партии из пяти и более образцов при температурах 1500 °С и выше целесообразно в качестве средства измерения температуры использовать пирометр, учитывая при этом температурные поправки, полученные при проведении калибровочного нагрева одного из образцов партии.

При разработке рассматриваемой оснастки было проведено моделирование механического нагружения образца (рис. 4). При этом решалась плоская задача теории упругости с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в физически и геометрически линейной постановке. Кроме того, не учитывалась контактная нелинейность в областях сопряжения «образец – индентор» и «образец – опора». С учётом симметрии образца и нагружения задача решалась для половины образца (рис. 4), в качестве конечных элементов использовались 4-х узловые конечные элементы. Общее количество элементов и узлов при дискретизации расчётной области составило соответственно 3731 и 3864.

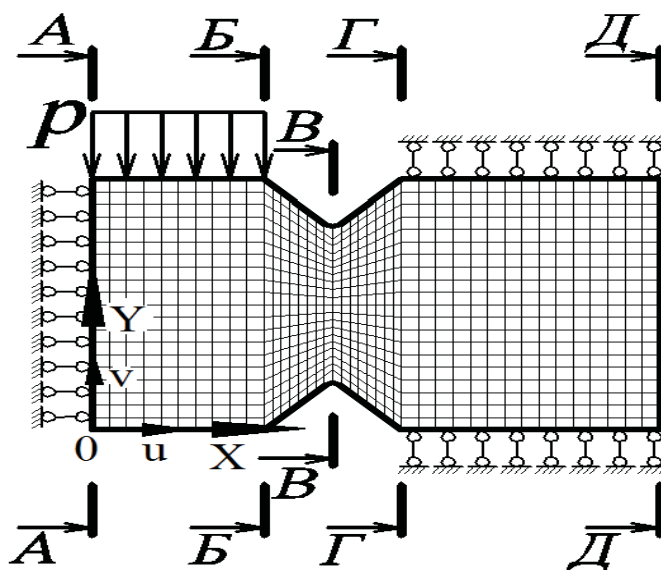


Рисунок 4 – Расчётная схема механического нагружения образца

При решении задачи задавались следующие граничные условия (рис. 4):

$$x=0: u(y) = 0, \quad (4)$$

где  $u$  [мм] – горизонтальное перемещение;

$$x \geq 18; y = 0: v(x) = 0, \quad (5)$$

где  $v$  [мм] – вертикальное перемещение;

$$20,5 \geq x \geq 30,5; y = 20: v(x) = 0; \quad (6)$$

$$x \leq 10; y = 20: p(x) = 10, \quad (7)$$

где  $p$  [МПа] – нагружающее образец давление.

Материал образца принимался ортотропным, используемые при расчёте и характерные для испытываемых КМ значения технических констант упругости приведены в таблице 1. Вариант № 1 соответствуют механическим свойствам образцов, вырезанных из исследуемых композиционных материалов в направлениях армирования, вариант № 2 типичен для образцов, вырезанных в плоскости армирования под углом  $45^\circ$  к армирующим элементам, в частности, для слоистых композитов под углом  $45^\circ$  к основе и утку.

На основании полученных при расчёте результатов был проведён анализ напряжённо–деформированного состояния образца при его нагружении на сдвиг в упругой области. Исследованы распределения нормальных  $\sigma_x$  и касательных  $\tau_{xy}$  напряжений по высоте образца для различных сечений, указанных на рисунке 4. Эпюры нормальных  $\sigma_x$  и касательных  $\tau_{xy}$  напряжений для некоторых сечений приведены соответственно на рисунках 5а и 5б.

**Таблица 1 – Технические константы упругости КМ**

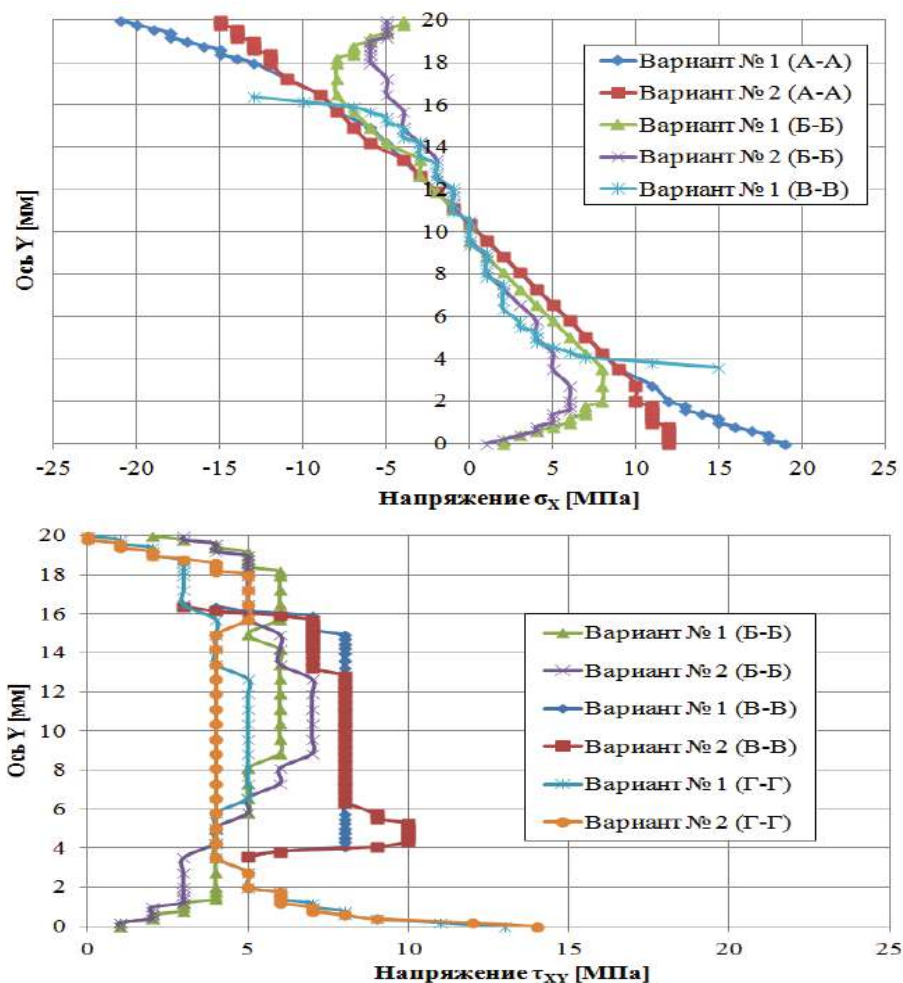
Наименование	Вариант № 1	Вариант № 2
Продольный модуль упругости, $E_x$ [ГПа]	50	26,8
Поперечный модуль упругости, $E_y$ [ГПа]	50	26,8
Модуль сдвига, $G_{xy}$ [ГПа]	9,0	23,8
Коэффициент Пуассона, $\mu_{xy}$ [-]	0,05	0,49

Распределение нормальных  $\sigma_x$  напряжений по высоте образца близко к линейному. Исключение составляют граничные области образца, т.н. области краевого эффекта, где зависимость нормальных  $\sigma_x$  напряжений от поперечной координаты  $Y$  существенно не линейна. В рабочей области образца (сечение В–В на рисунке 4), вне граничных областей, касательные  $\tau_{xy}$  напряжения близки к постоянному значению. Равномерность распределения касательных  $\tau_{xy}$  напряжений по высоте рабочего сечения обуславливает корректность используемой для определения касательных  $\tau_{xy}$  напряжений формулы (1).

В целом, наличие нормальных  $\sigma_x$  напряжений свидетельствует об изгибе образца и об отсутствии области чистого сдвига. Однако, рассматриваемая схема испытания образцов, вырезанных из тонкостенных КМ, на сдвиг обеспечивает приемлемую точность определения упругих, прочностных и деформационных свойств КМ, так как в центре рабочей области образца (сечение В–В), где касательные  $\tau_{xy}$  напряжения максимальны и постоянны, нормальные  $\sigma_x$  напряжения пренебрежимо малы и не оказывают существенного влияния на определяемые свойства.

С целью отработки спроектированной оснастки была проведена серия испытаний модельного тонкостенного УУКМ со схемой армирования 2D при комнатной температуре, при  $1000^\circ\text{C}$ ,  $1500^\circ\text{C}$  и  $2000^\circ\text{C}$ . При каждой темпера-

туре было испытано не менее 5 образцов.



**Рисунок 5 – Распределение напряжений в образце:  
а – нормальные  $\sigma_x$  напряжения; б – касательные  $\tau_{xy}$  напряжения**

Образцы вырезались из пластины УУКМ следующим образом: продольная ось образца (ось X на рисунке 4) совпадала с направлением основы армирующей ткани, поперечная ось (ось Y на рисунке 4) – с направлением утка. Для фиксации деформаций при испытании на сдвиг при комнатной температуре использовались тензорезисторы с мерными базами 5 мм и 10 мм, наклеенные под углом  $45^\circ$  к продольной оси образца (рис. 1). Диаграммы деформирования « $\tau_{сдв} - \gamma_{сдв}$ » при испытании на сдвиг образцов, вырезанных из тонкостенного УУКМ, при комнатной температуре приведены на рисунке 6.

При испытании на сдвиг образцов из тонкостенного УУКМ при темпе-

ратурах 1500 °С и 2000 °С прочность материала существенно увеличивалась по сравнению с прочностью материала при комнатной температуре: значение предела прочности на сдвиг  $\tau_{сдв}$  при 2000 °С в 1,5 раза превосходило значение предела прочности на сдвиг при 20 °С. Тем не менее, образцы во всем диапазоне температур разрушались в рабочей области с образованием характерной поперечной трещины. На рисунке 7 приведены фотографии образцов модельного УУКМ после испытания на сдвиг при различных температурах: верхний образец испытан при 20 °С, образец, расположенный в центре при 1000 °С, нижний образец при 2000 °С.

Из анализа полученных экспериментальных данных можно сделать вывод об их корректности и соответственно о приемлемой работоспособности спроектированной оснастки.

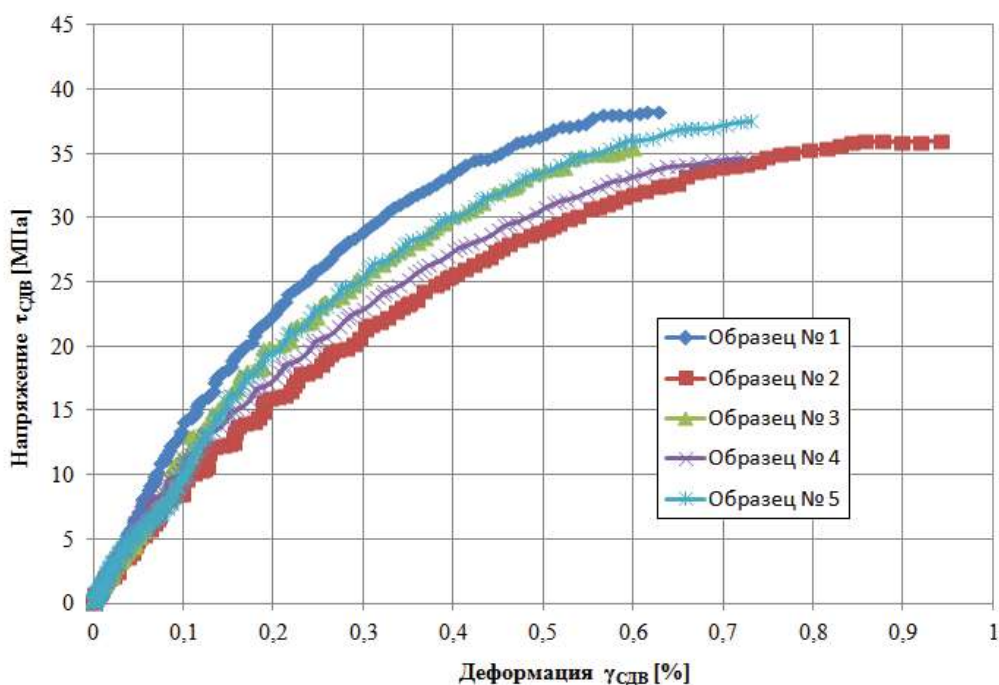


Рисунок 6 – Диаграммы деформирования « $\tau_{сдв} - \gamma_{сдв}$ » при испытании на сдвиг УУКМ при комнатной температуре



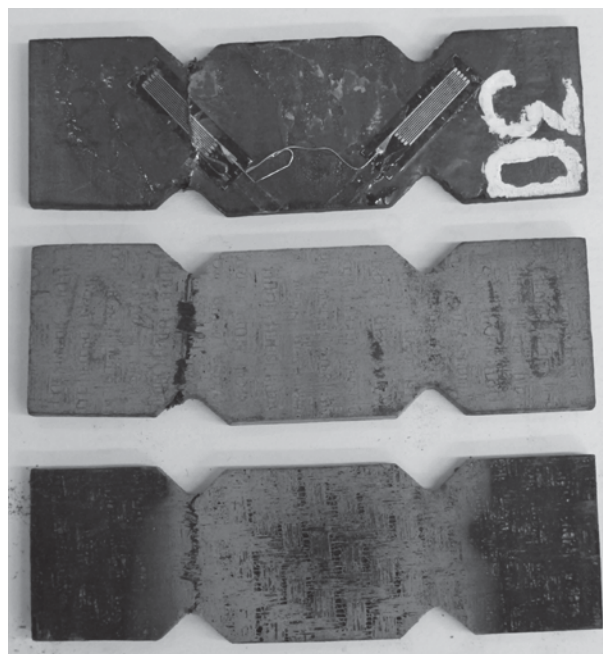


Рисунок 7 – Образцы, вырезанные из УУКМ, после испытания на сдвиг

#### *Заключение*

Разработано приспособление позволяющие проводить испытания образцов, вырезанных из тонкостенных УУКМ и УККМ, на сдвиг в широком диапазоне температур: от комнатной температуры до 2000 °С и более. Данная оснастка позволяет уменьшить стоимость и трудозатраты при изготовлении и подготовке используемых образцов, повысить корректность и технологичность испытания на сдвиг тонкостенных КМ в целом. В то же время рассматриваемая оснастка не лишена недостатков, главными из которых являются неравномерность поля температур при испытании образцов на сдвиг при высоких температурах, наличие нормальных  $\sigma_x$  напряжений и, как следствие, малость рабочей области, где напряженно-деформированное состояние образца близко к чистому сдвигу. Однако результаты расчётов и корректность полученных экспериментальных данных свидетельствуют об удовлетворительной работоспособности спроектированной оснастки.

#### *Литература*

1. Браутман Л., Крока Р., Дж. Сендецки. Механика композиционных материалов // М.: Мир. 1978. 568 с.
2. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков / 3-е изд., перераб. и доп. // М.: Химия. 1981. 272 с.

3. Исаев В.Г., Озерский М.Д. Основные направления создания отечественных многоразовых космических систем // Информационно-технологический вестник. № 1(01). 2014. 103с. Стр.34-43.
4. ASMM D 5379/D. Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method. West Conshohocken, PA 1942-2959, United States.



УДК 678.046

**Способы повышения коэффициентов теплопроводности полимеров  
и полимерных композиционных материалов**

**Е.А. Николаева**, начальник группы,  
**А.Н. Тимофеев**, д.т.н., первый заместитель генерального директора,  
**К.В. Михайловский**, к.т.н., начальник отдела,  
Открытое акционерное общество «Композит» (ОАО «Композит»),  
г. Королев, Московская область

*В настоящей статье обобщены данные по исследованиям и разработкам в области повышения теплопроводности полимеров и полимерных композиционных материалов за счет использования теплопроводных частиц и волокон.*

Полимерные композиционные материалы, углеродные волокна, высокотеплопроводные частицы, повышение теплопроводности.

**Methods for increasing the thermal conductivity of polymers  
and polymer composite materials**

**E.A. Nikolaeva**, head of a group,  
**A.N. Timofeev**, doctor of technical sciences, first deputy of general director,  
**K.V. Mikhaylovskiy**, PhD, head of department,  
Joint Stock Company «Kompozit» (JSC «Kompozit»), Korolyov, Moscow region

*This article summarizes data of research and development in the field of increasing the thermal conductivity of polymers and polymer composite materials by using high thermal conductivity particles and fibers.*

Polymer composite materials, carbon fibers, high thermal conductivity particles, the increase of thermal conductivity.

В настоящее время в России активно проводятся работы по созданию перспективных космических средств телекоммуникации, навигации и геодезии на ряде предприятий ракетно-космической отрасли, таких как ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева», АО «НПО имени С.А. Лавочкина», АО «РКЦ «Прогресс», АО «Информационные спутниковые системы» им. М.Ф. Решетнева». В перспективных аппаратах увеличивается доля энергопотребления для полезной нагрузки с 8 кВт (на платформах типа «Экспресс-1000») до 16 кВт (на платформах типа «Экспресс-2000»). Увеличение энергопотребления приводит к необходимости эффективного теплоотвода от работающих приборных блоков, которые в случае перегрева могут работать некорректно. Рациональным способом обеспечения эффективно-

го теплоотвода является применение легких, особо прочных материалов с высокой теплопроводностью. Одним из самых перспективных материалов для элементов теплоотводящих конструкций считается углепластик с повышенной теплопроводностью.

Для определения способов повышения теплопроводности углепластика как вдоль укладки волокон, так и поперек, проведен анализ отечественной и зарубежной литературы.

В части увеличения продольной теплопроводности углепластика применяют следующие основные методы:

– использование углеродного волокна (УВ) на основе каменноугольного пека. В статье [1] показано, что теплопроводность полимерного композиционного материала (ПКМ) на основе УВ из полиакрилонитрила (ПАН) была в пределах 15-20 Вт/(м·К), а теплопроводность ПКМ на основе УВ из пека находилась в пределах 60-150 Вт/(м·К).

– использование УВ, сформованного из расплава полимера, содержащего углеродные нанотрубки (УНТ). Представлено, что добавление 1 вес. % УНТ в исходный прядильный раствор позволило получить УВ с увеличенной на 68% теплопроводностью по сравнению с контрольным УВ на основе стандартного прядильного раствора из ПАН.

– нанесение покрытия карбида кремния (SiC) на УВ. В статье [2] описывается, что изготовлен ПКМ на основе эпоксидного связующего и УВ из каменноугольного пека с покрытием из SiC. При содержании наполнителя 60% теплопроводность данного ПКМ превышала на 38% теплопроводность ПКМ на основе УВ из каменноугольного пека, не имеющего покрытия SiC.

Таким образом, существует несколько основных направлений увеличения продольной теплопроводности углепластика:

- применение УВ на основе пека;
- модифицирование исходного ПАН-волокна с помощью УНТ;
- нанесение теплопроводных покрытий.

Для увеличения поперечной теплопроводности применяются следующие способы:

– использование тканей объемного плетения, изготовленных из УВ на основе пека. Сообщается о том, что теплопроводность углепластика, изготовленного из эпоксидного связующего и углеродной ткани объемного плетения на основе УВ из пека, в 4 раза выше, чем теплопроводность углепластика на основе углеродной ткани полотняного переплетения.

– нанесение покрытия SiC на УВ. Показано, что удельная теплопроводность эпоксидного ПКМ, содержащего 80% УВ на основе ПАН с покрытием SiC, составляла 0,75 Вт/(м·К), что в два раза больше удельной теплопроводности ПКМ на основе УВ из ПАН без покрытия SiC.

– введение нитрида бора (НБ), в том числе ориентированного. В статье [3] исследовали теоретическими и экспериментальными методами теплопроводность полимерных нанокомпозитов, содержащих гексагональный НБ (ГНБ). При неупорядоченном расположении 6,3 об. % ГНБ повышение тепло-

проводности составило 300 %. Отдельно исследовано влияние степени ориентации частиц НБ, числа гидроксильных групп в полимерных матрицах поливинилового спирта (ПВС) или поливинилбутираля (ПВБ) и амфифильных агентов на теплопроводность ПКМ. Обнаружено, что ориентированные в продольном направлении частицы НБ обеспечивают лучшую теплопроводность, чем неориентированные благодаря созданию тепловых каналов.

– сочетание обработки растворителем препрега и введения НБ. Исследована возможность увеличения теплопроводности ПКМ, содержащих армирующее стекловолокно, без ухудшения их электроизоляционных свойств. Показано, что обработка растворителем с введением нанотрубок НБ приводила к повышению теплопроводности до 90 %.

– введение НБ с различными покрытиями, поверхностно обработанного или функционализированного. В статье [4] исследованы теплопроводность и механические свойства ПКМ на основе полиэфиримида (ПЭИ), содержащих частицы ГНБ и ГНБ с полиимидным покрытием (ПГНБ). Композиционные материалы (КМ), содержащие 60% ПГНБ, имеют теплопроводность 3,3 Вт/(м·К), в то время как теплопроводность КМ ПЭИ/ГНБ составляет 2,6 Вт/(м·К). Показано, что ПГНБ, введенные в матрицу, эффективно повышают теплопроводность и механические свойства КМ. Отдельно приведено, что гексагональные микрочастицы нитрида бора (ГМЧНБ) функционализировали связующим агентом на основе силана, 3-глицидилоксипропилтриметоксисиланом ( $\gamma$ -MPS), для улучшения межфазного взаимодействия с полиимидной матрицей. КМ, содержащий 40% масс. частиц функционализированных ГМЧНБ, показал теплопроводность 0,748 Вт/(м·К), что в 4,6 раза выше теплопроводности чистого полиимида. Кроме этого, сообщается, что для повышения теплопроводности КМ эпоксидная смола/НБ наполнитель модифицируют нанесением покрытия из полистирола и полиметилметакрилата (ПММА) мицеллярной полимеризацией. Обработка приводит к повышению смачиваемости НБ эпоксидной смолой и адгезии на поверхности наполнитель/полимерное связующее. Теплопроводность КМ, содержащего модифицированный наполнитель, достигает 2,69 Вт/(м·К).

– введение микропластинок, хлопьев, пластинок НБ, в том числе функционализированных. Приведены сведения о том, что гексагональные микропластинки нитрида бора (ГМПНБ) введены в ПВС в качестве теплопроводного наполнителя. ГМПНБ во время переработки ориентируются, образуя текстурированную структуру внутри полимерного связующего, которая помогает формированию теплопроводящих участков. При введении 1 вес. % наполнителя можно получить высокую теплопроводность КМ ГМПНБ/ПВС, которая достигает 1,45 Вт/(м·К), тогда как при введении 10 вес. % 3,92 Вт/(м·К).

Из представленных выше источников можно сделать вывод, что введение частиц НБ заметно повышает поперечную теплопроводность ПКМ: при неупорядоченном расположении 6,3 об. % ГНБ повышение теплопроводности составило 300%. При этом ориентирование, функционализирование или покрытие данных частиц адгезионным составом способствует еще большему

повышению теплопроводности: ПКМ, содержащие 60% частиц ПГНБ, имеют теплопроводность 3,3 Вт/(м·К), в то время как без покрытия 2,6 Вт/(м·К).

– введение карбидов бора, кремния, нитридов кремния, алюминия. В статье [5] сообщается, что теплопроводность эпоксидного КМ, содержащего 50 об. % необработанного нитрида алюминия (AlN) составляла 1,25 Вт/(м·К).

– сочетание SiC и НБ. Исследованы морфология, теплопроводность и электроизоляционные свойства ПКМ на основе полисульфона, хлопьев ГНБ и нитевидных кристаллов SiC. ПКМ изготовлены смешением в расплаве и переработаны литьем под давлением. ПКМ, содержащий 50% смеси (8:2) ГНБ:SiC, имел теплопроводность 2,728 Вт/(м·К).

– введение частиц алюминия, в том числе с поверхностным оксидным слоем, оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ), в том числе обработанного или функционализированного. Исследованы ПКМ, содержащие эпоксидную смолу в качестве полимерной матрицы, полиуретан в качестве модификатора и  $Al_2O_3$ , обработанный силановым агентом KH550, в качестве теплопроводного наполнителя. Когда содержание модифицированного  $Al_2O_3$  составляло 150 ч./100 ч., ПКМ имел теплопроводность 0,66 Вт/(м·К). Оптимальное соотношение полиуретана и эпоксидной смолы составляло 15:85.

– введение частиц или волокон алюминия, покрытых оксидом кремния. В статье [6] сообщается, что ПКМ получали введением частиц наполнителя ядро-оболочка Al- $Al_2O_3$ - $SiO_2$  ( $Al^*$ - $SiO_2$ ) в полиимидную матрицу. Максимальная теплопроводность ПКМ, содержащих 40 об. % наполнителя  $Al^*$ - $SiO_2$ , составляет 3,1 Вт/(м·К). По сравнению с ПКМ, содержащими частицы металлического алюминия, использование структур ядро-оболочка  $Al^*$ - $SiO_2$  придает нанокompозитам повышенную теплопроводность. Отдельно приводятся данные о том, что изготовлен ПКМ, содержащий покрытые оксидом кремния волокна алюминия с многослойной структурой и наночастицы алюминия в качестве наполнителей в полиимидной матрице. Теплопроводность ПКМ значительно увеличивается до 15,2 Вт/(м·К).

При использовании алюминия в качестве высокотеплопроводной добавки для достижения наилучшего результата предпочтительно вводить частицы алюминия, покрытые оксидом кремния или частицы системы Al- $Al_2O_3$ - $SiO_2$ , где алюминий выступает в качестве ядра, а  $Al_2O_3$  и оксид кремния в качестве покрытий.

– сочетание  $Al_2O_3$  и НБ. Исследовано влияние размеров и геометрии частиц смешанных наполнителей разных составов на термические и механические свойства гибридных композитных систем. Изучено влияние системы, состоящей из полигональных частиц  $Al_2O_3$  и пластин НБ, на теплопроводность эпоксидных ПКМ. Поверхность обоих наполнителей функционализировали обработкой аминопропилтриэтоксисиланом марки KH550. Не наблюдали существенных различий термических и механических свойств ПКМ, содержащих микрочастицы НБ размером 1 мкм и 5 мкм. ПКМ, содержащий 30% гибридного наполнителя (5:5)  $Al_2O_3$ +НБ (1 мкм), имел значительно более высокую теплопроводность (0,57 Вт/(м·К)), чем ненаполненная эпоксидная смо-

ла (0,17 Вт/(м·К)).

– введение меди, в том числе высокопористой. В статье [7] исследовано влияние структурных параметров (размер ячейки, пористости) медного высокопористого открыто ячеистого материала на коэффициент теплопроводности полимерного материала на основе олигодиенуретандиэпоксидного связующего марки ПДИ-ЗАК. Установлено, что в результате конечный ПКМ имеет теплопроводность в 5-7 раз выше в зависимости от пористости.

– введение наполнителей ферромагнитной природы с последующим воздействием электрического, магнитного, ультра-звукового, термомагнитно-ультразвукового полей. Предлагается способ получения ПКМ повышенной теплопроводности путем воздействия на расплав дисперсно-наполненного полимера термомагнитно-ультразвуковым полем. Экспериментально установлено повышение теплопроводности обработанного полимера за счет плотной и равномерной упаковки частиц наполнителя в полимерной матрице.

– использование перфорированных пластин или сеток из высокотеплопроводных металлов. Сообщается, что слоистые пористые композиционные материалы (СПКМ) обладают рядом свойств, характерных для перспективных материалов при создании высокоэффективных теплообменных аппаратов нового поколения. СПКМ представляет собой сочетание тонких (0,15...1,0 мм) слоев высокотеплопроводных перфорированных пластин (ПП) или сеток и низкотеплопроводных тонких прокладок. ПП или сетки выполняются из меди или алюминия и других высокотеплопроводных металлов, а прокладки из низкотеплопроводных металлов (антикоррозионная сталь, титан и др.). В качестве прокладок могут применяться и неметаллические материалы.

– введение УНТ: одностенных УНТ (ОУНТ) и многостенных УНТ (МУНТ). В статье [8] исследованы термические свойства КМ на основе поли-L-лактоидов в зависимости от содержания МУНТ. При увеличении содержания МУНТ до 0,75% теплопроводность КМ достигала минимального значения ~ 0,12 Вт/(м·К) и при увеличении содержания МУНТ до 5% теплопроводность повышалась до 0,345 Вт/(м·К). В другом случае определяли режим передачи тепла и термические свойства ПКМ на основеполиамид-6 (ПА-6) и МУНТ, полученные полимеризацией и последующей структурной модификацией посредством высокого давления и высокой температуры. Теплопроводность ПА-6 улучшалась на ~ 27% с добавкой 2,1% МУНТ. Кроме этого, исследованы ПКМ, состоящие из эпоксидной смолы и МУНТ. Добавление 3% нефункционализированных МУНТ приводило к снижению удельного поверхностного сопротивления эпоксидной смолы на 7 порядков и повышению ее теплопроводности на 112%.

– введение длинных МУНТ. Сообщается, что изотропная теплопроводность и теплопроводность в плоскости КМ на основе длинных МУНТ была выше теплопроводности аналогов, содержащих короткие МУНТ. Теплопроводность в плоскости КМ, содержащего 2% длинных МУНТ, составляла 1,27 Вт/(м·К).

– введение графитированных МУНТ. Исследована теплопроводность

углепластиков на основе резольной фенольной смолы. Показано, что МУНТ в состоянии поставки не меняет теплопроводность КМ. Обработка трубок при 2800 °С существенно увеличивает их кристалличность, а введение их в матрицу также заметно повышает теплопроводность углепластиков. Максимальная теплопроводность получена при 7 вес. % обработанных МУНТ. Обособленно приводятся данные о том, что теплопроводность нанокompозитов на основе ПММА, содержащих 3% графитированных МУНТ, выше теплопроводности чистого ПММА на 193%.

– введение функционализированных УНТ. В статье [9] теплопроводность ПКМ измеряли при использовании нескольких трубчатых углеродных нанонаполнителей (нанотрубки, волокна и усы). Наибольшее увеличение теплопроводности наблюдали при использовании функционализированных МУНТ (увеличение на 90% при степени наполнения 1 об. %). В другом случае сообщается, что получены ПКМ на основе эпоксидной смолы и УНТ, функционализированных полиэтиленмином. Модификация УНТ способствует повышению однородности и теплопроводности материала на 660% при содержании наполнителя 8%. Отдельно изучали влияние отверждения и функционализации на межфазную теплопроводность ПКМ на основе полимерной матрицы EPON-862 и функционализированных УНТ. Установлено, что теплопроводность линейно возрастает с увеличением степени функционализации (до 2,5%). Отвержденный полимер способствует увеличению теплопроводности на 20%. Кроме этого, приводятся сведения, что получены ПКМ на основе эпоксидной смолы и МУНТ. Функционализация поверхности МУНТ глицидилметакрилатом улучшает их диспергируемость в полимерной матрице. Функционализированные МУНТ имеют улучшенную адгезию к эпоксидной смоле. Добавление 3 ч. функционализированных МУНТ приводит к повышению теплопроводности на 183%. Обособленно дается информация, что изготовлен ПКМ на основе ПММА и УНТ, модифицированных 3-изоцианатопропилтриэтоксисиланом. Показано, что наполнитель гомогенно распределен в полимерной матрице. Теплопроводность материала возрастает на 87,5% при содержании модифицированных УНТ 0,99 %.

– введение ориентированных УНТ. Рассматривается влияние включения различного вида УНТ на анизотропию проводимости ПКМ, в качестве которого использовалась эпоксидная смола. Было продемонстрировано, что при добавлении небольшого количества ориентированных УНТ теплопроводность ПКМ увеличивается в разы. Преимуществом ПКМ с массивом ориентированных УНТ является то, что нанотрубки распределены по всему объему полимера в направлении оси ориентирования, обеспечивая тем самым перенос тепла через ПКМ. В статье [3] показано, что при неупорядоченном расположении 13,1 об. % УНТ повышение теплопроводности составило 170%. Для КМ, содержащего 13,1 об. % УНТ, имеющих полуупорядоченное расположение, повышение теплопроводности составило 210 %. Кроме этого, предложен метод выращивания массивов вертикально ориентированных УНТ и синтез ПКМ на основе вертикально ориентированных, горизонтально ориентирован-



ных и неупорядоченных УНТ. Установлено, что коэффициент теплопроводности эпоксидной смолы возрастает в 10 и более раз при наполнении полимера вертикально ориентированными УНТ.

– сочетание УНТ с НБ. В статье [3] исследовали теоретическими и экспериментальными методами теплопроводность полимерных нанокомпозитов, содержащих УНТ и ГНБ. Результаты моделирования и испытаний показали повышение теплопроводности нанокомпозитов по мере увеличения содержания нанонаполнителя. Для нанокомпозитов с гибридным наполнителем: 3,1 об. % УНТ + 1,55 об. % ГНБ теплопроводность повышалась на 290%. Отдельно исследовали теплопроводность КМ на основе полифениленсульфида и смеси НБ и МУНТ. Наблюдалось синергетическое увеличение теплопроводности благодаря образованию трехмерных путей передачи тепла между НБ и МУНТ. Повышение теплопроводности имело сильную зависимость от обработки поверхности нанотрубок пероксидом водорода и кислотой. Максимальная теплопроводность полученных КМ составляла 1,74 Вт/(м·К).

– сочетание УНТ с AlN. Приводятся данные о том, что функционализированные амином МУНТ получены химической модификацией карбоксилсодержащих МУНТ. Синтезированные материалы и необработанные микрочастицы AlN вводились в диметилсилоксан с концевыми эпоксидными группами. Тепло- и электропроводность КМ постоянно повышалась с увеличением содержания наполнителей. Коэффициент теплопроводности 3,81 Вт/(м·К) достигнут при концентрации функционализированных МУНТ 3%, а микрочастиц AlN – 70 %, при этом гибкость пленок сохранялась. В статье [5] изучена теплопроводность эпоксидной смолы, наполненной МУНТ, модифицированными полиглицидил-метакрилатом и микрочастицами AlN, обработанного цирконатным агентом. Теплопроводность эпоксидной смолы, наполненной 25 об. % модифицированного AlN и 1 об. % функционализированных МУНТ, составляет 1,21 Вт/(м·К), что сравнимо с теплопроводностью 1,25 Вт/(м·К) эпоксидного ПКМ, содержащего 50 об. % необработанного AlN.

Введение малого количества УНТ (до 5%) позволяет незначительно увеличить коэффициент теплопроводности полимеров до 0,345 Вт/(м·К), в то время как при концентрации УНТ 20 вес. % теплопроводность возрастает в три раза. Заметное увеличение теплопроводности можно получить при использовании длинных МУНТ, всего 2% которых позволяют достигнуть значения теплопроводности 1,27 Вт/(м·К). Также целесообразно использовать графитированные МУНТ, при содержании которых 3%, теплопроводность возрастает на 193%, т.е. почти в 3 раза. Наряду с графитацией УНТ значительное увеличение теплопроводности можно получить различными методами их функционализации. При степени наполнения 1 об. % функционализированных МУНТ теплопроводность увеличивалась на 90%, при содержании наполнителя 8 % соответственно на 660%. Кроме этого, высокое влияние на теплопроводность оказывает степень ориентации УНТ в полимере. Полуупорядоченное расположение дает повышение теплопроводности на 40% по сравнению с неупорядоченным, а вертикальная ориентация УНТ позволяет повысить



коэффициент теплопроводности в 10 и более раз. Сочетание УНТ (3,1 об. %) с НБ (1,55 об. %) также дает увеличение теплопроводности (на 290%), но подобного результата можно достичь путем графитизации или функционализации УНТ. Сочетание УНТ с AlN дает заметный эффект повышения теплопроводности (до 1,21 Вт/(м·К)), но при высоком содержании AlN (не менее 25 об. %).

– введение углеродного нановолокна. В статье [10] сообщается, что для получения ПКМ углеродные нановолокна соединялись со связующим материалом нейлоном-11. Измерения показали, что при комнатной температуре теплопроводность увеличивается от  $(0,24 \pm 0,01)$  Вт/(м·К) для чистого нейлона-11 до  $(0,30 \pm 0,02)$  Вт/(м·К) при добавлении углеродных нановолокон в пропорции 7,5% по весу.

Таким образом, введение углеродного нановолокна в полимер по его эффекту сравнимо с введением нефункционализированных УНТ.

– введение рубленых УВ, в том числе покрытых ферромагнитным материалом и ориентированных. В заявке на патент [11] приводятся данные о том, что монослой содержит полимерную матрицу (широкий круг термо-, реакто- и эластопластов) и графитизированные в среде инертного газа УВ в виде частиц размером 10-500 мкм и предпочтительным диаметром 5-15 мкм. Волокна покрыты ферромагнитным материалом (металлы, сплавы, содержащие Fe, Ni, Co). Под действием магнитного поля частицы ориентируются в направлении, перпендикулярном плоскости монослоя, придавая ему высокие теплопроводные свойства.

– сочетание рубленых УВ и частиц  $Al_2O_3$ . Сообщается, что материал получают из полимерной матрицы (предпочтительно силиконового каучука), теплопроводящих волокон (с теплопроводностью не менее 100 Вт/(м·К)) диаметром 5-15 мкм, длиной 70-130 мкм, причем волокна с длиной не более 20 мкм составляют не более 20% от общего количества и неволокнутого теплопроводящего наполнителя (сферические частицы  $Al_2O_3$  с диаметром 3,2 мкм). В теплопроводящем материале волокна ориентированы. Теплопроводность материала равна 14 Вт/(м·К).

– введение графита, оксида графита, модифицированного графита. В статье [12] показано, что при введении в эпоксидную смолу 25% пластинок графита со средним размером 15 мкм ее теплопроводность возрастает на ~30%. В другом случае КМ, содержащие модифицированный оксид графита и полиуретановые эластомеры получали проведением полимеризации. По сравнению с полиуретановыми эластомерами теплопроводность выше на 6 порядков. Обособленно приводится информация о том, что синтезирован гибридный материал коллоидный графит-фталоцианин меди (КГФМ) как проводящая добавка для улучшения свойств ПКМ на основе терминируемых фталонитрилом эфиров полиариленинитрилов. Теплопроводность образца с содержанием 16 масс. % КГФМ составляла 0,597 Вт/(м·К), что на 80% выше, чем у чистого полимера.

– сочетание графита, сажи и УВ. Изучена теплопроводность жидкок-

ристаллического полимера Vectra A950RX, наполненного сажей, синтетическим графитом, УВ. Увеличение теплопроводности наблюдается при наполнении полимера синтетическим графитом. Так, КМ, содержащий 65 – 80% синтетического графита, 25 % сажи и 5% УВ, имеет теплопроводность не менее 20 Вт/(м·К).

– сочетание графита, в том числе омедненного, и УНТ. В статье [13] изучены условия получения и их влияние на теплопроводность КМ, содержащих нанонаполнитель (УНТ, графит), гомогенизатор и полимеры. Наилучшую теплопроводность ( $\sim 1,8$  Вт/(м·К) при 25 °С) имел материал, содержащий 25% УНТ, 25% графита и додецилбензосульфونات натрия в качестве гомогенизатора. Кроме этого, представлен новый ПКМ с высокой теплопроводностью 2,6 Вт/(м·К). Материал представляет собой графитовые частицы и МУНТ, распределенные в полимерной матрице из эпоксидной смолы.

– сочетание графита, УНТ и металла. Сообщается о том, что изготовлен многослойный материал для отвода тепла, состоящий из трех слоев: внутреннего слоя металла и двух внешних слоев из ПКМ на основе графитовых частиц и МУНТ, распределенных в полимерной матрице из эпоксидной смолы. Максимальная теплопроводность такого материала составляла 4,9 Вт/(м·К).

Введение частиц графита или оксида графита повышает теплопроводность полимера, однако по сравнению с УНТ для достижения одной и той же теплопроводности, необходимо вводить гораздо больше графита. Для сравнения: теплопроводность ПА-6 улучшалась на  $\sim 27\%$  с добавкой 2,1% МУНТ, теплопроводность эпоксидной смолы возрастает на  $\sim 30\%$  при введении 25% пластинок графита со средним размером 15 мкм. Гибридный материал КГФМ позволяет получить более высокую теплопроводность полимера, чем чистый графит: при введении 16 масс. % КГФМ теплопроводность увеличивалась на 80% и составляла 0,597 Вт/(м·К). Сочетание графита и УНТ дает значительное увеличение теплопроводности  $\sim 1,8$  Вт/(м·К), однако такая теплопроводность достигается при высоком содержании и УНТ (25%), и графита (25%). При использовании металлического листа в качестве прослойки между слоев ПКМ на основе графита и УНТ можно получить теплопроводность 4,9 Вт/(м·К). ПКМ, содержащий 65 – 80% синтетического графита, 25% сажи и 5% УВ, имеет теплопроводность не менее 20 Вт/(м·К).

– введение графена, в том числе модифицированного. В статье [14] сообщается о том, что наноккомпозиты графен-полимер обладают высокой теплопроводностью ( $\sim 300$  Вт/(м·К)). В другом случае представлены эпоксидные гибридные ПКМ с повышенной теплопроводностью и высокими электроизоляционными свойствами, которые получали на основе графена, модифицированного ковалентной добавкой полиэдрического олигомерного аминопропилиобутил-силсесквиоксана. При введении 0,25% и 0,5 % модифицированного графена теплопроводность эпоксидной смолы повышалась на 37,6% и 57,9% соответственно при сохранении высокого электрического сопротивления.

– введение оксида графена (ОГ). Представлены сведения о том, что ОГ

функционализировали реакцией с винилтриметоксисилоном с образованием функционализованного ОГ (ФОГ), в котором молекулы модификатора прикреплены к поверхности нанопластин ОГ с образованием связи Si-O-C. КМ на основе полисилоксанов и ФОГ получали смешением в растворе. Введение 0,5% ФОГ значительно улучшало термическую стабильность, прочность при растяжении и теплопроводность полисилоксанов. Введение 0,5% ФОГ приводило к повышению прочности при растяжении и коэффициента теплопроводности полисилоксана на 95,6% и 78,3% соответственно.

– сочетание ОГ и УНТ. Исследованы теплопроводность, кристаллические свойства КМ на основе поливинилиденфторида (ПВДФ), УНТ и небольших количеств ОГ. Установлено, что при добавлении 1% ОГ КМ ПВДФ/УНТ показывают значительное повышение теплопроводности.

Применение графена, в том числе модифицированного, ОГ в качестве теплопроводного наполнителя позволяет повысить теплопроводность полимера. При введении 0,25% и 0,5% модифицированного графена теплопроводность эпоксидной смолы повышалась на 37,6% и 57,9% соответственно. Введение 0,5% ФОГ приводило к повышению коэффициента теплопроводности полисилоксана на 78,3%. Теплопроводность полимера на основе модифицированного ОГ выше, чем на основе немодифицированного.

– введение алмаза. В статье [15] термостабильные полигетероарилены – полиэфиримид и полибензимидазол выбраны в качестве полимерной основы для ПКМ. Для увеличения теплопроводности, электрической и механической прочности в полимерную матрицу вводился порошкообразный алмаз. Алмаз использовался в виде смеси частиц разного размера. Смесь содержала 60-80% фракции наибольшего размера и 20-40% последовательно мелких фракций при концентрации наполнителя до 85 вес. %. По сравнению с теплопроводностью полимера, равной  $\approx 0,3$  Вт/(м·К) при 23 °С, теплопроводность КМ, содержащих 70 вес. % возрастает в несколько раз и составляет 3-4,5 Вт/(м·К). Отдельно показана перспективность использования в качестве наполнителя в многофункциональных ПКМ наноалмазов (детонационных). Добавка наноалмаза в полиимидную матрицу приводит к повышению температуры деградации КМ на  $\sim 30$  °С и увеличивает их адгезионные свойства. Добавка 2 вес. % наноалмаза увеличивает теплопроводность КМ на  $\sim 15$  %.

Несмотря на высокую теплопроводность алмаза, введение 2 вес. % наноалмаза увеличивает теплопроводность КМ всего на  $\sim 15$  %, но при степени наполнения 70 вес. % теплопроводность возрастает в несколько раз и составляет 3-4,5 Вт/(м·К).

Закключение. Таким образом, были рассмотрены различные способы повышения теплопроводности полимеров и ПКМ как вдоль укладки волокон, так и в трансверсальном направлении. Определено, что для значительного повышения теплопроводности вдоль укладки волокон целесообразно использовать УВ на основе пека.

Для увеличения теплопроводности в трансверсальном направлении, т.е. перпендикулярно укладки волокон, используются такие методы, как при-

менение тканей объемного плетения, изготовленных из УВ на основе пека, обработка препрега растворителем, введение различных теплопроводных частиц: НБ, карбида бора, SiC, нитрида кремния, AlN, чистого алюминия, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, чистой меди, металлических сеток, листов, наполнителей ферромагнитной природы с последующим воздействием термо-магнитоультразвукового поля, УНТ, углеродных нановолокон, рубленых УВ, графита, оксида графита, графена, ОГ, алмаза, а также их различных сочетаний.

Достаточно высокую поперечную теплопроводность (от 1,25 до 4,5 Вт/(м·К)) можно получить путем введения в объем матрицы металлических порошков, их оксидов, AlN, SiC, алмаза при степени наполнения от 40% до 70%. Но использование данных веществ существенно увеличивает массу ПКМ, поскольку они обладают высокой плотностью ( $\rho$  не менее 2,7 г/см<sup>3</sup>). Самую низкую плотность имеют УНТ (1,3-1,6 г/см<sup>3</sup>), углеродные нановолокна (~ 2,0 г/см<sup>3</sup>), рубленые УВ (не более 2,15 г/см<sup>3</sup>), НБ (2,18 г/см<sup>3</sup>), графит (2,08-2,26 г/см<sup>3</sup>) и графен (не более 2,23 г/см<sup>3</sup>). При этом теплопроводность УНТ и нановолокон составляет 500-6000 Вт/(м·К), УВ, в том числе рубленых и молотых, 70-1000 Вт/(м·К), НБ 180 Вт/(м·К), ГНБ до 600 Вт/(м·К), графита 100-500 Вт/(м·К), а графена до 5000 Вт/(м·К). Для увеличения теплопроводности полимера до 0,748 Вт/(м·К) степень наполнения ГНБ составляла 40%, а до 2,6 Вт/(м·К) соответственно 60%. В то же время введение 5% УНТ позволяет увеличить теплопроводность до 0,345 Вт/(м·К), при концентрации УНТ до 20% теплопроводность возрастает в три раза. Использование длинных МУНТ позволяет получить полимер с теплопроводностью до 1,27 Вт/(м·К) при содержании 2%. Материал, содержащий 25% УНТ и 25% графита имел теплопроводность ~ 1,8 Вт/(м·К). Высокое (более 25 %) содержание дисперсного наполнителя в объеме ПКМ сопровождается значительным снижением его механических характеристик, поэтому целесообразно использовать углеродные наполнители, введение которых в минимальном количестве позволяет существенно повысить теплопроводность ПКМ.

#### *Литература*

1. In-plane thermal conductivity in thin carbon fiber composites. / Silva C., Marotta E., Schuller M., Peel Larry, O'Neil Mark J. // Thermophys. and Heat Transfer. 2007. 21. № 3. P. 460-467.
2. Mun So Youn, Lim Hyung Mi, Lee Dong-Jin. Thermal conductivity of a silicon carbide/pitch-based carbon fiber-epoxy composite // Thermochim. acta. 2015. 619. P. 16-19.
3. Thermal conductivity of carbon nanotube and hexagonal boron nitride polymer composites. / Tabkh Paz Majid, Shajari Shaghayegh, Mahmoodi Mehdi, Park Dong-Yeob, Suresh Hamsini, Park Simon S. // Composites. B. 2016. 100. P. 19-30.
4. Thermal conductivity improvement of surface-enhanced polyetherimide (PEI) composites using polyimide-coated h-BN particles. / Lee Hoing Lae, Kwon O-Hwan, Ha Sung Min, Kim Byoung Gak, Kim Yong Seok, Won Jong Chan, Kim

- Jooheon, Choi Jong Han, Yoo Youngjae // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2014. 16. № 37. P. 20041-20046.
5. Synergetic effect of thermal conductive properties of epoxy composites containing functionalized multi-walled carbon nanotubes and aluminum nitride / Teng Chih-Chun, Ma Chen-Chi M., Chiou Kuo-Chan, Lee Tzong-Ming // *Composites. B.* 2012. 43. № 2. P. 265-271.
  6. Creation of a multilayer aluminum coating structure nanoparticle polyimide filler for electronic applications. / Zhou Yongcun, Chen Yining, Wang Hong, Wong C.P. // *Mater. Lett.* 2014. 119. P. 64-67.
  7. Кисельков Д.М., Якушев Р.М., Огородова Э.Г. Теплопроводность полимерных материалов, армированных высокопористых ячеистыми материалами // Тезисы устных и стендовых докладов 4 Всероссийской Каргинской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика В. А. Каргина, «Наука о полимерах 21-му веку». 2007. Т. 3. // М.: МГУ. 2007. С. 137.
  8. Nano- and microstructural effects on thermal properties of poly (l-lactide)/multi-wall carbon nanotube composites. / Lizundia E., Oleaga A., Salazar A., Sarasua J.R. // *Polymer.* 2012. 53. № 12. P. 2412-2421.
  9. Filler geometry and interface resistance of carbon nanofibres: Key parameters in thermally conductive polymer composites. / Gharagozloo-Hubmann Kati, Boden Andre, Czempiel Gregor J. F., Firkowska Izabela, Reich Stephanie // *Appl. Phys. Lett.* 2013. 102. № 21. P. 213103.
  10. Thermal conductivity measurements of nylon 11-carbon nanofiber nanocomposites. / Moore Arden L., Cummings Antonette T., Jensen Justin M., Shi Li, Koo Joseph H. // *Trans. ASME. J. Heat Transfer.* 2009. 131. № 9. P. 091602/1-091602/5.
  11. Tobita Masayuki. Thermally conductive polymer sheet // Заявка 1199328 ЕПВ. 24.04.2002.
  12. Raza M. A., Westwood A. V. K., Stirling C. Effect of processing technique on the transport and mechanical properties of graphite nanoplatelet/rubbery epoxy composites for thermal interface applications // *Mater. Chem. and Phys.* 2012. 132. № 1. P. 63-73.
  13. Influence of nanomaterials in polymer composites on thermal conductivity. / Park Wonchang, Choi Kyungwho, Lafdi Khalid, Yu Choongho // *Trans. ASME. J. Heat Transfer.* 2012. 134. № 4. P. 041302/1-041302/7.
  14. Thermal transport in graphene-polymer nanocomposites / Wang Mingchao, Galpaya Dilini, Lai Zheng Bo, Xu Yanan, Yan Cheng // *Proc. SPIE.* 2013. 8793. P. 879310/1-879310/6.
  15. Равич И.Я., Соколина Г.А., Банцеков С.В. Теплопроводящий электроизолирующий полимер-алмазный композит // Материалы 14 Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России (материалы и устройства функциональной электроники и микроэлектроники)» и 21 Международного симпозиума «Тонкие пленки в

электронике», посвященные 45-летию ОАО «ЦНИТИ «Техномаш» // М. :  
Центр. н.-и. технол. ин-т Техномаш. 2008. С. 237-241.

УДК 620.179

**Обоснование формализованной оценки эффективности  
технологических и производственных систем**

**М.И. Сидоров**, к.т.н., первый заместитель директора – заместитель директора  
по научной работе,

ФКП «НИИ «Геодезия», г. Красноармейск, Московская область,

**М.Е. Ставровский**, д.т.н., профессор, зам. директора,  
ФГАУ «Научно-исследовательский институт Центр экологической промыш-  
ленной политики», г. Мытищи, Московская область,

**В.В. Пирогов**, к.т.н., старший научный сотрудник,  
ФГБУН Институт конструкторско-технологической информатики РАН, г.  
Москва,

**Е.С. Юрцев**, начальник сводного отделения центра технологического разви-  
тия,

ФГУП «Научно-производственное объединение «Техномаш», г. Москва

*С использованием примера Ван-дер-Поля разработана математиче-  
ская модель фрикционных автоколебаний при топохимической кинетике.  
Отмечено качественное соответствие результатов расчета выполненных с  
ее использованием с экспериментальными данными исследователей.*

Фрикционные автоколебания, модель, сила трения, скорость, топохимическая  
кинетика, схватывание.

**The substantiation of the formalized estimation of effectiveness  
of technological and production systems**

**M.I. Sidorov**, Ph.D., First Deputy Director – Deputy Director for Research,  
Federal State Enterprise «Scientific Research Institute «Geodesy»

(FKP «Research Institute «Geodesy»), Krasnoarmeysk, Moscow region,

**M.E. Stavrovsky**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director,  
Federal State-Owned Autonomous Institution «Research Institute «Center for Envi-  
ronmental Industrial Policy» (FGAU «SRI «CEPP»), Mytishchi, Moscow region,

**V.V. Pirogov**, Ph.D., Senior Researcher, FGBUN Institute of Design and Techno-  
logical Informatics, Russian Academy of Sciences, Moscow,

**E.S. Yurtsev**, Head of the Integrated Branch of the Center for Technological De-  
velopment, FSUE «Scientific and Production Association «Technomash», Moscow

*Using the example of van der Pol developed a mathematical model of fric-  
tional self-oscillations in topochemically kinetics. Marked qualitative correspond-  
ence of the results of calculation performed using the experimental data of re-  
searchers.*



Frictional self-oscillations, model, frictional force, speed, topochemically kinetics, setting.

Модель топохимической кинетики адгезионного схватывания двух взаимодействующих при трении поверхностей сводится к следующему. В зоне контакта образуются зародыши и растущие ядра схватывания. На разрушение этих ядер требуется вполне определенное количество энергии, расходуемой на единицу пути; диссипация которой приводит к особенностям реализации процесса [7]. Образование ядер схватывания на пятнах контакта представляется как топохимическая реакция, которая протекает в двумерном реакторе. При этом регистрируются два процесса и две скорости – скорость перемещения относительно друга двух контактирующих поверхностей и скорость топохимической реакции, или времени «пробегания» и продолжительности топохимической реакции. Соотношения между этими параметрами будут определять особенности процесса. Задача управления процессом взаимодействия материалов сводится к заданию параметров топохимических реакций (констант скоростей) – воздействием на процессы сорбции, тепло- и массопереноса и т.п.

Постоянные импульсные изменения, происходящие на уровне участков поверхностей, микрообъемов и микронеровностей вместе с конкурирующими процессами изнашивания и образования вторичных структур (с возможной регенерацией тонких пленок), обуславливают широкополосную динамическую нагруженность контакта и микроколебания. Частоты этих микровибровозбуждений соизмеримы с частотами собственных колебаний механической трибосистемы, что предопределяет взаимовлияние динамических процессов в зоне взаимодействия материалов и в механической системе.

В литературе предполагается, что при определенных скоростях скольжения возможно перерастание этого потока микроколебаний в макроколебания, создающие нестабильность трения на макроуровне. Соответственно, возможен переход скольжения из равномерного в неравномерное. Это обстоятельство приводит к необходимости объяснения, каким образом происходит синхронизация микроколебаний, что, в свою очередь, может дать формулировку задач, которые рассмотрены в разделах теории колебаний, в частности к задачам о синхронизации колебаний и затыгивании частоты.

Для устранения или допустимого снижения уровня фрикционных автоколебаний применяют разнообразные методы, которые могут быть разделены на две большие группы: методы улучшения триботехнических характеристик узлов трения и методы улучшения упруго-диссипативных характеристик фрикционной системы в целом. Снижение фрикционных автоколебаний достигается методами обеих групп, но полное устранение возможно только методами первой группы.

Методы улучшения триботехнических характеристик путем предотвращения перепада трения на участках фактического касания основываются на снижении уровня трения, например, механической или гидравлической

разгрузкой, либо на снижении изменения трения в различных режимах работы, например, синтезом на поверхности пленок, устойчивых к внешним воздействиям. Большинство методов первой группы включают оба фактора и предусматривают четыре пути воздействия: на геометрию и кинематику контакта; на способ смазывания и смазочный материал; на конструкционный материал; на качество рабочих поверхностей.

К методам улучшения упруго-диссипативных характеристик фрикционной системы относится, прежде всего, повышение жесткости механической системы, в особенности последнего звена привода. Повышение жесткости механизмов подачи, например, станков, достигается за счет: сокращения длины цепи подачи; повышения редукиции на последнем звене; применения достаточно жестких валов; применения жестких планок для опор ходовых винтов и т.п.; применения предварительного натяга упорных подшипников.

Диссипативные характеристики механических систем определяются конструкционным демпфированием в неподвижных стыках и демпфированием в материалах. Конструкционное демпфирование обусловлено трением покоя при микросмещениях поверхностей, а рассеиваемая при этом энергия пропорциональна квадрату амплитуды, что дает возможность учета в форме линейного вязкого трения. Демпфирование в материалах связано со способностью материалов рассеивать энергию механических колебаний в форме внутреннего трения, которое обусловлено микропластическими деформациями в объеме материала. В кристаллических материалах демпфирование связано с движением дефектов кристаллической решетки, но его удельная мощность (потери энергии за период колебаний) обычно менее 2%. Разработаны специальные полимерные, металлические и композиционные материалы с повышенной демпфирующей способностью. Применяются также дополнительные демпфирующие устройства.

Все это говорит о повышенном интересе к фрикционным колебаниям. Другая сторона проблемы фрикционных автоколебаний связана с износом. При малых скоростях скольжения, особенно в моменты остановок, велико адгезионное схватывание поверхностей фрикционного контакта, что часто приводит к заеданиям и, как следствие, вырыванию и диспергированию поверхностного слоя.

Анализ принципов построения математических моделей фрикционных автоколебаний показал, что для описания колебательных свойств триботехнической системы необходимо отказаться от трактовки сухого трения, как кулоновского трения, когда коэффициент трения не зависит от скорости скольжения, а принять падающую кинетическую характеристику трения, когда, по крайней мере, коэффициент статического трения превышает коэффициент динамического (кинетического) трения.

Анализ экспериментальных работ, посвященных фрикционным автоколебаниям, показал, что возникновение фрикционных автоколебаний обеспечивается только падающей кинетической характеристикой трения. Характер фрикционных автоколебаний зависит от скорости проскальзывания, жест-

кости системы, нагрузки на контакт, момента инерции движущегося тела, коэффициента трения и смазывающей способности технологической или смазочной жидкости.

Математическая модель фрикционных автоколебаний для того, чтобы быть базовой, например, вибрационной и акустической триботехнической диагностики должна содержать наиболее полную характеристику триботехнической системы, с позиций физико-химической механики, механохимии, физической химии и химической физики, и давать прогностические зависимости, качественно согласующиеся с экспериментальными результатами.

Для возникновения фрикционных автоколебаний кинетическая характеристика трения – зависимость коэффициента трения (или силы трения) от скорости скольжения, должна иметь следующий вид – при увеличении скорости скольжения первоначально должно фиксироваться падение коэффициента трения, а затем наблюдаться его рост. Подобного типа кинетические характеристики трения были предложены в работах [1,3,7], а их верификация частично выполнена в диссертационном исследовании А.Б. Мерзликина [4]. Предложенные кинетические характеристики трения качественно подобны тем, которые требуются для возникновения фрикционных автоколебаний. Задача дальнейших исследований заключается в изучении подобия наблюдаемых в эксперименте закономерностей и закономерностей, получаемых расчетным путем на качественном уровне, т.е. необходимо проследить тенденции, которые наблюдаются при изменении параметров триботехнической системы.

Обзор экспериментальных результатов [2] позволил установить, что характер фрикционных автоколебаний в основном прослеживается по частоте и амплитуде автоколебаний, кроме того, иногда упоминаются характерные времена остановки или скачка.

Основными варьируемыми параметрами для фрикционных автоколебаний являются жесткость привода, скорость скольжения, нагрузка на контактирующие поверхности, момент инерции (масса). Влияние на характер фрикционных автоколебаний смазочных материалов – их характеристик, устанавливается только на качественном уровне путем сравнения конкретных смазочных материалов. Часто вязкость среды используется в качестве характеристики смазочного материала. Однако, как показал Хольм Р. [6], этот параметр не может в полной мере характеризовать смазочный материал.

В связи с этим в рамках исследований трибохимической кинетики внешнего трения была поставлена задача на математической модели фрикционных автоколебаний проследить влияние на характер автоколебаний, прежде всего, перечисленных параметров, а затем перейти к изучению влияния других параметров автоколебательной системы, которые не фиксировались ранее в эксперименте, но влияние которых может быть прослежено на математической модели.

В математических моделях фрикционных автоколебаний, как правило, принимается аппроксимация зависимости силы трения от скорости скольжения кубической параболой:

$$F(u) = q(\text{sign}(u) - \alpha_1 u + \alpha_3 u^3), \quad u = v - \dot{x}; \quad (1)$$

где  $\text{sign}(u) = 1$  (сигнатура) при  $v > \dot{x}$  и  $\text{sign}(u) = -1$  при  $v < \dot{x}$ ;

$v$  – скорость скольжения ленты;

$\dot{x}$  – скорость тела в лабораторной системе координат;

$u$  – скорость тела относительно ленты;

$q$ ,  $\alpha_1$  и  $\alpha_3$  – положительные постоянные;

$q$  – множитель, пропорциональный силе нормального давления на ленту;

$q = mgf$  ( $m$  – масса тела на ленте,  $g$  – ускорение свободного падения,  $f$  – коэффициент сухого трения).

В случае относительного покоя, когда тело относительно ленты не движется, т.е. при  $v = \dot{x}$  справедливо неравенство  $-q \leq F(u) \leq q$ .

Однако подобная аппроксимация является формальной, а параметры зависимости не отражают тех процессов, которыми сопровождается трение. Особенно это касается констант  $\alpha_1$  и  $\alpha_3$ , которые собственно и задают характер автоколебаний. В рамках этих моделей результаты эксперимента только отчасти поддаются интерпретации с позиций трибологии и физико-химической механики.

В разрабатываемой математической модели кинетическая характеристика трения определяется топохимической кинетикой при формировании и последующем разрушении мостиков на контакте взаимодействующих материалов [1, 7]. В математической модели для кинетики образования и роста ядер адгезионного схватывания при трении скольжения предполагается, что кинетика образования и роста этих ядер реализуется в движущейся двумерной среде, а переменная времени в реагирующей системе связана с переменной скорости изменяющейся реакционной системы. Один из вариантов решения задачи кинетики [7]:

$$\alpha = 1 - (1 - \alpha_0) \exp\left\{-A_0 k_y^2 t^2 \left[1 - \exp\{-k_x t\}\right]\right\}. \quad (2)$$

где  $\alpha$  – доля покрытия поверхности пятен фрикционного контакта адгезионными ядрами схватывания,

$\alpha_0$  – минимальное значение параметра  $\alpha$  (характерное значение для данной фрикционной пары),

$k_x$  – константа скорости перехода двумерных зародышей ядер схватывания в активно растущие ядра схватывания,

$k_y$  – константа роста двумерного ядра схватывания,

$A_0 = \pi x_0 / S_0$  (здесь  $x_0$  – начальная концентрация потенциальных зародышей ядер схватывания на пятнах фрикционного контакта;

$S_0$  – площадь поверхности пятен фрикционного контакта).

В этой модели согласование переменных  $t$  и  $v$  ( $v$  – скорость скольжения) определено соотношением  $t = z/(v + u_0)$ ,

где  $z$  – характерная длина пробега;

$u_0$  – параметр, физический смысл которого устанавливается из соотношения,  $u_0 = (z/t) - v$ , как скорость «захлопывания» ювенильных участков контакта после их образования, в результате разрушения (пропорционального  $v$ ) адгезионных ядер, т.е. скорость смачивания и растекания смазочного материала.

Параметр  $u_0$  характеризует материал смазки, растекание которого блокирует разрастание ядер адгезионного схватывания. Процесс растекания должен характеризоваться некоторой кинетикой, который в данном конкретном рассмотрении характеризуется параметром  $u_0$ , постоянным для определенных условий процесса взаимодействия материалов.

При формулировке модели предположено, что взаимодействие материалов происходит в условиях, характеризующихся как промежуточные между изотермическими и адиабатическими. Данные условия вводятся с использованием весовых коэффициентов, характеризующих преобразование механической энергии в тепловую и химическую – в форме активации поверхности пятен контакта.

Образование ядер схватывания в определенные периоды приводит к их разрушению при скольжении поверхностей. Данное разрушение будет создавать другую поверхность (в энергетическом отношении) в большей степени насыщенную дефектами – активными центрами. Этот процесс отражен тем, что принята следующая закономерность: снижение энергии активации (зарождения зародышей) пропорционально скорости относительного перемещения поверхностей или функции от скорости ( $k_x = k_x(v)$ ).

Аналогичная закономерность предполагается для константы скорости роста ядер схватывания ( $k_y = k_y(v)$ ), поскольку места разрушения ядер должны обладать повышенной поверхностной энергией, которая кинетически должна реализовываться в большей скорости распространения зоны реакции при росте вновь образующихся ядер.

Процесс диссипации механической энергии будет приводить к повышению температуры поверхностей за счет необратимости процесса образования и роста ядер схватывания и их разрушения. Данный процесс отразится как локальное повышение температуры в зоне реакции ( $T = T(v)$ ).

Константа скорости химической реакции в обобщенном виде представлена уравнением Аррениуса:

$$\begin{aligned}
 k_x &= k_{0,x} \exp \left\{ -\frac{h_x [E_{A,x} - \delta_x g(v)]}{E_{T,x} + \rho_x g(v)} \right\}; \\
 k_y &= k_{0,y} \exp \left\{ -\frac{h_y [E_{A,y} - \delta_y g(v)]}{E_{T,y} + \rho_y g(v)} \right\}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

В представлении (3)  $E_{A,x}$  – энергия активации перехода зародыша в активно растущее ядро (для случая первоначальной, т.е. исходной поверхности),  $E_{T,x}$  – тепловой потенциал (аналог  $RT$  в уравнении состояния идеального газа),  $g(v)$  – функция преобразования энергии:  $\delta_x g(v)$  – преобразование механической энергии в поверхностную энергию дефектов,  $\rho_x g(v)$  – преобразование механической энергии в тепловую энергию. Для целей качественного исследования первоначально было принято  $\delta_x + \rho_x = 1$  и  $g(v) = av + b$  ( $a, b - const$ ). Коэффициенты  $\delta_x$  и  $\rho_x$  отражают близость условий зоны реакции (контакта поверхностей) к изотермическим или адиабатическим. Для условий близких к изотермическим (хороший теплоотвод и высокая теплопроводность материала) предполагается  $\rho_x \approx 0$  и  $\delta_x \approx 1$ ; для условий близких к адиабатическим (плохой теплоотвод и низкая теплопроводность материала), соответственно,  $\rho_x \approx 1$  и  $\delta_x \approx 0$   $\delta_x \cong 0$ . Во втором выражении (3) аналогичные величины имеют тот же физико-химический смысл.

В этом случае все характерные зависимости коэффициента трения от скорости скольжения представляются в форме единых закономерностей.

Верификация математической модели сопоставлением результатов расчета и эксперимента показала, что модель позволяет описывать сложные зависимости коэффициента трения от скорости скольжения, на которых регистрируется падение коэффициента трения с ростом скорости скольжения, экстремумы коэффициента трения, и при совместном наличии на характеристике трения максимума и минимума. Результаты верификации математической модели по экспериментальным данным зависимости коэффициента трения от скорости скольжения при различных давлениях и вариациях других факторов показали, что оценить вклад отдельных трибохимических процессов в общую последовательность возможно с учетом близости условий взаимодействия материалов к изотермическим или адиабатическим.

Математическая модель фрикционных автоколебаний, как правило, строится на примере механической системы («пример Ван-дер-Поля»), в которой могут возникать самовозбуждающиеся колебания – автоколебания [5]. Эта механическая система, схематично представляется в виде следующей конструкции. Груз (ползун) находится на шероховатой транспортной ленте,



которая движется со скоростью  $v$ . Ползун прикреплен к неподвижной точке упругой пружиной, создающей силу, изменяющуюся по линейному закону. Если скорость ленты  $v$  выбрана соответствующим образом, то, ползун не будет находиться в покое, а будет совершать колебания.

Поведение ползуна обусловлено тем, что сила сухого трения между ползуном и лентой будет изменяться при изменении скорости скольжения  $\dot{x}$  ползуна относительно ленты:  $\varphi(\dot{x})$ . Пока ползун находится в покое относительно ленты ( $\dot{x} = 0$ ), сила трения возрастает, оставаясь в каждый момент равной приложенной внешней силе. Когда внешняя сила достигает определенного критического значения силы трения, происходит движение ползуна относительно ленты, причем сила трения будет уменьшаться при нии  $|\dot{x}|$ , а при достаточно большом значении  $|\dot{x}|$  – увеличиваться. Направления силы трения  $\varphi(\dot{x})$  и относительной скорости  $\dot{x}$  противоположны.

Предполагается, что положение ползуна определяется его расстоянием  $\xi$  от точки, в которой пружина не растянута и не сжата. Тогда скорость скольжения записывается в виде

$$\dot{x} = \dot{\xi} - v \quad (4)$$

Уравнение движения ползуна принимает вид

$$m\ddot{\xi} + \varphi(\dot{\xi} - v) + k\xi = 0 \quad (5)$$

Далее для удобства вводится новая переменная  $x_*$ , которая связана с  $\xi$  соотношением

$$x_* = \xi + \frac{1}{k} \varphi(-v). \quad (6)$$

Это соотношение определяет то, что положение ползуна отсчитывается от точки, в которой он находится в равновесии при одновременном действии упругой силы и силы трения, так как согласно (5), равенство (7) характеризует положение равновесия:

$$\varphi(-v) + k\xi = 0 \quad (7)$$

Дифференциальное уравнение для  $x_*$  примет вид:

$$m\ddot{x}_* + [\varphi(\dot{x}_* - v) - \varphi(-v)] + kx_* \quad (8)$$

или

$$m\ddot{x}_* + F(\dot{x}_*) + kx_*, \quad (9)$$

где

$$F(\dot{x}_*) = \varphi(\dot{x}_* - v) - \varphi(-v). \quad (10)$$

Предполагается, что функция  $\varphi(\dot{x})$  имеет следующий вид: при росте  $|\dot{x}|$  она сначала убывает, а потом возрастает. Тогда существенным является то, что производная функции  $F(\dot{x}_*)$  должна иметь отрицательное значение при  $\dot{x}_* = 0$ . (Здесь  $x$  – координата тела на ленте, где за начало координат принята точка, в которой пружина и не растянута, и не сжата;  $x_*$  – координата тела на ленте, где за начало координат принята точка, в которой сила трения и натяжения пружины уравновешивают друг друга). Это требование будет вы-



полняться, если скорость  $v$  такова, что абсолютная величина трения между ползуном и лентой будет уменьшаться при возрастании  $v$ . Автоколебания могут иметь место в том случае, если сила затухания ведет себя упомянутым образом при малых значениях  $\dot{x}_*$ .

Для решения поставленной задачи математическая модель фрикционных автоколебаний строится в соответствии с «примером Ван-дер-Поля». При этом функция, определяющая зависимость силы трения от скорости скольжения, задается в форме кинетического уравнения адгезионного схватывания как топохимической кинетики образования и разрушения «мостиков сваривания» в зоне контакта взаимодействующих поверхностей (2).

Эта модель имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2; \\ \dot{x}_2 &= -cx_1 - q(\varphi(x_2) - \varphi(0)), \end{aligned} \quad (11)$$

где  $x_1$  – положение тела на ленте, относительно точки, в которой тело неподвижно относительно ленты;

$c$  – жесткость пружины,

$q$  – нагрузка, которую тело оказывает на ленту.

$x_2$  – скорость движения тела относительно ленты,

Трение представлено функцией  $\varphi(x_2)$  в форме (2)  $\alpha = \alpha(v)$  с учетом изменения направления движения при колебаниях ( $\alpha_* = 1 - \alpha_0$ ;  $\varepsilon$  – малый параметр; функция  $th((x_2 - v)/\varepsilon)$  задает разрыв при смене знака скорости относительного движения ползуна и ленты в «примере Ван-дер-Поля»)

$$\begin{aligned} \varphi(x_2) &= \left( th\left(\frac{x_2 - v}{\varepsilon}\right) \right) \times \\ &\times \left[ 1 - \alpha_* \exp\left\{ \frac{-A_0 k_{0,y}^2 z^2}{\left[ (x_2 - v) \operatorname{sign}(x_2 - v) + u_0 \right]^2} \exp\left\{ \frac{-E_{A,y} + \delta_y (x_2 - v) \operatorname{sign}(x_2 - v)}{E_{T,y} + \rho_y (x_2 - v) \operatorname{sign}(x_2 - v)} \right\} \right\} \right] \times \\ &\times \left[ 1 - \exp\left\{ \frac{-k_{0,x} z}{\left[ (x_2 - v) \operatorname{sign}(x_2 - v) + u_0 \right]^2} \exp\left\{ \frac{-E_{A,x} + \delta_x (x_2 - v) \operatorname{sign}(x_2 - v)}{E_{T,y} + \rho_x (x_2 - v) \operatorname{sign}(x_2 - v)} \right\} \right\} \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

С помощью математических моделей (11), (12) выполнены вычислительные эксперименты, которые затем на качественном уровне были сопоставлены с результатами экспериментов, имеющимися в литературе.

Для вычислительного эксперимента сравнения (эталонного эксперимента) была выбрана кинетическая характеристика со значениями входящих в нее параметров, которые даны в таблице 1.

Эта характеристика представлена на рисунке 1. Значение  $\varphi(0)$  в уравнении (11) для этой характеристики равно  $\varphi(0) = -0,6681$ .

**Таблица 1 – Значения безразмерных параметров кинетической кривой трения в вычислительном эксперименте сравнения**

$\varepsilon$	$\nu$	$u_0$	$\alpha_*$	$A_0 k_{0,y}^2 z$	$k_{0,x} z$	$E_{A,y}$	$E_{A,x}$	$E_{T,y}$	$E_{T,x}$	$\delta_y$	$\delta_x$	$\rho_y$	$\rho_x$
$10^{-3}$	0,3	0,05	0,9	1	2	2	2	1	1	0,9	0,9	0,1	0,1

Изменение характера фрикционных автоколебаний в модельной системе исследовали при варьировании параметров: жесткости возвращающей пружины, нагрузки, массы (момента инерции), параметра, характеризующего противоизносные свойства смазочного материала.

Изменение характера фрикционных автоколебаний исследовали при варьировании физико-химических показателей конструкционных материалов, заданных в модели в виде начальной концентрации зародышей адгезионного схватывания, активности поверхности фрикционного контакта в отношении скорости перехода зародышей в активно растущие ядра адгезионного схватывания, энергии активации перехода потенциальных зародышей в активные ядра адгезионного схватывания, энергии активации процесса роста ядер адгезионного схватывания, перераспределения вкладов механохимической и тепловой активации поверхности фрикционного контакта (это перераспределение отражает близость условий к изотермическим или адиабатическим с помощью весовых коэффициентов).

Для решения задач повышения живучести технических систем из этих исследований наибольший интерес представляют: изменение характеристик фрикционных автоколебаний при варьировании, прежде всего, скорости взаимного перемещения контактирующих поверхностей и их температуры, вызывающее изменение скорости перехода потенциальных зародышей в активно растущие ядра адгезионного схватывания, температуры, вызывающей изменение скорости роста ядер адгезионного схватывания, температуры, вызывающей совместное изменение скоростей перехода зародышей в ядра и роста этих ядер.

В вычислительном эксперименте зафиксировано, что при малых скоростях автоколебания отсутствуют, т.е. возбуждение автоколебаний соответствует жесткому режиму. Рост скорости относительного перемещения поверхностей приводит к возбуждению разрывных автоколебаний, которые затем при дальнейшем росте скорости переходят к автоколебаниям, которые становятся все более близкими к гармоническим: доля периода, приходящаяся на проскальзывание (скачок) растет, а доля периода, приходящаяся на «ползущую остановку», снижается.

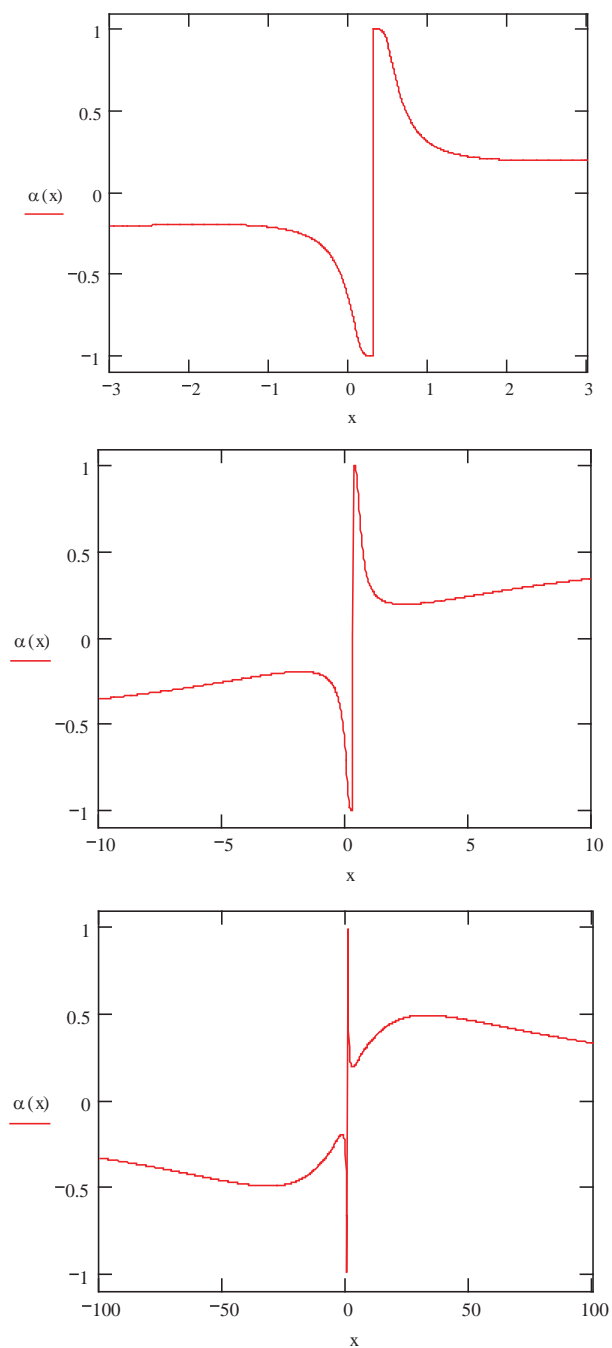


Рисунок 1 – Кинетическая характеристика трения при значениях параметров, приведенных в таблице 1 (здесь координата  $x$  соответствует  $x_2$ )

В вычислительном эксперименте также была получена информация об изменении характера фрикционных автоколебаний при варьировании кинетического параметра  $E_{T,x}$ , который задает температурные условия работы взаимодействующих материалов. Этот параметр характеризует влияние температуры и с его помощью можно задавать температуру внешней среды. С другой стороны, он зависит от восприимчивости системы (реакции перехода потенциальных зародышей в активно растущие ядра схватывания) к изменениям температуры.

Увеличение температуры, которое в модели может быть задано параметром  $E_{T,x}$ , сначала приводит к тому, что затухающие колебания, определяемые собственными колебаниями механической системы, переходят в разряд практически гармонических фрикционных автоколебаний, а затем – разрывных. Доля периода, приходящаяся на «ползущую остановку», растет от нуля до определенного значения и далее практически не меняется. При этом частота падает, затем выходит на постоянное значение, после чего наблюдается незначительный рост. Амплитуда растет, достигает максимума, а затем снижается.

Выход параметров фрикционных автоколебаний на устойчивое значение свидетельствует, что потенциальные возможности рассматриваемой стадии процесса осуществлять вклад в рост интенсивности адгезионного схватывания исчерпываются. Соответственно, при такой скорости рассматриваемой стадии (высокой скорости) процесс взаимодействия поверхностей и адгезионного схватывания в поведении фрикционной автоколебательной системы будет определяться другими, т.е. более медленными стадиями суммарного процесса.

Разработанная математическая модель фрикционных колебаний при сопоставлении результатов расчетов, выполненных с ее использованием с экспериментальными данными независимых исследователей, показала их качественное соответствие.

Необходимо также отметить, что данная модель позволяет существенно повысить количество и качество получаемой в процессе исследований информации, поскольку существенно повышает вариативность используемой для анализа исходной информации, получаемых зависимостей между параметрами при различных моделируемых условиях и т.д.

#### *Литература*

1. Албагачиев А.Ю., Лукашев Е.А., Сидоров М.И., Ставровский М.Е. Сопоставление трибохимической кинетики «внешнего» трения и основных положений адгезионной и молекулярно-механической теории трения // Вестник машиностроения. 2017. № 5. С. 47-55.
2. Крагельский И.В., Гитис Н.В. Фрикционные автоколебания // М.: Наука. 1987. 183 с.

3. Лукашев Е.А. Топохимическая кинетика адгезионного взаимодействия двух твердых тел в процессе трения скольжения // Теоретические и прикладные проблемы сервиса. 2003. № 2 (7). С. 13-22.
4. Мерзликин А.Б. Математическое моделирование фрикционных автоколебаний при топахимической кинетике адгезионного схватывания в режиме трения скольжения. Дис. .... канд. технических наук // М.: МГУС. 2010. 19 с.
5. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии // М.: ФИЗМАТЛИТ. 2007. 368 с.
6. Хольм Р. Электрические контакты // М.: Иностранная литература. 1961. 464 с.
7. Юдин В.М., Лукашев Е.А., Ставровский М.Е. Трибохимия водородного износа // М.: МГУС. 2004. 282 с.

УДК 621.794

**Теоретические аспекты образования оксидных пленок на алюминиевых сплавах при оксидировании в водных электролитах**

**М.Л. Скрябин**, к.т.н., доцент,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Вятская государственная сельскохозяйственная академия (ФГБОУ ВО Вятская ГСХА), г. Киров

*В статье рассмотрены теоретические аспекты образования оксидных пленок на поршневых алюминиевых сплавах при микродуговом оксидировании. Также рассмотрены возможные схемы формирования барьерного и наружного слоев поверхностного покрытия в водных электролитах. Показан механизм образования границы раздела и возможные схемы осаждения неметаллических включений на поверхности. Описано поэтапное образование оксидных слоев на поверхности поршня, имеющее принципиальное отличие от обычных пленок, получаемых при анодировании.*

Модели формирования пленочных покрытий, пленочная пористость.

**Theoretical aspects of formation of oxide films on aluminum alloys when oxidized in aqueous electrolytes**

**M.L. Scriabin**, Ph.D., associate Professor,

Federal state budgetary educational institution of higher professional education Vyatka state agricultural Academy (University at Vyatka state agricultural Academy), Kirov

*The article deals with the theoretical aspects of the formation of oxide films on piston aluminum alloys at micro-arc oxidation. Possible schemes of formation of barrier and outer layers of surface coating in aqueous electrolytes are also considered. The mechanism of formation of the interface and possible deposition schemes of non-metallic inclusions on the surface are shown. The stage-by-stage formation of oxide layers on the surface of the piston, which has a fundamental difference from conventional films obtained during anodizing, is described.*

Models for the formation of film coating, film porosity.

В настоящее время эффективным методом увеличения поверхностной прочности и жаростойкости днища поршня является методика электрического осаждения химических покрытий на основе различных композиций. Такой метод упрочнения состоит в том, что в результате электрохимических воздействий на днище поршня осаждаются различные включения. Включения таких

неметаллических материалов существенно изменяет его основные физические характеристики, увеличивая тепло-, жаро- и износостойкость [3,4]. Основным недостатком данных электрохимических покрытий – незначительная производительность и низкие экологические показатели процесса.

Микродуговое оксидирование (МДО) – один из самых эффективных видов повышения физических и механических свойств поверхности алюминиевых сплавов, заключающийся в получении на поверхности оксидных пленок. Основа данного процесса сходна с электрохимическим процессом анодирования поверхности, но сам процесс МДО имеет некоторые принципиальные особенности. С помощью микродугового оксидирования можно получать перспективные покрытия с множеством свойств, отличающихся от основного материала [3]. К таким свойствам относятся теплостойкость, износостойкость, коррозионностойкость и некоторые другие. Это особенно важно для алюминиевых сплавов, которые работают при повышенных температурах и давлениях. Именно эти свойства определяют надежность функционирования поршневых сплавов в условиях повышенных нагрузок и высокой «жесткости» рабочего процесса.

Характерным принципиальным отличием МДО от похожих электрических и химических процессов является наличие в технологическом процессе рабочего слоя, образующегося под действием микроразрядов. Получаемые микроразряды находятся около рабочей плоскости поршня и оказывают специфическое, принципиальное воздействие на получаемое покрытие. В результате таких воздействий из электролита осаждаются неметаллические включения, поэтому структура МДО-слоев, имеет принципиальное отличие от обычных пленок, получаемых при анодировании. Кроме того, этот процесс отличается высокой экологичностью и отсутствием высокой трудоемкости проведения начальной подготовки рабочей поверхности в начале технологического процесса. Также для получения особых свойств днища поршня не требуется получения толстых поверхностных покрытий, что значительно сказывается на основном времени оксидирования [3].

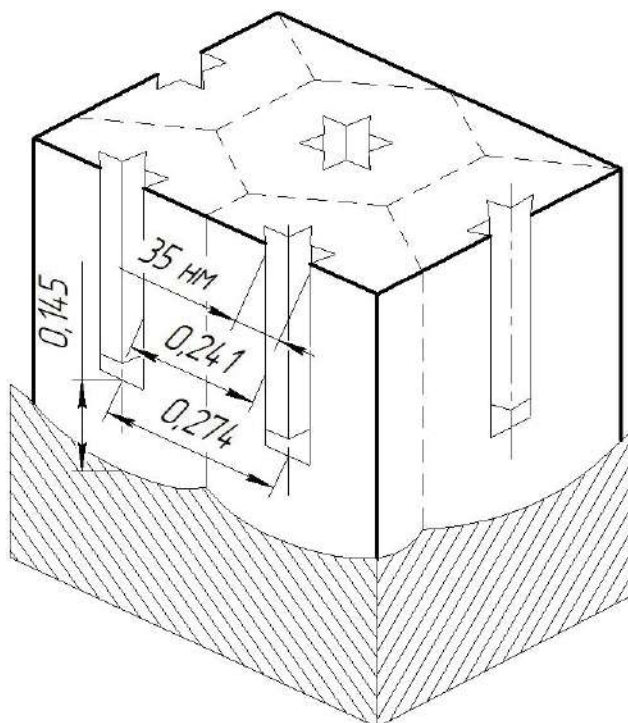
Известные работы в большинстве носят исследовательский или прикладной характер, а теоретические разработки по механизму МДО практически отсутствуют. В целом количество работ, посвященных МДО-воздействию на поверхность металлических материалов постоянно растет, что характеризует данный процесс упрочнения как перспективный и далеко идущий [4]. Задачи данной работы – обобщить и структурировать основные теории образования оксидных слоев в процессе МДО.

Последние исследования, проводимые в области микродугового оксидирования, показали, что оксидные пленки, которые формируются в растворяющих оксид алюминия водных электролитах, состоят из двух основных слоев. Эти слои имеют четко выраженную границу раздела. Первый слой – барьерный – прилегает непосредственно к основному металлу. Имеет достаточно высокую плотность и характеризуется практически полным отсутствием пор. Второй слой – наружный с большой пористостью, образованной от



множества микродуговых разрядов [3,1].

В настоящее время не существует однозначных теорий и единого механизма формирования структуры покрытий во время МДО. Но основными являются модели коллоидно-электрохимическая, физико-геометрическая и плазменная [3,2].



**Рисунок 1 – Схематическое изображение идеальной структуры (согласно физико-геометрической модели Келлера)**

Рассматривая наглядную физико-геометрическую модель Келлера можно отметить, что в начальный момент времени при микродуговом оксидировании на поверхности основного металла возникает барьерный слой. Его формирование на начальном этапе происходит, в активных центрах на поверхности поршневого сплава. После начального образования активных центров начинают расти полусферические линзообразные микроячейки, которые впоследствии срастаются в однородный барьерный слой. Согласно теории замкнутых множеств начинает образовываться мозаика, в которой соприкасающиеся шесть ячеек образуют форму гексагональной призмы, в основании которой лежит полусфера. В результате влияния местных и множественных воздействий ионов в однородном барьерном слое начинают зарождаться поры, находящиеся в центре ячеек. Количество пор будет пропорционально падению напряжения на оксидной пленке. В центре ячейки барьерный слой ста-

новится меньше и в результате этого увеличивается напряженность поля. В этот момент происходит увеличение плотности ионного тока с одновременным увеличением скорости оксидирования. Рост температуры в канале поры способствует ее уменьшению, в результате чего, образуется равновесная динамическая система, удерживающая толщину барьерного слоя в четких границах.

На рисунке 1 представлена схема идеальной структуры пористой оксидной пленки при микродуговом оксидировании. Представленная схема полностью отвечает представлениям физико-геометрической модели Келлера [2,3].

Рассматривая данную модель можно выделить следующие основные положения:

- пористая оксидная пленка состоит из политипичных выделенных ячеек, представляющих из себя призму, основание которой имеет форму шестиугольника;

- оксидные политипичные структуры образуются перпендикулярно к поверхности основного поршневого сплава;

- в центре выделенной ячейки находится отдельное пористое образование, имеющее форму длинного, узкого канала. Форма и размеры канала зависят от применяемого электролита, элементарного состава поршневого сплава и электрических параметров процесса микродугового оксидирования;

- основой оксидной ячейки является барьерный слой беспористого типа (на рисунке 1 – 0,145 мкм). Этот слой имеет ячеистую структуру. Размеры сопряженных ячеек совпадают;

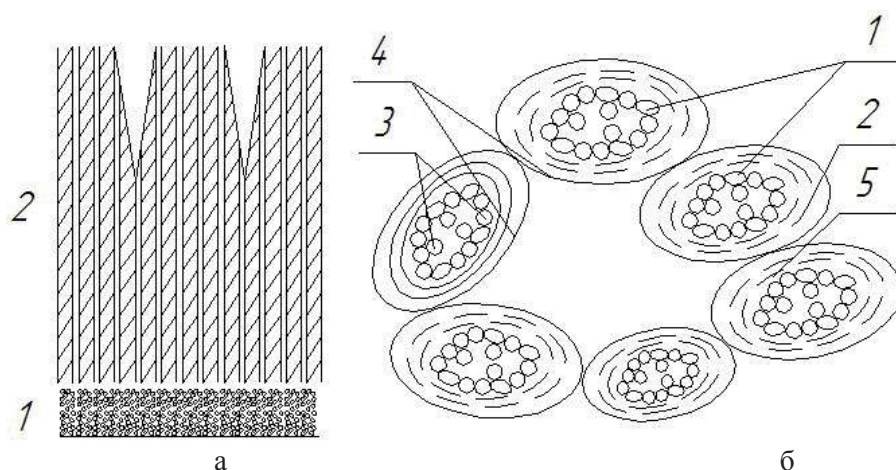
- в процессе микродугового оксидирования в начальный момент времени образуется барьерный слой, в котором начинается выделение политипичных ячеек. С течением времени барьерный слой начинает переходить в пористый. В процессе оксидирования происходит увеличение длины пор, так как дно пор (поверхность барьерного слоя) постоянно взаимодействует с раствором электролита.

Следующая теория рассматривает получаемые пленки как коллоидные образования [3,6]. Здесь пористость пленок характеризуется скоростью их роста, а оксид алюминия представляет собой гель, нормально ориентированный под воздействием сильного магнитного поля. Он существует на базе бемитно-гидрагиллитных цепей ( $AlOOH - Al(OH)_3$ ).

В результате химических реакций на активных центрах анода возникает множество мелкодисперсных частиц (мононы) - зародыши будущих мицелл. С течением времени мононы растут и постепенно достраиваются до полион, которые представляют собой волокнистые палочкообразные мицеллы коллоидной степени дисперсности. Эти мицеллы и образуют скелет геля оксида алюминия. В сформированный скелет внедряются анионы разогретого электролита, причем в это время происходит частичная потеря гидратной оболочки. Адсорбция анионов и воды, осуществляемая благодаря их доставке

по межмицеллярным порам, обуславливает отрицательный заряд монон и мицелл, заставляя их плотно прижиматься к аноду и срачиваться с металлом, препятствуя слиянию мицелл в беспористый слой [3,5]. Размеры элементарных ячеек Келлера практически равны размерам мицелл геля  $Al(OH)_3$ . Структура анодного оксида, который формируется в соответствии с рассмотренной моделью, показана на рисунке 2.

Субмикропоры и микропоры образуют межмононные и межмицеллярные пространства. Мицеллы могут скручиваться так, что пористый слой напоминает сноповидные образования, субволокна которых диаметром 15...60 нм построены из цепеобразно расположенных моно- и тригидратов оксида алюминия аморфной структуры, в которую внедрены электролитные группы (структурные анионы), участвующие в процессе образования оксидного покрытия и определяющие некоторые свойства анодных оксидов. В целом, с точки зрения коллоидно-мицеллярной теории, анодная оксидная пленка на алюминии состоит в основном из частиц гидроксидов алюминия коллоидной степени дисперсности, образующих неорганический полимер [3,7].



**Рисунок 2 – Структура оксидной пленки согласно коллоидно-электрохимической теории: а – формирование слоев при оксидировании: 1 – барьерный слой; 2 – пористый слой; б – схема образования палочкообразных мицелл коллоидной степени дисперсности: 1 – мононы; 2 – агломератмоноплоны; 3 – мицеллы; 4 – субмикропоры; 5 – микропоры.**

Теория окисления с образованием плазмы в зоне оксидирования (плазменная теория) объясняет большинство вопросов, которые связаны с появлением характерного свечения при МДО. Согласно плазменной теории, постоянного барьерного слоя на поверхности не существует. При отсутствии электрического тока происходит явление полимеризации из соприкасающегося с анодом элементарного слоя плазмы и ионизированного газа, количество которого в этот период максимально. Поток этого газа постоянно находится в состоянии бурления и обновления. Схема плазменной теории приведена на

рисунке 3. Исходя из плазменной теории необходимо выделить 3 основных стадии [3,6-7].

Стадия № 1:

- ионизация Al на аноде-  $Al \rightarrow Al^{3+}_{aq} + 3e$ ;
- образование ядра оксида-  $2Al^{3+}_{aq} + 6OH^- \rightarrow Al_2O_3 + 3H_2O$ ;
- полимеризация ядер-  $nAl_2O_3 \rightarrow [Al_2O_3]_n$ .

Стадия № 2:

- частичная гидратация оксида  $Al^{3+} + 3OH^- \rightarrow Al(OH)_3$ ;  $Al_2O_3 + Al(OH)_3 \rightarrow 3HAlO_2$  (входит в ядро вместе с  $Al_2O_3$ ).

Стадия № 3:

- после включения тока концентрированные на частицах анионы создают препятствие их слиянию потока в общий сплошной слой.

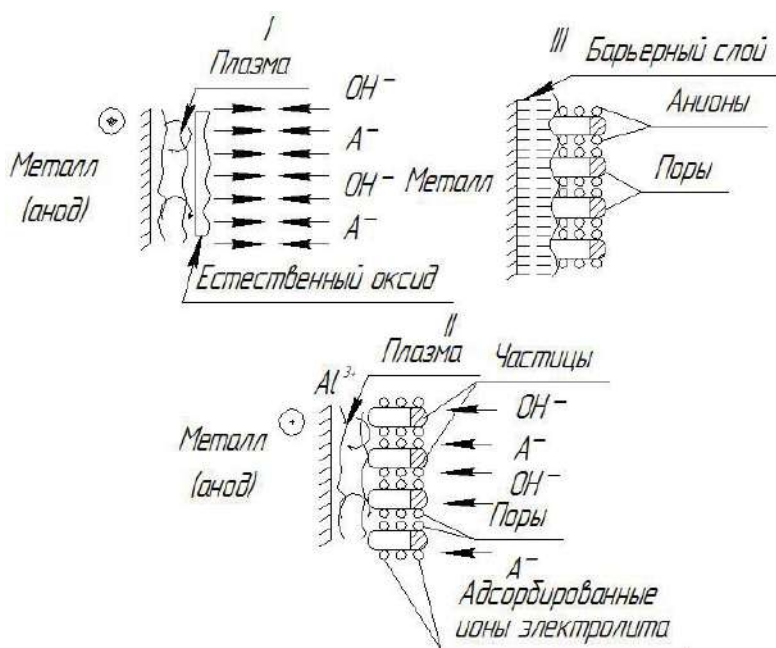


Рисунок 3 – Схема плазменной модель образования оксидных слоев при МДО

Плазменная теория подтверждается рядом фактов:

- наличие нетеплового свечение вещества, которое происходит после поглощения определенного количества внешней энергии (люминесцентное свечение) [7,8]. Для данного свечения характерна зависимость «яркость – напряжение». Своеобразный спектр токовых шумов соответствует потоку ионизированного газа тлеющего разряда высокого давления;
- наличие плазмы объясняет скорость полимеризацию фазового оксида алюминия, разнородность параметров оксидных пленок по толщине (в зоне воздействия поршневой алюминиевый сплав уплотняется);

- добавки, присутствующие в электролите, делают оксид практически непрозрачным и свечение в процессе МДО практически незаметно. В результате этого создается впечатление, что свечение происходит под оксидной пленкой [7,9].

Рассматривая предложенные теории формирования поверхностного слоя при микродуговом оксидировании, и сопоставляя их с результатами проведенных экспериментов, нельзя полностью определить четкую схему образования оксидных пленок. Механизмы микродуговых разрядов и роста оксидных покрытий в граничных областях достаточно сложные и требуют комплексных теорий, учитывающих коллоидно-электрохимическую, физико-геометрическую и плазменную модели.

Состав и внутренняя структура пленочных оксидных слоев, вне зависимости от теории образования, определяются локальными условиями их образования. Важную роль играет состав электролита. Компоненты электролита входят в структуру пленки, параметры которой задаются источником тока и режимом технологического воздействия микроразрядов на поверхность.

#### *Литература*

1. Розен А.Е., Артемьев А.Ю. Упрочнение поверхности деталей из алюминиевых, титановых и циркониевых сплавов микродуговым оксидированием // М.:Наука,2015. 145с.
2. Смехова И.Н., Скрябин М.Л. Этапы формирования пористых структур при микродуговом оксидировании поршневых алюминиевых сплавов // Ползуновский вестник. 2017. № 4. с. 192-196.
3. Скрябин М.Л., Смехова И.Н. Особенности физико-геометрической модели образования пористых структур оксидных пленок при микродуговом оксидировании поршневых алюминиевых сплавов // Информационно-технологический вестник. 2017. № 4 (14). с. 200-207.
4. Скрябин М.Л. Современные материалы для поршней двигателей внутреннего сгорания // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания. Материалы IX Международной научно-практической конференции «Наука – Технология – Ресурсосбережение»: Сборник научных трудов // Киров: Вятская ГСХА. 2016. Вып. 12. – С.374-379.
5. Скрябин М.Л. Особенности выбора современных материалов для поршневой группы при работе дизеля на альтернативных видах топлива // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания. Материалы IX Международной научно-практической конференции «Наука–Технология–Ресурсосбережение»: Сборник научных трудов // Киров: Вятская ГСХА, 2016. Вып. 13. С.279-285.
6. Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) // М.: ЭКОМЕТ. 2005. 368 с.

7. Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Дунькин О.Н., Невская О.С. Характер разряда в системе металл-оксид-электролит при микродуговом оксидировании на переменном токе // Известия АН. Серия Физическая. 2000. Т. 64. № 4. С. 759-762.
8. Crossland A.S., Thompson G.E., Wan J., Habazaki H., Shimizu K., Skeldon P., Wood G.C. // J. Electrochem. Soc., Vol. 144, #3, 1999, p.847-855.
9. Nie X., Leyland A., Song H.W., Yerokhin A.L, Dowey S.J., Matthews A. Thickness effects on the mechanical properties of micro-arc oxide coatings on aluminium alloys // Elsevier Science. Surface and coatings technology, 116, 1999, p.1055-1060.

*ДЛЯ ЗАМЕТОК*

---