

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации  
ПИ № ФС77-64098  
от 18 декабря 2015 г.

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова»  
(141074, Московская область, г. Королев, ул. Гагарина, д. 42)  
Издается с сентября 2014 г.  
Выходит 4 раза в год

ISSN 2409-1650

Журнал «Информационно-технологический вестник» включён в Перечень ведущих периодических изданий ВАК

Группы научных специальностей и научные специальности в рамках групп научных специальностей, по которым издание входит в Перечень:

2. Технические науки; 2.2. Электроника, фотоника, приборостроение и связь; 2.3. Информационные технологии и телекоммуникации [2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации; 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей]; 2.5. Машиностроение [2.5.13. Проектирование конструкции и производство летательных аппаратов]; 2.6. Химические технологии, науки о материалах, металлургия; [2.6.17. Материаловедение]

Подписной индекс в каталоге  
«Почта России» ПП1997

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 (доб.138),  
E-mail: rio-kimes@mail.ru,  
Site: www.unitech-mo.ru

Редакция не несет ответственности за достоверность информации в материалах, в том числе рекламных, представленных авторами для публикации  
Материалы приводятся в авторской редакции.

## СОДЕРЖАНИЕ

### **СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ**

Лукьянов А.А.  
**АНАЛИЗ МЕТОДОЛОГИЙ СБОРКИ ЗАГРУЗОЧНОЙ СРЕДЫ LINUX ДЛЯ ВСТРАИВАЕМЫХ СИСТЕМ УДАЛЁННОГО ДОСТУПА В УСЛОВИЯХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ.....3**

Мороз А.П., Бегимов А.А.  
**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОБИЛЬНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ПРИЕМА ЗАКАЗОВ.....14**

Орлов А.Д., Дмитренко Е.Н.  
**КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОТЕЗА МАНИПУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АНАЛОГОВОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ.....25**

Стрелалюк Ю.В., Ефимова А.О.  
**СРАВНЕНИЕ ФРЕЙМВОРКОВ PYTHON ДЛЯ WEB-РАЗРАБОТКИ.....36**

Шульженко С.Н., Останин С.Н.  
**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ШИФРОВАНИЯ ТЕКСТОВЫХ ФАЙЛОВ.....45**

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ**

Минитаева А.М., Шайтура С.В.  
**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ.....54**

Семенов А.Б., Артюшенко В.М.  
**АНАЛИЗ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ СТРУКТУРИРОВАННЫХ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ.....65**

Суркова Л.Е., Щиголь А.А.  
**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ПОДБОРА ТРУДОВЫХ РЕСУРСОВ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ.....78**

**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. **Аббасов Э.М.**, к.т.н.
2. **Аббасова Т.С.**, к.т.н., доцент
3. **Бухаров С.В.**, д.т.н., профессор
4. **Бершадский В.А.**, д.т.н., профессор кафедры
5. **Воловач В.И.**, д.т.н., профессор
6. **Кучеров Б.А.**, к.т.н.
7. **Логачев И.А.**, к.т.н.
8. **Логачева А.И.**, д.т.н., профессор
9. **Макаров М.И.**, д.т.н., профессор
10. **Матвиенко Ю.Г.**, д.т.н., профессор
11. **Мороз А.П.**, д.т.н., профессор
12. **Мосалов О.П.**, к.ф.-м.н.
13. **Разумовский И.М.**, д.ф.-м.н., профессор
14. **Рудаков В.Б.**, д.т.н., профессор
15. **Самаров Е.К.**, д.т.н., доцент
16. **Скрябин М.Л.**, к.т.н.
17. **Соляной В.Н.**, к.т.н.
18. **Стрэналок Ю.В.**, д.т.н., профессор
19. **Халиулин В.И.**, д.т.н., профессор
20. **Чесноков А.В.**, д.т.н.
21. **Щурин К.В.**, д.т.н., профессор

Подписано в печать 23.09.2023

Формат В5

Печать офсетная. Усл.печ.л.10,4

Тираж 500 экз.

Заказ № 95-03

Отпечатано в типографии

ООО «Научный консультант»

г. Москва

Хорошевское шоссе, 35, корп. 2

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ  
И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Брусков А.А.

**ОТКАЗЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ  
И ИХ ВЕРОЯТНЫЕ ПРИЧИНЫ.....89**

Насибулин М.Ш., Рудаков В.Б.

**АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ СТРУКТУР  
КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
И НАДЕЖНОСТИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПЛАНОВ  
ВЫБОРОЧНОГО КОНТРОЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ  
ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ МЕЛКОСЕРИЙНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА.....103**

Фалько А.Р., Черемисин М.В.

**ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ВЫБОРУ ДИАПАЗОНА ВЫСОТ  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МНОГОСПУТНИКОВЫХ  
НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ ГРУППИРОВОК СВЯЗИ.....118**

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Кокарев С.С., Соловьев М.Е., Балдаев С.Л., Балдаев Л.Х.

**МЕТОД РАЗДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ  
В ОДНОМЕРНОЙ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ  
НЕСТАЦИОНАРНОЙ ЗАДАЧЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  
В НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ.....128**

Пашковская Т.И.

**ОБОСНОВАНИЕ СОСТАВА НОВЫХ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ДЛЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ  
И УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....148**

Яговкина А.Н.

**ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ  
УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО  
МАТЕРИАЛА НА ФОРМИРОВАНИЕ  
ВЫСОКОПЛОТНОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ  
КЕРАМИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ МЕТОДОМ RMI.....156**

УДК 004.031.6

**Анализ методологий сборки загрузочной среды Linux  
для встраиваемых систем удалённого доступа  
в условиях импортозамещения**

**Артем Андреевич Лукьянов**, аспирант, начальник отдела системного администрирования и планирования развития информационных технологий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

*Исходя из задач исследования, проводится эксперимент с целью выявления наиболее гибкой, кроссплатформенной и автоматизированной сборочной среды для встраиваемых систем на базе ядра Linux в условиях импортозамещения.*

Операционные системы, кроссплатформенность, инструменты для сборки дистрибутива.

**Analysis of the assembly methodologies of the Linux boot environment for embedded systems of remote access in the conditions of import substitution**

**Artem Andreevich Lukyanov**, postgraduate student, Head of the Department of System Administration and Planning of Information Technology Development, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

*Based on the research objectives, an experiment is being conducted to identify the most flexible, cross-platform and automated assembly environment for embedded systems based on the Linux kernel in the conditions of import substitution.*

Operating systems, cross-platform, distribution build tools.

**Введение**

В настоящее время, в период нестабильной геополитической обстановки, встаёт острый вопрос по переходу на программное обеспечение (далее по тексту – ПО) отечественного производства. В государственном секторе управление импортом заменяющих продуктов осуществляется с помощью законодательных и нормативных актов Российской Федерации, согласно которым до 2024 года доля российского ПО должна составлять не менее 90%, а в государственных компаниях – не менее 70%.

На сегодняшний день, согласно рекомендациям, переход на отечествен-

ное ПО следует проводить с использованием программ, сведения о которых включены в единый реестр российского программного обеспечения и соответствуют дополнительным требованиям, установленным Постановлением Правительства РФ №325 от 23.03.2017 (редакция от 01.01.2019) «Об утверждении дополнительных требований к программам для электронных вычислительных машин и баз данных, сведения о которых включены в реестр российского программного обеспечения, и внесении изменений в Правила формирования и ведения единого реестра российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных».

Следует учесть, что был выпущен Указ Президента РФ №166 от 30.03.2022 «О мерах по обеспечению технологической независимости и безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации». В соответствии с данным Указом, начиная с 31.03.2022 компаниям, закупающим товары и услуги в соответствии с законом №223-ФЗ, запрещается покупать иностранное ПО, включая его использование в программно-аппаратных комплексах на важных объектах критической информационной инфраструктуры без предварительного согласования с уполномоченным ведомством. А начиная с 1 января 2025 года полностью запретить использование иностранного ПО.

Переход на использование отечественного ПО за два года – задача не из лёгких. В течение последнего десятилетия среди крупнейших мировых компаний, становится всё более популярным применение открытого программного обеспечения (open-source software) и свободного программного обеспечения (free software). Эти решения смогут способствовать импортозамещению в любых сценариях развития геополитической ситуации. Для их широкого применения в России требуется поддержка от государства, бизнеса и профессионального сообщества.

В связи с вышеизложенным существенно встаёт вопрос о применении таких решений в разработке встраиваемых систем.

Встраиваемая система – это устройство, содержащее внутри себя компьютер, однако выглядит совершенно не как привычный ПК [1, С. 232]. Стиральные машины, телевизоры, принтеры, автомобили, роботы – все они управляются каким-то компьютером, а иногда и не одним. В связи с увеличением сложности устройств возрастают и требования к управляющей ими операционной системе. Сегодня в качестве такой системы все чаще становится Linux.

Почему Linux? Ниже перечислим несколько причин выбора на эту роль:

- В Linux уже имеется необходимая функциональность: планировщики задач, хороший сетевой стек, поддержка USB, Wi-Fi, Bluetooth, многих запоминающих и мультимедийных устройств.
- Linux портирована на многие процессорные архитектуры, в том числе часто применяемые в системах на кристалле: ARM, MIPS, x86 и PowerPC.
- Исходный код Linux открыт, так что в него можно внести необходимые изменения, создать пакет программ для поддержки конкретной SoC-платы или устройства. Добавить протоколы, функции и технологии, которых нет в базовом исходном коде. Или исключить ненужные возможности, чтобы уменьшить требования к ОЗУ и ПЗУ.

- Активное сообщество. Ядро Linux выходит раз в 10-12 недель и авторами кода являются порядка 1000 разработчиков. Такая активность означает, что Linux всегда актуальна и поддерживает все современное оборудование, протоколы и стандарты.
- Лицензия на ПО с открытым исходным кодом обеспечивает свободный доступ к исходному коду и не привязывает к определенному поставщику.
- В силу этих причин Linux – идеальная выбор для создания сложных систем [2, С. 26].

Благодаря общей кодовой базе, Linux может быть использован на самых различных устройствах, начиная от мощных суперкомпьютеров и заканчивая наручными часами. Ядро Linux – это только один компонент, необходимый для создания функционирующей операционной системы, также необходимы базовые инструменты, такие как командная оболочка, а также графический интерфейс пользователя, который обеспечивает взаимодействие с прикладным ПО. Комбинация ядра Linux и широкого спектра других открытых компонентов обеспечивает основу для создания систем, способных выполнять различные задачи [1, С. 10].

Гибкость – это свойство, которое имеет свои плюсы и минусы. С одной стороны, она дает проектировщику системы широкий спектр возможных решений, но с другой стороны, это приводит к проблеме выбора наиболее оптимального решения. Цель данной статьи заключается в том, чтобы провести подробный анализ методологии сборки и рассказать, как можно создать встраиваемую систему на базе Linux с использованием свободных программ с открытым исходным кодом, получив в результате надежный и эффективный продукт.

#### **Теоретические исследования.**

Жизненный цикл типичного проекта начинается с выбора методологии принятия решения, используемой в управлении качеством выпускаемого продукта [5]. Методология PDCA (Plan-Do-Check-Act), также известная как цикл Деминга-Шухарта представляет собой алгоритм действий по управлению процессом и достижению его целей (рис. 1).

Цикл состоит из четырех этапов:

- Планирование – определение целей и процессов, необходимых для их достижения, разработка планов для достижения целей и удовлетворения потребностей потребителей, а также выделение и распределение необходимых ресурсов.
- Выполнение – реализация запланированных работ.
- Проверка – сбор информации и контроль за результатами на основе ключевых показателей эффективности (KPI), выявление и анализ отклонений, а также определение причин отклонений.
- Корректировка – принятие мер по устранению причин отклонений от запланированного результата, изменение планирования и распределения ресурсов.



Рисунок 1 – Цикл Деминга-Шухарта

Применение методологии PDCA в целях создания Linux-системы для встраиваемых устройств представляет собой простую и наглядную модель.

Шаг 1. Планирование. В этом шаге мы устанавливаем цели и процессы, необходимые для создания надежной и эффективной Linux-системы для встраиваемых устройств. Определяем функциональные и нефункциональные требования к системе, учитывая потребности пользователей. Составляем план работ, устанавливаем этапы сборки, включая сборку ядра Linux, выбор загрузчика, файловой системы, системы инициализации и создание пользовательского интерфейса [2, С. 29]. Определяем необходимые ресурсы для сборки Linux-системы, такие как оборудование и инструменты сборки.

Шаг 2. Выполнение. В этом шаге мы выполняем запланированные работы и создаем Linux-систему для встраиваемых устройств. Сборка ядра Linux проходит в соответствии с требованиями к системе и типом встраиваемого устройства. Создание файловой системы, включая установку программного обеспечения и настройку параметров. Создание и настройка пользовательского интерфейса, учитывая потребности пользователей и особенности встраиваемого устройства.

Шаг 3. Проверка. В этом шаге происходит сбор информации и контроль результатов, чтобы оценить эффективность Linux-системы для встраиваемых устройств. Собираем информацию о процессе сборки и работы системы, используя ключевые показатели эффективности (KPI). Проводим анализ полученных результатов и выявляем отклонения от заданных целей. Выявляем причины отклонений и проблем, которые могут возникнуть при работе системы.

Шаг 4. Корректировка. В этом шаге мы принимаем меры по устранению причин отклонений и улучшению работы Linux-системы для встраиваемых устройств. Принимаем меры по устранению причин отклонений от заданных целей. После того, как были устранены все обнаруженные проблемы, можно приступить к реализации конечного продукта. Однако, необходимо учитывать, что сборка Linux-системы для встраиваемых устройств – это постоянно развивающийся процесс, и его необходимо постоянно улучшать и совершенствовать (рис. 2). В этом этапе рекомендуется провести оценку результатов работы и разработать новые задачи и планы для улучшения процесса сборки.

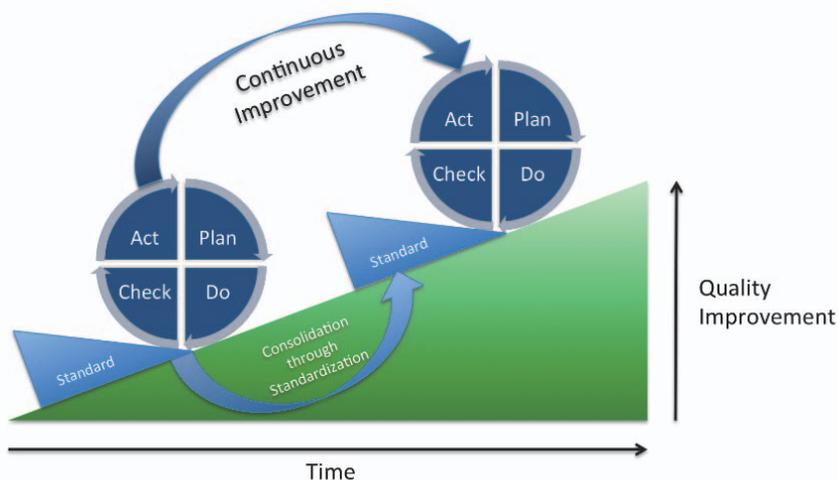


Рисунок 2 – Непрерывное улучшение качества с помощью методологии PDCA

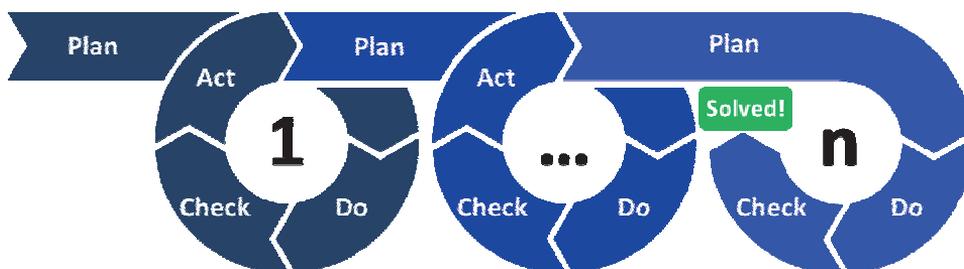


Рисунок 3 – Несколько итераций цикла PDCA повторяются до тех пор, пока проблема не будет решена

Таким образом, процесс может продолжаться в круговороте, повторяя все этапы методологии PDCA и обеспечивая постоянное совершенствование (рис. 3). В итоге, следуя методологии PDCA, можно собрать надежную и эффективную Linux-систему для встраиваемых устройств, которая будет соответствовать всем требованиям и потребностям пользователей в рамках активного импортозамещения.

Процесс ручной сборки загрузочной среды Linux обладает одним главным преимуществом – сохранением полного контроля над программным обеспечением. Но в большинстве случаев ручная сборка влечёт за собой большие временные затраты, что в результате даёт систему низкого качества с неудобным для неё сопровождением. Построение такой системы идёт постепенно и может занять долгие месяцы, часто не документируется и редко может быть воссоздана с чистого листа.

Выходом из такой ситуации является использование автоматизированных систем сборки. Цель системы сборки – автоматизировать все вышеописанные шаги этапа планирования. Для достижения своих целей система сборки должна уметь следующее [2, С. 140]:

- Работать с исходным кодом. Загрузка кода из источника – прямо из системы управления версиями (Git / Mercurial / SVN и др.) или в виде архива с сохранением его на локальной машине.
- Обеспечить кросс-компиляцию за счёт применения патчей, исправляющих архитектурно-зависимые ошибки.
- Создать область технологической подготовки и построить корневую файловую систему.
- Создать образы в различных форматах, готовых к загрузке на целевое устройство.
- Добавлять собственное программное обеспечение или различные модификации системы.
- Создавать автономный набор средств разработки (SDK), который можно распространять среди других разработчиков, чтобы им не пришлось устанавливать полную систему сборки.
- Следить за лицензиями, применяемыми в различных использованных пакетах программ с открытым исходным кодом.
- Способность создавать обновления, применимые к уже установленным системам.
- Наличие удобного интерфейса с пользователем.

Компоненты такой системы инкапсулированы в виде пакетов, одни из которых предназначены для системы разработки, другие – для целевой системы. Для каждого пакета определен набор правил получения исходного кода, его сборки и установки результата в требуемое место. Между пакетами существуют зависимости, и механизм сборки должен уметь их разрешать и создавать полный набор требуемых пакетов.

За последние годы системы сборки с открытым исходным кодом достигли высокой степени зрелости. Buildroot и Yocto Project – это две популярные системы сборки встроенных Linux-систем. Они используются для создания пользовательских Linux-образов, оптимизированных для работы на встроенных системах, таких как встраиваемые устройства, IoT-устройства, мобильные устройства и другие решения встроенной электроники. Обе системы имеют свои особенности, преимущества и недостатки, и выбор между ними зависит от требований проекта и опыта разработчиков.

Buildroot – это система сборки, основанная на конфигурационных файлах, которая позволяет создавать минимальные и оптимизированные Linux-образы для встроенных систем [3]. Она предлагает простой подход к сборке, где разработчик определяет конфигурацию сборки путем настройки текстовых файлов [2, С. 162]. Buildroot имеет маленький размер и прост в использовании, что делает его подходящим выбором для небольших проектов или для разработчиков с ограниченным опытом встроенной разработки. Однако, Buildroot может ограничиваться в функциональности и расширяемости по сравнению с Yocto Project.

Yocto Project – это более мощная и сложная система сборки, основанная на мета-слоях и рецептах [4]. Она предлагает более гибкий и масштабируемый подход к созданию Linux-образов и предоставляет множество инструментов и

возможностей для настройки, адаптации и расширения функциональности образов [2, С. 163]. Yocto Project также поддерживает широкий спектр аппаратного обеспечения и архитектур процессоров, что делает его подходящим выбором для сложных проектов и профессиональных разработчиков.

Простота использования, размер и производительность образов, обучение и поддержка разработчиков являются ключевыми особенностями для выбора системы автоматизированной сборки для встраиваемой системы удалённого доступа.

### Экспериментальное исследование методологий сборки загрузочной среды Linux для встраиваемых систем.

Для определения наиболее гибкой, удобной, кроссплатформенной и автоматизированной сборочной среды для встраиваемых систем были проведены необходимые экспериментальные исследования. Для этого был собран тестовый стенд, обладающий характеристиками, представленными в таблице 1.

**Таблица 1 – Характеристики тестового стенда**

Характеристика	Описание	
	Сборочная среда	Встраиваемая система
Процессор	Intel Core i7-2620M CPU @ 2.70Ghz	Broadcom BCM2711, Quad core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1.8GHz
ОЗУ	16Gb	2Gb
ПЗУ	SSD 128Gb	microSD 8Gb
Операционная система	ALT Linux Sisyphus	-
Командная оболочка	Bash	-

*Автоматизированная сборка встраиваемой системы с помощью инструментария Buildroot.*

Первый шаг – подготовка сборочной среды. Получаем архив через официальный сайт <https://buildroot.org> или напрямую с репозитория кода через команду в эмуляторе терминала:

```
$ mkdir ~/project && cd $_
$ git clone -b 2023.02.x git://git.buildroot.net/buildroot.git
```

Здесь 2023.02 – текущее название версии Buildroot на момент написания статьи.

Второй шаг – получаем информацию о наличии поддержки платформы встраиваемой системы (рис. 4):

```
$ cd buildroot
$ make list-defconfigs | grep "raspberrypi"
```

```
└─>$ make list-defconfigs | grep "raspberrypi"
raspberrypi0_defconfig          - Build for raspberrypi0
raspberrypi0w_defconfig         - Build for raspberrypi0w
raspberrypi2_defconfig          - Build for raspberrypi2
raspberrypi3_64_defconfig       - Build for raspberrypi3_64
raspberrypi3_defconfig          - Build for raspberrypi3
raspberrypi3_qt5we_defconfig    - Build for raspberrypi3_qt5we
raspberrypi4_64_defconfig       - Build for raspberrypi4_64
raspberrypi4_defconfig          - Build for raspberrypi4
raspberrypicm4io_64_defconfig   - Build for raspberrypicm4io_64
raspberrypicm4io_defconfig      - Build for raspberrypicm4io
raspberrypi_defconfig           - Build for raspberrypi
raspberrypizero2w_defconfig     - Build for raspberrypizero2w
```

**Рисунок 4 – Список поддерживаемых моделей  
одноплатного компьютера Raspberry Pi**

Если платформа отсутствует, есть несколько вариантов решения проблемы:

- Найти «схожую» модель из существующих, в том числе воспользоваться поиском на специализированных форумах, и создать отдельный файл конфигурации платформы.
- Обратиться за получением информации к производителю.

Третий шаг – создаём чистый, стандартный конфигурационный файл для выбранной платформы:

```
$ make raspberrypi4_64_defconfig
```

Четвертый шаг – редактируем конфигурационный файл через меню (рис. 5). На этом этапе производится добавление/удаление требуемых для проекта пакетов и компонентов программного обеспечения:

```
$ make menuconfig
```

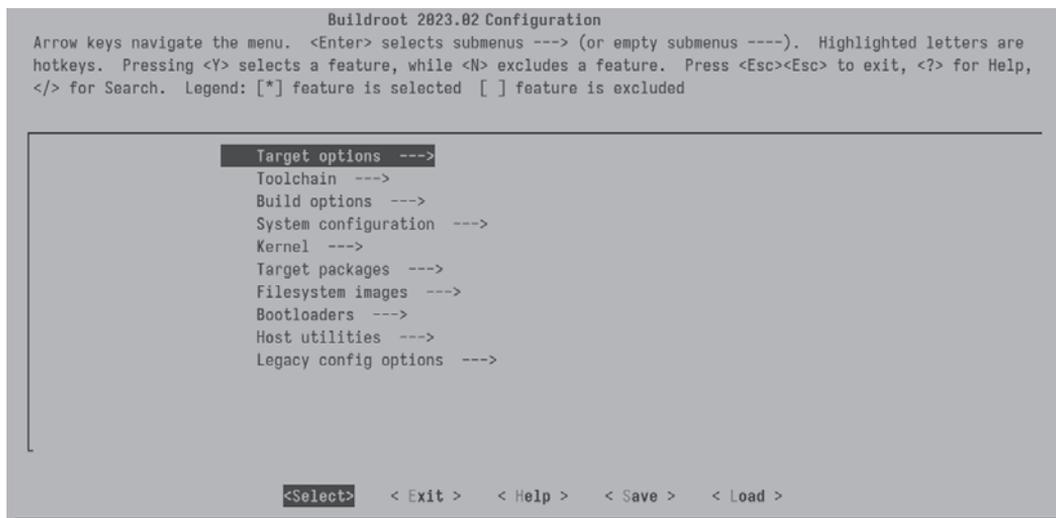


Рисунок 5 – Меню конфигурации Buildroot

Если пакет ПО отсутствует в меню, или требуется собрать пакет со своими зависимостями и требуемыми опциями, есть возможность его предварительно добавить.

После внесения требуемых от проекта изменений, сохраняем конфигурационный файл и переходим к сборке образа для встраиваемой системы. Тестовый стенд сборочной среды обладает 4-мя ядрами процессора. Для выделения всех ядер процессора и начала сборки используем следующую команду:

```
$ make -j$(nproc)
```

Команда *nproc* автоматически подставит максимальное значение количество ядер процессора. В ином случае можно указать конкретное значение, иначе сборка будет происходить только на 1-ом ядре, что не даст прироста производительности при сборке:

```
$ make -j4
```

Сборка чистого образа системы с использованием инструментария Buildroot заняла 2 часа 31 минуту. В это время входит получение исходных кодов из сети Интернет, необходимых для сборки под конкретную платформу, а также сама компиляция и упаковка итогового образа системы, готового для установки. Размер готового образа составил 153Mb.

Для установки образа на microSD можно воспользоваться программой *dd*.

```
# dd if=путь_до_образа of=/dev/mmcblk0
```

*Автоматизированная сборка встраиваемой системы с помощью инструментария Yocto Project.*

Первый шаг – подготовка сборочной среды. Получаем архив через официальный сайт <https://www.yoctoproject.org> или напрямую с репозитория кода через команду в эмуляторе терминала:

```
$ mkdir ~/project && cd $_
$ git clone -b langdale git://git.yoctoproject.org/poky.git
```

Здесь langdale – текущее название версии Yocto Project на момент написания статьи.

Второй шаг – добавляем поддержку платформы встраиваемой системы:

```
$ cd poky
$ git clone -b langdale git://git.yoctoproject.org/meta-raspberrypi
```

Третий шаг – создаём рабочее окружение для сборки с помощью скрипта, входящего в состав инструментария:

```
$ cd .. && source poky/oe-init-build-env rpi-build
```

Четвертый шаг – редактируем конфигурационный файл слоёв для включения поддержки платформы и добавляем слой *meta-raspberrypi*:

```
$ vim conf/bblayers.conf
conf/bblayers.conf
BBLAYERS ?= " \
  /home/creator/poky/meta \
  /home/creator/poky/meta-poky \
  /home/creator/poky/meta-yocto-bsp \
  /home/creator/poky/meta-raspberrypi \
"
```

Также необходимо внести изменения в файл *local.conf*. Изменить архитектуру на *raspberrypi4-64*, раскомментировать строку путей загрузки файлов, кэша сборщика, и каталога временных файлов, а также добавить тип файловой системы будущего образа:

```
$ vim conf/local.conf
conf/local.conf
MACHINE ??= "raspberrypi4-64"
DL_DIR ?= "${TOPDIR}/downloads"
SSTATE_DIR ?= "${TOPDIR}/sstate-cache"
TMPDIR = "${TOPDIR}/tmp"
IMAGE_FSTYPES = "ext4.xz rpi-sdimg"
SDIMG_ROOTFS_TYPE = "ext4.xz"
```

После внесения требуемых от проекта изменений, сохраняем конфигурационные файлы и переходим к сборке образа для встраиваемой системы:

```
$ bitbake -k core-image-minimal
```

Сборка чистого образа системы с использованием инструментария Yocto Project заняла 4 часа 38 минут. В это время входит получение исходных кодов из сети Интернет, необходимых для сборки под конкретную платформу, а также компиляция, упаковка пакетов ПО и итогового образа системы, готового для установки. Размер готового образа составил 68Mb.

Для установки образа на microSD можно воспользоваться программой *dd*.

```
# dd if=путь_до_образа of=/dev/mmcblk0
```

### Выводы

Результаты исследования показали (табл. 2), что сборочная система Buildroot оказалась более эффективной по сравнению с Yocto Project.

**Таблица 2 – Результаты анализа автоматизированных средств сборки загрузочной среды для встраиваемых устройств**

Характеристика	Инструментарий сборки	
	Buildroot	Yocto Project
Итоговый размер инструментария для сборки чистой встраиваемой системы	7.6Gb	31.7Gb
Визуальный интерфейс	Присутствует, ncurses	Отсутствует
Итоговый размер образа встраиваемой системы	153Mb	68Mb
Время, затраченное на сборку	2 часа 31 минута	4 часа 38 минут
Скорость загрузки образа на встраиваемой платформе	15 секунд	23 секунды

Buildroot предлагает простой и легкий в освоении интерфейс, оптимизированные, но менее компактные образы, а главное быструю сборку и загрузку образа, что делает его предпочтительным выбором в случае разработки встраиваемой системы для удалённого доступа.

#### *Литература*

1. Кристофер Н. Библия Linux 10 изд. 2022. 928 с.
2. Симмондс К. Встраиваемые системы на основе Linux. 2017. 360 с.
3. Документация к Buildroot [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://buildroot.org/downloads/manual/manual.html> (дата обращения: 12.04.2023).
4. Документация к Yocto Project [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.yoctoproject.org/brief-yoctoprojectqs/index.html> (дата обращения: 12.04.2023).
5. Shewhart-Deming's Learning and Quality Cycle [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://foresightguide.com/shewhart-and-deming/> (дата обращения: 12.04.2023).

УДК 621.391

## Совершенствование мобильного приложения для приема заказов

**Александр Петрович Мороз**, доктор технических наук, профессор  
Технологического университета, Академик Российской академии космонавтики,  
**Аббосбек Абдумутал угли Бегимов**, студент-магистр,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,  
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

*В настоящее время на практике и в повседневной жизни у населения развитых стран получили широкое распространение различные мобильные приложения. Однако, в сфере обслуживания такие технологии пока не получили широкого применения. Обычно в точках общественного питания официант, в соответствии с общепринятыми нормами сервиса, вежливо и с улыбкой на лице встречает посетителей, предлагает занять свободный столик. После чего приносит меню для выбора представленных в нем блюд. Затем достает блокнот и ручку. Приняв у посетителей заказ, он записывает все в блокнот и удаляется для выполнения заказа. В статье рассматриваются вопросы совершенствования данной технологии.*

Разработка, мобильное приложение, надежность.

## Improvement of the mobile application for receiving orders

**Alexander Petrovich Moroz**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Technological University, Academician of the Russian Academy of Cosmonautics,  
**Abbosbek Abdumutal ugli Begimov**, Master's student,  
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,  
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

*Currently, in practice and in everyday life, various mobile applications have become widespread among the population of developed countries. However, such technologies have not yet been widely used in the service sector. Usually, in public catering outlets, the waiter, in accordance with the generally accepted norms of service, politely and with a smile on his face greets visitors, offers to take an empty table. After that, he brings a menu to choose the dishes presented in it. Then he takes out a notebook and a pen. After accepting an order from visitors, he writes everything down in a notebook and is removed to fulfill the order. The article discusses the issues of improving this technology.*

Development, mobile application, reliability.

*Актуальность* рассматриваемой тематики обусловлена, во-первых, возрастающим интересом к вопросам совершенствования технологии приема заказов в кафе и ресторанах на основе разработки мобильных приложений, с другой стороны, недостаточной эффективностью известных решений. Кроме того, разработка и применение передовых технологий в рассматриваемой сфере позволит повысить качество обслуживания посетителей и эффективность бизнеса таких заведений.

*Научная новизна* исследования характеризуется использованием новых решений (в том числе и облачных) для совершенствования мобильного приложения.

*Практическая значимость* заключается в возможности практического применения полученных результатов в области ресторанного бизнеса.

Внедрение мобильных разработок на операционной системе Андроид является популярным решением на сегодняшний день в связи с распространённостью данной операционной системы. Пользователи общественного питания с функцией обслуживания (кафе, рестораны, фудкорты) часто посещают данные места небольшими группами по несколько человек, значительно реже – большими группами. Количество посетителей может варьироваться от одного человека до нескольких десятков. Как правило, в большинстве случаев этих людей по правилам общественного питания обслуживает один официант. При значительном количестве посетителей сотрудник может легко допустить ошибки при приеме заказов. Обычно в одной и той же группе находятся такие посетители, которые, не соблюдая своей очереди, начинают задавать сотруднику вопросы и вмешиваются в процесс формирования заказа. Довольно часто эта процедура превращается громкими возгласами, от чего сотрудник путается в собственных записях в блокноте и может совершить ошибку при приеме заказа либо забыть записать что-либо из заказанных блюд (рис. 1). Стоит отметить, что опытный сотрудник всегда старается перепроверить заказ и уточнить все детали, прежде чем перейти к выполнению заказа.

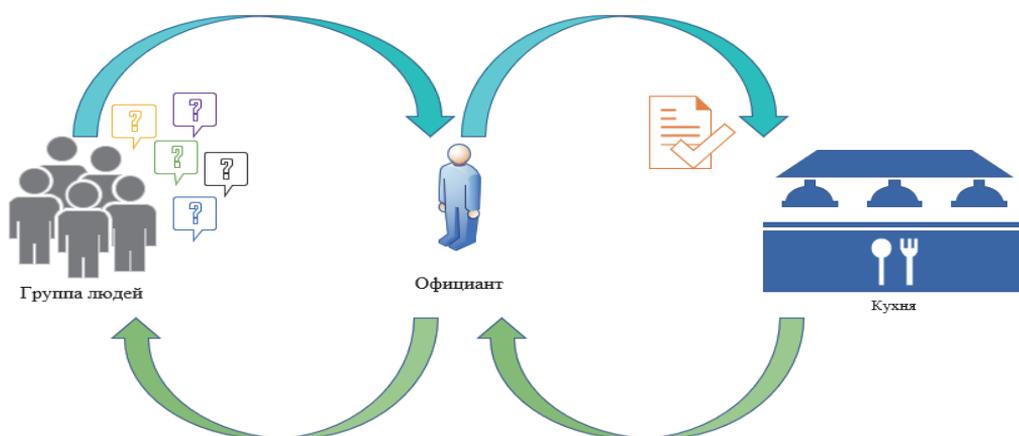


Рисунок 1 – Прием заказа

Но, как известно, опытные идеальные сотрудники встречаются не всегда и не во всех заведениях общественного питания. В настоящее время точек общественного питания очень много, а их локация обширна. Они предлагают огромное разнообразие блюд и напитков. Суть задачи состоит в том, чтобы свести все недочеты и пробелы при приеме заказов в точках общественного питания к минимальному уровню затрат по времени. Стоит учесть и то, что у разных сотрудников наблюдается разный подход к работе и имеющийся у них опыт работы в сфере обслуживания разный. Поэтому при разработке приложения необходимо учитывать все основные возможные факторы, чтобы в случае возникновения спорной ситуации исправить положение дела, а для этого необходимо сделать процесс приема заказа легким и интуитивно понятным.

Подводя итог, важно отметить, что это поможет не только ускорить процесс принятия заказов, но и повысить репутацию заведения, что может привести к увеличению количества посетителей и поднять общую прибыль заведения.

*Цель и задачи.*

*Целью* данного проекта является совершенствование процесса приема заказов в кафе, ресторанах и т.п. на основе разработки и применения эффективного мобильного приложения. Это может быть достигнуто путем ускорения процесса приема заказа, а также упрощением самой процедуры оформления заказа и повышения качества его выполнения.

*Объект исследования* – информационное обеспечение управлением процесса взаимоотношений между сотрудниками и посетителями ресторанов.

*Предмет исследования* – концепция разработки эффективного мобильного приложения для приема заказов в заведениях общественного питания.

Для того, чтобы поставленная цель была достигнута, необходимо провести исследование по следующим направлениям.

1. Сформулировать требования к решаемой научной задаче и выполнить ее формализованную постановку.
2. Проанализировать существующие в настоящее время решения для приема заказов.
3. Определить основные недостатки применяемых на практике решений.
4. Провести исследование возможных вариантов в области разработки мобильных приложений и выбор из них наиболее рациональных.

*Постановка задачи*

*Дано:*

- Допустимое множество  $X$  из элементов  $\chi$  вариантов процесса приема и выполнения заказов.
- Целевая функция  $f(\chi)$  – сложность процесса приема и выполнения заказа при качестве обслуживания  $K \geq K_{\text{доп}}$  не ниже допустимого.

*Необходимо:*

- Среди элементов  $\chi$ , образующих множество  $X$ , найти такой элемент  $\chi^*$ , который доставляет минимальное значение  $f(\chi^*)$  заданной функции  $f(\chi)$ :

$$f(\chi) \rightarrow f(\chi^*) = \min \\ \text{при } K \geq K_{\text{доп.}}$$

*Существующие решения приема заказов*

Как бы странно в наше время это не звучало, но по сей день актуальным способом приема заказов в ресторанах и других точках общественного питания остается способ, основанный на использовании блокнота и ручки (карандаша). Этот способ проявил себя как самый простой и доступный в этой сфере. Данный метод имеет как плюсы, так и минусы.

*Достоинства (плюсы)*

1. Цена.
2. Доступность.
3. Быстрая запись позиций.
4. Разделение стола на секторы (путем черчения линий).
5. Легкая заменяемость.

*Недостатки (минусы)*

1. Блокнот и ручка могут потеряться.
2. Паста в ручке может закончиться.
3. Страницы блокнота могут закончиться.
4. Ручка может перестать писать в самый неподходящий момент.
5. Сотрудник может не разобраться в своих записях из-за плохого почерка или спешки при приеме заказа, особенно при обслуживании большой компании посетителей.

Как можно наблюдать из списка выше, эти не столь значимые факторы могут повлечь задержку при приеме заказов. А, как правило, задержка выполнения заказов вызывает недовольствие со стороны посетителей, что влечет за собой ухудшение впечатления о заведении, отток посетителей и снижение прибыли заведения.

Одним из недостатков является неполноценная взаимосвязь рабочего персонала и кухни ресторана (рис. 2). Пищевые позиции на кухне являются расходными материалами для приготовления блюд. Не секрет, что некоторые из них могут закончиться в самый неподходящий момент. Из-за того, что обслуживающий персонал не всегда обращается на кухню в связи с уточнением оставшихся позиций, а персонал кухни, в свою очередь, вовремя не уведомляет работников зала ресторана, могут возникнуть конфликтные ситуации с посетителями.

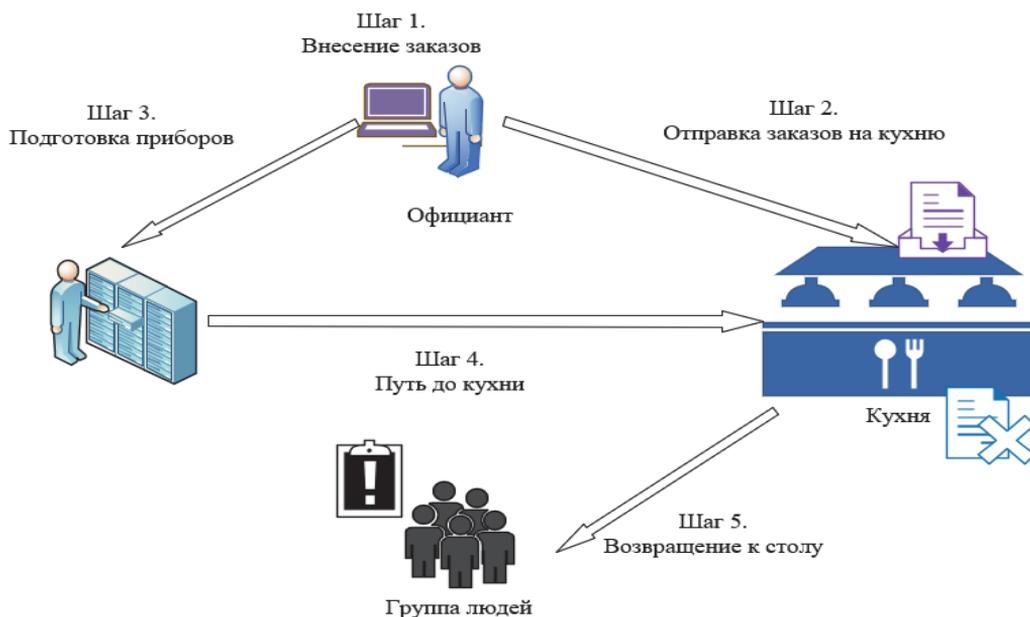


Рисунок 2 – Этапы приема и выполнения заказа

Проведем анализ конкурентных решений. Не секрет, что каждый предприниматель желает сделать свой бизнес как можно более удобным и современным. Благодаря высокому уровню развития цифровых технологий имеются большие возможности для решения подобных задач и развития бизнеса общественного питания (рис. 3).



Рисунок 3 – Функционал приема и выполнения заказа

Упрощенный алгоритм выполнения заказа показан на рисунке 4.



Рисунок 4 – Упрощенный алгоритм выполнения заказа

На данном этапе была сформирована идея создания упрощенной версии интерфейса (рис. 5). Помимо этого, крупные значки позволяют сделать написанный на иконках текст читабельнее.



Рисунок 5 – Упрощенная версия интерфейса

Конкуренция заставляет разрабатывать и реализовывать новые способы для развития предпринимательства в этой сфере. Одним из наиболее перспек-

тивных направлений, отличающихся в настоящее время бурным развитием, является использование возможностей информационных технологий, которые открывает цифровизация процессов приема и выполнения заказов. Отметим, что, несмотря на кажущуюся простоту рассматриваемой задачи, она имеет ряд специфических особенностей, отличающих ее от аналогичных задач в других высокотехнологичных областях, например, задач информационно-телеметрического обеспечения при испытаниях и штатной эксплуатации изделий ракетной и ракетно-космической техники [1, 2]. В настоящее время в нашей стране известен ряд подобных приложений для приема заказов и учета товаров именно в ресторанах и аналогичных заведениях. К таким приложениям можно отнести следующие:

1. FairSplit.
2. Repayr – SplitBill.
3. CleverBillSplitter.
4. Делим чек.
5. Split Bill Advanced.
6. Splittpay.

Проанализируем их.

*FairSplit* [3] – это мобильное приложение для разделения чеков в кафе и ресторанах.

Принцип его работы заключается в следующем. *FairSplit* – мобильная разработка, позволяющая разделить итоговый чек между несколькими пользователями. Разработка ограничивается всего лишь одной валютой – рублем. Недостатки приложения заключаются в следующем.

1. Пользователь вынужден скачивать и устанавливать отдельное приложение на свой смартфон для проведения операции разделения.

2. Скачанное мобильное приложение занимает определенный объем памяти на устройстве. В связи с этим не каждый пользователь готов устанавливать стороннее приложение на свой смартфон.

*Repayr – SplitBills* [4] – аналогичное приложение с функцией приема заказов.

Недостатком приложения является интерфейс *CleverBillSplitter* [5] – приложение не русифицировано, выполнено полностью на иностранном языке и работает исключительно через камеру устройства. Правда, имеется ручной ввод. Недостатком является также неотработанное программное обеспечение и неотработанное распознавание позиций.

*Делим чек* [6] – из-за небогатого функционала алгоритм приложения не всегда может учитывать дополнительные запросы пользователя.

*Split Bill Advanced* [7] – имеет в своем арсенале понятный интерфейс, но непривлекательный дизайн. Работает только на английском языке.

*Splittpay* [8] – из-за несвоевременной поддержки приложение сбрасывается в исходное состояние, в связи с чем приходится снова повторно вводить все данные заказа.

Результаты проведенного анализа показывают, что каждое приложение обладает определенным набором как достоинств, так и недостатков. На рынке мобильных приложений царит высокий уровень конкуренции, но, тем не менее, достигнутый уровень сервиса при использовании известных приложений желает

быть лучшим. Поэтому актуальной задачей является создание более эффективно-го концепта мобильного приложения для приема заказов в кафе и ресторанах.

Проведем обзор актуальных платформ.

*Appery.io* [9] – клауд сервис с функцией доплаты, который позволяет разработать с нуля приложения для следующих приложений: iOS, Android, WindowsPhone. Внешний вид юзера создается перемещением необходимых графических утилит. Для новых пользователей имеются стартовые курсы. Помимо drag-and-drop интерфейса имеется функция исправления стартового исходного кода.

*ShoutEm* [10] – подлежащий уплате конструктор, работающий в режиме реального времени.

Кроссплатформенный сервис для создания мобильных разработок с современными дизайнерскими предложениями и широким спектром инструментов для переработки любого шаблона кода. Имеет возможность создавать мобильные разработки, исключая этап кодирования.

*Eclipse* [11] – интегрированная среда разработки с открытым для пользователей стартовым кодом, инструмент сборки – беспроводная передача данных. Прост в настройке, сочетается с AndroidDeveloperTools. Имеет на своем борту большое количество обучающих курсов и статей разработчиков, презентующих внешний вид существующей среды разработки. В настоящее время официальная поддержка этой интегрированной среды приостановлена, из-за этого, как следствие, для производства под Android она является практически не востребованной.

*IntelliJ IDEA* [12] – огромный арсенал инструментов редактирования, имеется разработка шаблонных функций, так же есть возможность менять дизайн тем оформления. Среди полезных фиш кодирования можно выделить наличие редактора графики внешнего вида, возможность реализовать с нуля внешний вид благодаря оригинальному применяемому методу формирования изображений, закрывание скобок после условия в автоматическом режиме.

*Android Studio* [13] – новая официальная интегрированная среда разработки под Android, на базе проекта заложено IntelliJ IDEA. В ней есть автокорректировка исходного кода, современный режим отладки, для объединения файлов применяется технология Gradle и языки автоматической сборки. На старте кодирования предлагается широкий выбор готовых заводских шаблонов мобильного приложения. Интегрированная среда разработки поддерживает набор инструментов для создания приложений на базе Android и дает возможность исправлять проектные данные на C/C++, а также имеет в своем составе возможность создания для них встроенного дебаггера на основе отладчика. В качестве достоинств Android Studio можно отметить наличие удобного и современного редактора шаблонов с внешним видом от drag-and-drop, позволяющим быстро редактировать файлы в режиме реального времени без ожидания. Начиная с версии 2.3 была разработана и применена технология, которая позволяет сократить время сборки данных. Таким образом, она дает ускорение всем процессам на тестируемом устройстве. Благодаря усердной работе Google и JetBrains платформу рекомендуют ведущие андроид разработчики для разработки и внедрения мобильных приложений.

На рисунке 6 представлена структура интерфейса с расширенным функционалом.

На сегодняшний день алгоритм перехода такого типа является самым быстрым. На уровне кода он представляет собой скрытую ссылку для быстрого перехода на нужную страницу.

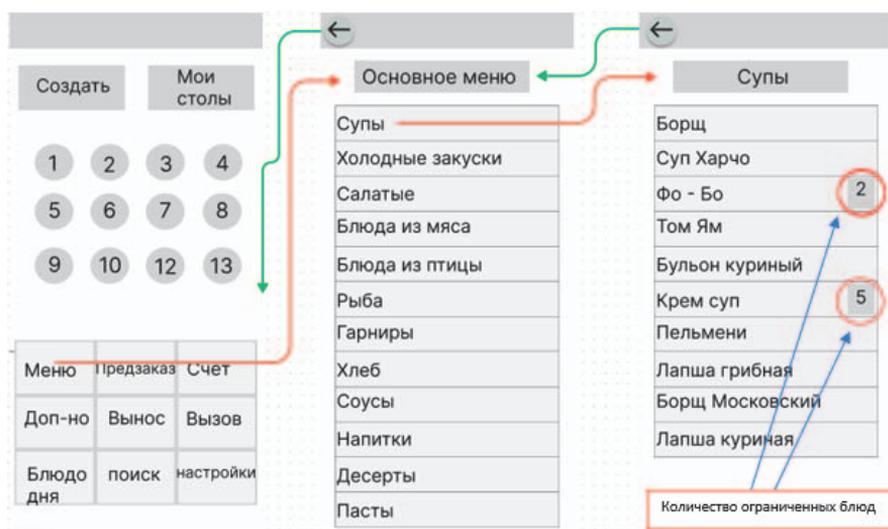


Рисунок 6 – Структура интерфейса с расширенным функционалом

На рисунках 7...9 представлены элементы расширенного интерфейса: с базовыми функциями, с дополнительными функциями и с некоторыми особенными функциями.

Благодаря функции электронного чека (рис. 9) обеспечивается возможность отказаться от потребления для этого бумаги, тем самым вносится вклад в сохранение природных ресурсов.

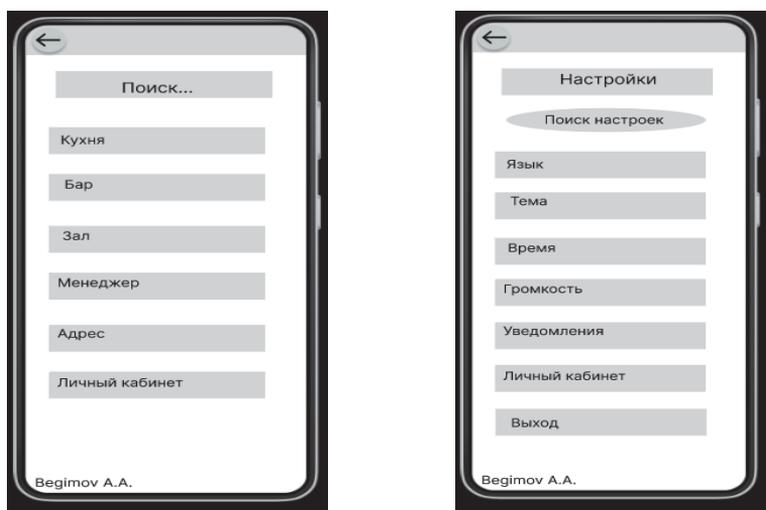


Рисунок 7 – Интерфейс с базовыми функциями



Рисунок 8 – Интерфейс с расширенными функциями

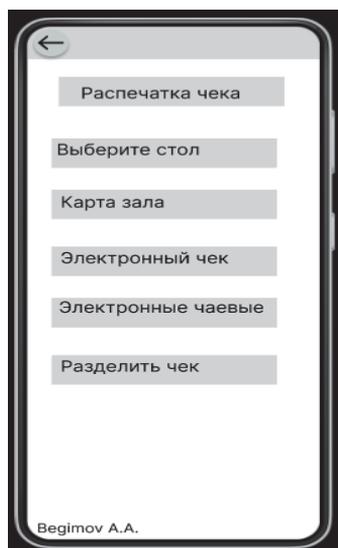


Рисунок 9 – Интерфейс с особыми функциями

### Выводы

Разработка мобильного приложения для приема заказов в ресторанах является актуальной и перспективной задачей. Такое приложение может значительно улучшить качество обслуживания посетителей и повысить эффективность работы ресторанов.

Результаты исследования могут быть использованы для дальнейшего развития и совершенствования подобных приложений, а также для принятия решений по повышению эффективности ресторанного бизнеса.

### Литература

1. Мороз А.П. Повышение эффективности телеметрирования быстроменяющихся параметров при натурных испытаниях летательных аппаратов / А.П. Мороз: Монография : Королев МО, ФТА. 2012. 224 с.

2. Мороз А.П. Ракетная телеметрия: Монография / А.П. Мороз. М.: Издательство «Научный консультант». 2021. 478 с.
3. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [Apps.apple.com/ru/app/fairsplit-split-the-bill/id1463622575?l=en](https://apps.apple.com/ru/app/fairsplit-split-the-bill/id1463622575?l=en) (дата обращения 18.04.2023).
4. Приложение в гугл-плей – Split Bills – Repayr [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://play.google.com/store/apps/details?id=lundesoft.com.repayrlight&hl=ru> (дата обращения 09.03.2023).
5. Приложения в Google Play – Clever Bill Splitter [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.cleverturtles.splitter&hl=ru> (дата обращения 09.03.2023).
6. Приложение в гугл-плей – Делим чек [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://play.google.com/store/apps/details?id=com.wemir\\_apps.split\\_bill&hl=ru](https://play.google.com/store/apps/details?id=com.wemir_apps.split_bill&hl=ru) (дата обращения 09.03.2023).
7. Приложение в гугл-плей – Split Bill Advanced [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://play.google.com/store/apps/details?id=br.com.fml.splitbilladvance2&hl=ru> (дата обращения 09.03.2023).
8. Приложение в гугл-плей – SplittPay подели чек с товарищем! [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.github.rchugunov.splitpay&hl=ru> (дата обращения 09.03.2023).
9. Appery.io: Enterprise Mobile App Builder & MBaaS [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://appery.io/> (дата обращения 09.03.2023).
10. Shoutem-Make an App-Build Apps with Easy Application Creator [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.shoutem.com](http://www.shoutem.com) (дата обращения 09.03.2023).
11. MVP and MVC Architectures in Android [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.techyourchance.com/mvp-mvc-android-1/> (дата обращения 09.03.2023).
12. Shoutem-Make an App-Build Apps with Easy Application Creator [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.shoutem.com](http://www.shoutem.com) (дата обращения 09.03.2023).
13. Android Studio Features [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://developer.android.com/studio/features.html> (дата обращения 09.03.2023).

УДК 004.896

**Концепция создания автоматизированного протеза манипулятора на основе использования аналоговой системы связи и машинного обучения**

**Андрей Дмитриевич Орлов**, аспирант первого года обучения кафедры «Информационные технологии и управляющие системы»,  
**Елена Николаевна Дмитренко**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информационные технологии и управляющие системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

*В статье представлен обзор предполагаемой архитектуры, конструкторских решений, состав комплектующих, алгоритмы используемого программного кода контроллера для обеспечения работы системы проектируемого протеза манипулятора с целью эксплуатации людьми с ограниченными возможностями и повреждением верхних конечностей.*

Манипулятор, аналоговые системы, машинное обучение, контроллер, экзоскелет, сервопривод.

**The concept of creating an automated manipulator prosthesis based on the use of an analog communication system and machine learning**

**Andrey Dmitrievich Orlov**, postgraduate student of the first year of study of the Department of Information Technologies and Control Systems,  
**Elena Nikolaevna Dmitrenko**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Technologies and Control Systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

*The article presents an overview of the proposed architecture, design solutions, composition of components, algorithms of the controller program code used to ensure the operation of the system of the designed manipulator prosthesis for the purpose of exploitation by people with disabilities and damage to the upper limbs.*

Manipulator, analog systems, machine learning, controller, exoskeleton, servo.

Разработка автоматизированных протезов манипуляторов с использованием аналоговых систем и машинного обучения является важной темой исследований в области протезирования. Эта технология потенциально способна рево-

люционизировать способ проектирования протезов конечностей и их использования людьми со слабо развитыми, или поврежденными верхними конечностями. На данный момент направление протезирования для людей этой категории (далее, люди с ограниченными возможностями), недостаточно развито, так как инвалиды все еще могут пользоваться остаточными манипулятивными возможностями рук.

Одной из главных проблем, с которыми сталкиваются люди со слабо развитыми, или поврежденными верхними конечностями, является сложность выполнения задач, связанных с мелкой моторикой, таких как поднятие мелких предметов, набор текста на клавиатуре и прочих бытовых действий.

Традиционные протезы конечностей основаны на механических системах, которые управляются остаточными мышцами конечностей пользователя, но они могут быть ограничены в своей функциональности и отзывчивости.

Для людей с ограниченными возможностями используются экзосистемы для облегчения передвижения, аналогичные системам для работы на складе и прочих работах, связанных с поднятием тяжелых предметов. Существующие экзосистемы крайне дороги в производстве и невозможны к приобретению частными лицами по вышеописанной причине. Люди с ограниченными возможностями не нуждаются в полноценном экзоскелете, также он не подходит к использованию по причине своей громоздкости и необходимости применения емких элементов питания.

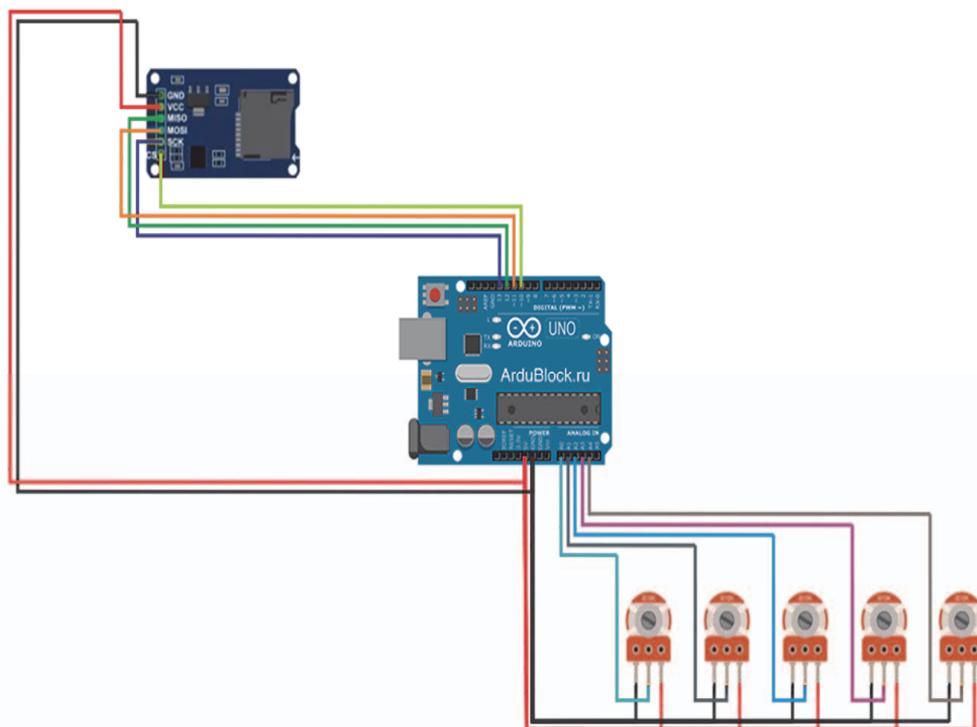
При проектировании протезов манипуляторов необходимо учитывать индивидуальные особенности каждого отдельного потребителя. Благодаря гибкой платформе и производству деталей с использованием экструзионной печати на 3D принтере [2], представляется возможность перестраивать и адаптировать манипулятор под каждого отдельного пользователя, в зависимости от цели и необходимого модуля.

Благодаря включению аналоговых систем в конструкцию, такие протезы конечностей могут работать с меньшим энергопотреблением, что делает их более портативными и удобными для пользователей, уменьшает общие габариты и массу протеза манипулятора. Предлагаемый автоматизированный протез манипулятор будет иметь конструкцию и систему крепления, никак не воздействующую на руку или фрагмент руки человека [8]. Основная задача протеза – стабилизировать и возвращать ротацию конечностей потребителя или оказывать вспомогательное воздействие в реабилитационных целях. Более того, алгоритмы машинного обучения могут со временем адаптироваться к конкретным потребностям и предпочтениям пользователя, обеспечивая более персонализированное и интуитивно понятное управление [1].

Конструкция автоматизированных протезов манипуляторов разрабатывается на частичном использовании экзо системы. Конструкция состоит из следующих составных частей:

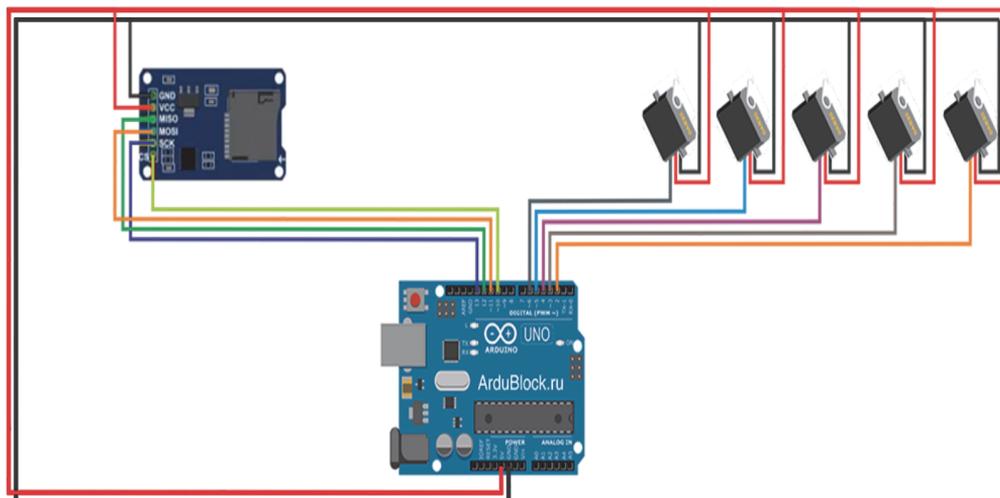
1. Пульта управления (экзо перчатка);
2. Блок управления;
3. Экзосистема на плечевой сустав носителя;
4. Автономный протез манипулятор.

Пульт управления изготавливается по индивидуальным требованиям и особенностям носителя и представляет из себя конструкцию в виде экзоскелетной перчатки с предустановленными потенциометрами, рассчитанными на снятие положения пальца носителя. Схема подключения приведена на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Схема подключения потенциометров к микроконтроллеру экзоскелетной перчатки**

Снятие показаний расположения каждого пальца носителя реализуется за счет изменения сопротивления потенциометра с настраиваемым резистором, использующим кручение. Преобразование линейного движения пальца в крутящий момент на валу потенциометра создается с использованием системы крепления вдоль каждой отдельной фаланги пальца экзоперчатки и закрепленной вдоль пальца нейлоновой нити. Диск, крепящийся к валу потенциометра, имеет различный размер, но одинаковые пропорции для каждого пользователя. Схема подключения приведена на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Схема подключения сервоприводов к микроконтроллеру протеза манипулятора**

Предполагается, что при сжатии руки в кулак (или попытке совершить это движение пользователем) нейлоновая нить будет натягиваться, тем самым проворачивая диск на валу потенциометра, в свою очередь, потенциометр будет менять свое сопротивление в зависимости от угла поворота диска. Изменение сопротивления потенциометра позволяет создать сетку калибровки для каждого отдельного потенциометра, что и будет являться «границами» или пределами градации положения пальца носителя в данный момент времени [10].

Данная система является достаточно простой и за счет этого достаточно надежной для длительной эксплуатации пользователем. Показания сопротивления каждого отдельного потенциометра представляют линейный сигнал, который, в свою очередь, является показателем сопротивления потенциометра. Исходный сигнал потенциометра будет передаваться по сигнальной шине в микроконтроллер [3].

В качестве блока управления прототипа автоматизированного протеза манипулятора предполагается использовать *Arduino Mega 2560*, *TI MSP430 LaunchPad*, *Netduino*, *Teensy* или *Raspberry Pi*. Основным требованием к контроллеру является энергоэффективная *ARM* – архитектура контроллера (или аналог) для экономии энергии соответственно, а также уменьшения массы прототипа [13]. Несомненным достоинством вышеперечисленных контроллеров является возможность работы от 12В постоянного тока, так как в каждом имеется предустановленный DC/DC преобразователь.

Основным различием в выборе определенного вида контроллера являются его характеристики. В качестве основного контроллера, который будет отвечать за работу системы навесного оборудования и передачу алгоритмов, был выбран контроллер *Raspberry Pi*. В качестве вторичного исполнительного контроллера было решено выбрать *Arduino*.

Основное достоинство контроллера *Raspberry Pi* – это возможность работы от 12 вольт напряжения (что является отличным показателем для автономного протеза манипулятора), ядро процессора имеет возможность изменения частоты, что позволит экономить энергию аккумулятора во время выполнения нетривиальных задач, не требующих больших вычислительных мощностей [7]. На рисунке 3 представлена схема контроллера, а в таблице 1 – его характеристики.

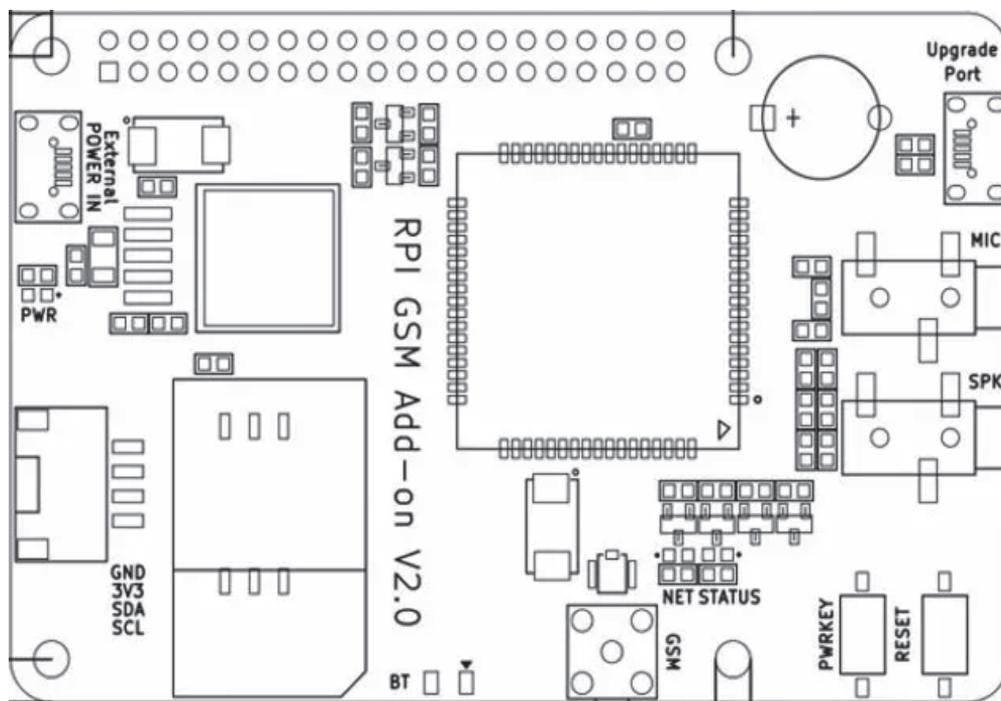


Рисунок 3 – Схематическое изображение контроллера *Raspberry Pi*

Таблица 1 – Основные характеристики контроллера *Raspberry Pi*

Однокристалльная система	BroadCom
Центральный процессор	4-х ядерный, 64- битный CPU на ARM Cortex A72 с тактовой частотой 1,5ГГц
Оперативная память	4 Гб
Стандарт Wi-Fi	802.11 b/g/n/ac
Напряжение питания	5 В

За счет использования аналогового линейного сигнала, исходящего от потенциометров, установленных на каждый отдельный модуль крепления экзоперчатки, конвертация сигнала будет происходить в несколько этапов:

- Получение линейного сигнала от широтно-импульсного модуляционного контроллера;
- Преобразование аналогового сигнала в цифровой;
- Анализ допустимых пределов показателей от 0 до 100;

- Конвертация ответа контроллера.

```
main.py +
1 import time
2 import board
3 import analogio
4
5 # Инициализация вывода аналогового входа потенциометра
6 potentiometer = analogio.AnalogIn(board.A0)
7
8 # Параметры фильтра скользящей средней
9 FILTER_LENGTH = 10
10 samples = [0] * FILTER_LENGTH
11 index = 0
12
13 # Фильтрация входного сигнала с помощью фильтра, скользящей средней.
14 def moving_average_filter(input_value):
15     global index
16     samples[index] = input_value
17     index = (index + 1) % FILTER_LENGTH
18     return sum(samples) / FILTER_LENGTH
19
20 # Основной контур для считывания и фильтрации значений потенциометра
21 while True:
22     # Read the potentiometer value and filter it
23     raw_value = potentiometer.value
24     filtered_value = moving_average_filter(raw_value)
25
26     # Место для строки передачи сигнала на сервопривод
27     # servo_signal(filtered_value)
28
29     # Указание необработанных и отфильтрованных значений отладки
30     print("Raw value:", raw_value)
31     print("Filtered value:", filtered_value)
32
33     # Задержка цикла.
34     time.sleep(0.1)
35
```

Рисунок 4 – Листинг первого фрагмента кода

На этапе конвертации ответа контроллера будут применены алгоритмы машинного обучения, направленные на стабилизацию положения и движений протеза манипулятора, избегая каких-либо циклических и не запланированных движений конечностей [9].

Данная система направлена на улучшение показателей мелкой моторики протеза манипулятора в случае присутствия у носителя тремора или измененной ротации конечностей вследствие травм и операций [5]. Применение данной системы благотворно повлияет на спектр использования протеза в быту и работе. У носителя появится возможность использовать протез в утраченных или отсутствующих диапазонах ротации конечности.

Для оптимизации потенциальных фантомных движений, снимаемых с потенциометра, использованы алгоритмы, позволяющие снизить флуктуацию значений из-за фантомных движений на сервоприводы [14] протеза манипулятора.

На рисунках 4 и 5 представлены два варианта программного кода для уменьшения флуктуаризации сигнала.

```
main.py +
1 import time
2 import board
3 import analogio
4 import adafruit_servokit
5
6 # Инициализация вывода аналогового входа потенциометра
7 potentiometer = analogio.AnalogIn(board.A0)
8
9 # Инициализация библиотеки ServoKit и
10 комплекта серводвигателей
11 kit = adafruit_servokit.ServoKit(channels=16)
12 servo_motor = kit.servo[0]
13
14 # Параметр фильтра экспоненциального сглаживания
15 alpha = 0.5
16 filtered_value = 0.0
17
18 # Основной цикл для считывания и фильтрации значений потенциометра
19 при значении True:
20 #Чтение значений потенциометра и примените фильтра экспоненциального сглаживания
21 raw_value = potentiometer.value
22 filtered_value = alpha * raw_value + (1 - alpha) * filtered_value
23
24 # Сопоставление отфильтрованного значения с углом наклона серводвигателя (0-180)
25 angle = int(filtered_value / 65535 * 180)
26
27 # Установка угла наклона серводвигателя
28 servo_motor.angle = angle
29
30 # Указание необработанных и отфильтрованных значений отладки
31 print("Raw value:", raw_value)
32 print("Filtered value:", filtered_value)
33 print("Servo angle:", angle)
34
35 # Задержка цикла.
36 time.sleep(0.1)
37
38
```

Рисунок 5 – Листинг второго фрагмента кода

В этом варианте кода сначала инициализируется вывод аналогового входа для потенциометра и настраивается фильтр скользящей средней с фиксированной длиной, 10 повторов. Затем определяется функция *moving\_average\_filter*, которая обновляет массив выборок последним входным значением, вычисляет

среднее значение всех выборок в массиве и возвращает это среднее значение в качестве отфильтрованного значения [4].

Наконец, мы настраиваем основной цикл, который считывает значение потенциометра, применяет фильтр и в данном случае выводит его на консоль, так как код запущен в среде разработки. Также добавлена короткая задержка между каждой итерацией цикла, чтобы избежать ошибок при перегрузке выходных данных слишком большим количеством значений.

В данной версии кода сначала инициализируется аналоговый входной сигнал для потенциометра и настраивается библиотека *Servo Kit* для управления сервоприводом. Затем определяется параметр *alpha*, который определяет «вес» отфильтрованного значения в текущем измерении, и переменную *filtered\_value*, которая хранит текущее отфильтрованное значение. В главном цикле читаем значение потенциометра, применяем фильтр экспоненциального сглаживания и преобразуем отфильтрованное значение в угол в диапазоне от 0 до 180 градусов, используя функцию *int()* и операции преобразования масштаба. Затем мы устанавливаем угол для сервопривода с помощью *servo\_motor.angle* [6]. Наконец, выводим значения потенциометра, отфильтрованное значение и угол сервопривода в консоль для отладки и добавляем короткую задержку между каждой итерацией цикла, чтобы избежать перегрузки вывода слишком большим количеством значений.

Кроме кистевого манипулятора разработана экзосистема на плечевой сустав носителя, которая представляет из себя комплекс инженерных решений адаптированных для производства с применением экструзионной печати облегчает и укрепляет конструкцию крепления протеза манипулятора на носителя [11]. Крепление на плечевой комплекс обусловлено предполагаемой конструкцией протеза манипулятора, являющегося вторичной конечностью, повторяющей движения управляющей руки с корректировкой на положение, подвижность и ротации конечности носителя. На плечевом комплексе предполагается расположить блок управления и энергоноситель, а также все необходимые компоненты системы.

Автономный протез манипулятор крепится на шарнирное поворотное соединение к плечевому комплексу. Конструкция кисти автономного протеза манипулятора будет повторять анатомические особенности человеческой руки, внутри которой будут находиться все необходимые компоненты. В качестве системы передвижения конечности будут использоваться сервоприводы. По одному сервоприводу на каждый палец, два синхронных сервопривода на локтевой и плечевой сустав. В случае кистевого протеза, при использовании одного сервопривода на палец будет достигаться одна степень свободы для каждого пальца, что, в свою очередь, даст пять степеней свободы кистевому комплексу в сумме.

Приходящий сигнал с контроллера будет поворачивать вал сервопривода, управляющего пальцем на заданное количество оборотов. Конструкция системы сжатия и разжатия кистевого протеза манипулятора будет повторять инвертированную систему, используемую на экзоперчатке носителя. За счет поворота вала сервопривода будет происходить натягивание нейлоновой нити, которая, в свою очередь, будет преобразовываться в линейное движение пальца.

В качестве помощи разжатию прототипа кистевого протеза предполагается использовать витые пружины, расположенные на ответной части протеза манипулятора. В будущих версиях предполагается использование торсионных пружин. Выбор обоснован ресурсом и отсутствием нелинейного распределения усилия пружины.

В современном мире достаточно технологий для движения элементов протезов манипуляторов, но до сих пор одним из самых распространенных типов является шаговый электромотор, он же сервопривод. Пневматические и гидросистемы слишком громоздки и требуют для использования дополнительные насосы, а в общей сумме данная конфигурация получается излишне дорогой, объемной, тяжелой и ненадежной в эксплуатации.

Гидро- серво приводные системы могут дать течь в самый неподходящий момент, а воздушные - могут начать травить воздух [15].

В условиях эксплуатации автоматизированного протеза манипулятора необходимо заложить избыточную надежность и отказоустойчивость, чтобы снизить необходимость технического обслуживания и увеличить срок безотказного времени работы манипулятора. Протез манипулятор должен иметь избыточную надежность для предупреждения возможных поломок, а идеология подразумевает улучшение качества жизни носителя.

Вследствие вышеописанного анализа было принято решение использовать классические сервоприводы. Нетребовательный к условиям работы коллекторный мотор с достаточно низким передаточным числом является лучшим выбором, так как для циклического выполнения систематических функций не будет требоваться больших усилий, а за счет избыточного запаса прочности минимизируются возможные поломки [12].

В проекте было решено использовать сервоприводы *JX-CLS6036HV*. Данные сервоприводы распространены в сфере моделирования и рассчитаны работать в условиях быстрой реакции с высоким усилием на валу. В таблице 2 представлены характеристики сервопривода.

**Таблица 2 – Характеристики сервопривода *JX-CLS6036HV***

Материал редуктора	Высокоточный анодированный алюминий
Размеры	40,5 x 20,5 x 40 мм
Рабочая скорость	(6,6 В): 0,14 с / 60 °; (7,4 В): 0.11 сек / 60 °
Мощность	27,8 кг / см (6,6 В), 35,6 кг / см (7,4 В)
Рабочее напряжение	6,6 В-7,4 В
Разъем	JR 265 мм / коричневый + красный и оранжевый
Тип двигателя	с полым ротором
Материал корпуса	алюминий и пластик
Тип	цифровой
Вес	60 г

Данный сервопривод является универсальным решением как в качестве шагового мотора для манипуляций с локтевым узлом сгибания, так и для сгибания пальцев на протезе манипуляторе. Избыточное усилие кручения сервоприво-

да является важным элементом протеза манипулятора, так как запас должен быть не только в прочности, но и в усилии на сжатие кисти и пальцев протеза манипулятора. Данный избыток мощности позволит избежать массового выхода из строя комплектующих и будет обеспечивать безопасность и надежность эксплуатации пользователем.

### Выводы

Разработка автоматизированных протезных манипуляторов с использованием аналоговых систем и машинного обучения потенциально может значительно улучшить жизнь людей с ограниченными возможностями и людей, проходящим реабилитацию, предоставляя им более функциональные и интуитивно понятные протезы конечностей для полноценного или частичного возвращения функций и возможностей движения.

При удачном исходе адаптация пройдет до уровня невосприимчивости протеза как фантомной конечности. Это может помочь сократить время обучения, в сравнении с традиционными протезами конечностей, и повысить общую удовлетворенность пользователей.

Разработка, связанная с созданием дешевого протеза руки с системой передачи аналогового сигнала, сосредоточена на проектировании и разработке экономически эффективного и надежного решения, отвечающего потребностям его пользователей. Благодаря тщательному проектированию, тестированию и оптимизации эта технология может обеспечить более доступный вариант протеза руки для людей, потерявших ротацию или полные функции конечности.

### Литература

1. Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Kolyubin S.A. Fast compensation of unknown multiharmonic disturbance for nonlinear plant with input delay // FAC PapersOnline. 2013.Vol. 19. no 1. P. 546-551.
2. Gnanasekaran K., Heijmans T., Van Bennekom S. et al. 3D printing of CNT-and graphene-based conductive polymer nanocomposites by fused deposition modeling // Applied materials today. 2017. Vol. 9. P. 21-28.
3. Wang J., Pyrkin A.A., Bobtsov A.A. Output control algorithms of dynamic positioning and disturbance rejection for robotic vessel // IFAC-PapersOnline. 2015. Vol. 48, no 11. P. 295~300.
4. Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Nikiforoy V.O. Output control approach for delayed linear systems with adaptive rejection of multiharmonic disturbance // IFAC-PapersOnline. 2014. Vol. 47. no 3. P. 12110-12115.
5. Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Kolyubin S.A. Simple output stabilization approach for robotic systems // IFAC-Papers Online. 2013. Vol. 9. no 1. P. 1873-1878.
6. Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Kolyubin S.A Simple robust and adaptive tracking control for mobile robots // IFAC – Papers Online. 2015. Vol. 48. no 11. P. 143-149.
7. Бродин В. Технологии и средства разработки встраиваемых систем на основе микроконтроллеров с архитектурой ARM // Компоненты и Технологии. 2009. № 93.

8. Добриборщ Д. Адаптивное управление роботом-манипулятором с параллельной кинематической схемой // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 9. С. 850-857.
9. Бобцов А.А., Колюбин С.А., Кремлев А.С., Пыркин А.А. Итеративный алгоритм адаптивного управления по выходу с полной компенсацией неизвестного синусоидального возмущения // Автоматика и Телемеханика. 2012. Т. 8. С. 64-75.
10. Пыркин А.А., Бобцов А.Л., Никифоров В.О. и др. Компенсация полигармонического возмущения, действующего на состояние и выход линейного объекта с запаздыванием в канале управления // Автоматика и телемеханика. 2015. № 15. С. 43-64.
11. Кондрашов С.В., Пыхтин А.А., Ларионов С.А., Сорокин А.Е. Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 10(82).
12. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход Artificial Intelligence: a Modern Approach / Пер. с англ. и ред. К.А. Птицына. 2 изд. М.: Вильямс, 2010. 1408 с.
13. Теодорович Н.Н., Орлов А.Д., Коротчиков Б.О., Лобанов Г.В. Обнаружительно-поисковая самоходная установка «Mus» / Эволюционные процессы информационных технологий / Сборник трудов по материалам 4-й международной научно-технической конференции / Под общей научной редакцией Артюшенко В.М., Воловач В.И. 2019. С. 63-67.
14. Теодорович Н.Н., Орлов А.Д., Коротчиков Б.О., Лобанов Г.В., Алгоритмы кодов поисково-обнаружительно-поисковой самоходной установки «Mus» / Эволюционные процессы информационных технологий / Сборник трудов по материалам 4-й международной научно-технической конференции / Под общей научной редакцией Артюшенко В.М., Воловач В.И. 2019. С. 67-69.
15. Теодорович Н.Н., Орлов А.Д., Коротчиков Б.О. Мультиприводная шаговая система передвижения для кроссплатформенной самоходной установки повышенной проходимости «MUS» / ДВОЙНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ / Учредители: Закрытое акционерное общество «Передовые специальные технологии и материалы» С. 38-41.

УДК 004.054

## Сравнение фреймворков python для веб-разработки

**Юрий Вениаминович Стреналюк**, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры информационных технологий и управляющих систем ТУ, **Анастасия Олеговна Ефимова**, студент 1 курса магистратуры кафедры информационных технологий и управляющих систем ТУ, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

*В данной статье рассмотрены популярные фреймворки для разработки веб-приложений на Python, разобраны их преимущества и недостатки. В данной статье проведено сравнение основных характеристик, разбираемых фреймворков для их выбора в конкретной задаче и потребностей проекта. Также рассматриваются различия в производительности и функциональных возможностях каждого фреймворка, а также их подходы к обработке запросов и архитектуре приложений.*

Фреймворк, python, веб-приложение, веб-сервер.

## Comparing python frameworks for web development

**Yuri Veniaminovich Strenalyuk**, Senior Researcher, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Information Technology and Control Systems, **Anastasiya Olegovna Efimova**, 1-st year student magistracy of the Department of Information technology and system management, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

*This article discusses popular frameworks for developing web applications in Python, examines their advantages and disadvantages. This article compares the main characteristics of the frameworks being analyzed for their choice in a specific task and project needs. The differences in performance and functionality of each framework, as well as their approaches to query processing and application architecture are also considered.*

Framework, python, web apps, web-server.

**Введение.** Одним из популярных языков программирования является Python. Он легок в изучении и прост в восприятии, а популярность заключается в значительном числе фреймворков на его основе. Python не имеет никаких сопутствующих встроенных функций, и для программистов стало обязательным ис-

пользование фреймворков [2]. Фреймворки упрощают разработку приложений для разработчиков, увеличивают скорость их разработки и обеспечивают безопасность данных. Они предлагают автоматическое выполнение сложных задач, сокращают время разработки и в значительной степени сосредоточены на логике приложения, а не на общем элементе. Основными преимуществами использования фреймворков, является безопасность, масштабируемость и интеграция. К плюсам также можно отнести, что большая часть фреймворков являются бесплатными, имеют документацию и группу поддержки, которая всегда готова к вопросам и предложениям по улучшению. Конечно и существующих фреймворков есть недостатки, например, для освоения нужно затратить достаточно много времени. В данной статье рассмотрим такие фреймворки, как:

- *Django*
- *CherryPy*
- *Flask*
- *Web2Py*
- *Bottle*
- *Tornado*
- *Pyramid*
- *PyQt*
- *TurboGears*
- *CubicWeb*
- *Sanic*

**Типы фреймворков.** Существует основные типы фреймворков – *backend framework*, *frontend framework*, *full-stack framework* и *microframeworks*. Разберем подробнее.

- *backend framework* – используются для разработки серверной части. Данный фреймворк подходит для создания простой страницы, для формирования выходных данных и при хакерских атаках дают большую гарантию безопасности. Данный тип отвечает за основные части приложения, без которых программа неработоспособна. *Backend framework* решает задачи функционирования БД, сервера, архитектуры сервиса, операционной системы, безопасность и т.д. Главный недостаток – недостаточно разнообразна функциональность;
- *frontend framework* – это набор инструментов и библиотек, которые используются веб-разработчиками для упрощения создания пользовательского интерфейса и ускорения процесса разработки, используется для внешнего вида веб-приложений, данный тип работает в браузере. Данный тип фреймворка не принимает участие в работе логики и серверной части программы, предоставляет возможность для создания адаптивного и мобильного дизайна, управления состоянием, роутинга и других задач, связанных с веб-приложением. Данный тип создан для улучшения интерфейса приложения, создания 3d анимаций и т.д.
- *full-stack framework* – это программный фреймворк, который позволяет разрабатывать приложения для веб-сервера от начала до конца, используется как

в серверной части, так и в клиентской. Он подходит для работы в реальном времени, т.е. при изменении в одном интерфейсе, изменения происходят и в остальных. *Full-stack framework* упрощает и ускоряет процесс разработки приложений, благодаря встроенным библиотекам и инструментам, что позволяет программисту сконцентрироваться на бизнес-логике и пользовательском интерфейсе, не тратя много времени на создание и настройку инфраструктуры системы;

- *microframework* – это легковесный веб-фреймворк, который предоставляет минимальный набор инструментов для быстрого создания веб-приложений, используется для решений конкретных (узконаправленных) задач. Функционал расширяется с помощью сторонних приложений. Данный тип содержит только базовые функции маршрутизации, контроллеры и функции для работы с базами данных, а также служебные функции для работы с HTTP-протоколом, формами, шаблонами и т.д. Одним из преимуществ *microframework* – это высокая скорость работы и малый размер, что делает их идеальным выбором для создания маленьких и средних веб-приложений.

**Архитектура веб-фреймворков.** Архитектура веб-фреймворков обычно состоит из нескольких компонентов, которые взаимодействуют между собой для предоставления функциональности веб-приложения. Ниже приведены основные компоненты архитектуры веб-фреймворков:

- модель – компонент, отвечающий за хранение данных веб-приложения и взаимодействие с базой данных;
- представление – компонент, который обрабатывает запросы пользователя и отображает данные веб-приложения;
- контроллер – компонент, который отвечает за управление потоком данных и обеспечивает взаимодействие между моделью и представлением;
- роутер – компонент, который определяет, какой контроллер должен обрабатывать запросы пользователя;
- библиотеки – компоненты, которые предоставляют дополнительные инструменты и функциональность для работы с фреймворком.

Наиболее известная архитектура для создания сайта – «*Model – View – Controller*», иначе *MVC*. *MVC* используется для разработки интерфейсов, разделяя логику на три взаимосвязанных элемента, расшифровывается как «модель – представление – контроллер» – в названии используются три основных составляющих веб-фреймворка, на рисунке 1 схематически представлена зависимость данных элементов [3].



Рисунок 1 – Модель MVC

Модель – компонент, который содержит все данные будущего сайта, если состояние этих данных изменяется, то модель обычно уведомляет представление или контроллер. Представление – компонент, отвечающий за визуализацию данных, за взаимодействия пользователя с ресурсом, проще говоря, отображает данные пользователю. Контроллер – компонент, который преобразует данные для первых двух составляющих, т.е. управляет взаимодействием между представлением и моделью. Данная модель решает такие задачи, как:

- изменение интерфейса, не изменяя логику приложения;
- упрощение программного кода приложения для всеобщего понимания;
- использование нескольких видов интерфейсов в одном приложении.

Еще одна известная модель – «*Model – View – View – Model*», иначе *MVVM*. Данная модель похожа на *MVC*, но *View-Model* заменяет *Controller*. *View-Model* принимает данные из модели и преобразует их для отображения в представлении. На рисунке 2 схематически представлена зависимость данных элементов модели *MVVM*.

Данную архитектуру зачастую используют в разработке приложений на смартфоны. При взаимодействии пользователя с интерфейсом, *View-Model* уже знает наперед что нужно выполнить и попросит ли *Model* выполнить запрошенное действие.

Ключевое преимущество *MVVM* заключается в обеспечении реального разделения между *View* и *Model*, то есть это означает, что модель легко поддается изменениям без необходимости в *View*. С данной архитектурой каждый фрагмент кода более детализирован, и при правильной реализации, внешние и внутренние зависимости находятся в отдельных фрагментах кода от частей с базовой логикой. Недостатком является сложность проектировки *View-Model*, многим нович-

кам может быть проблематично при проектировке.

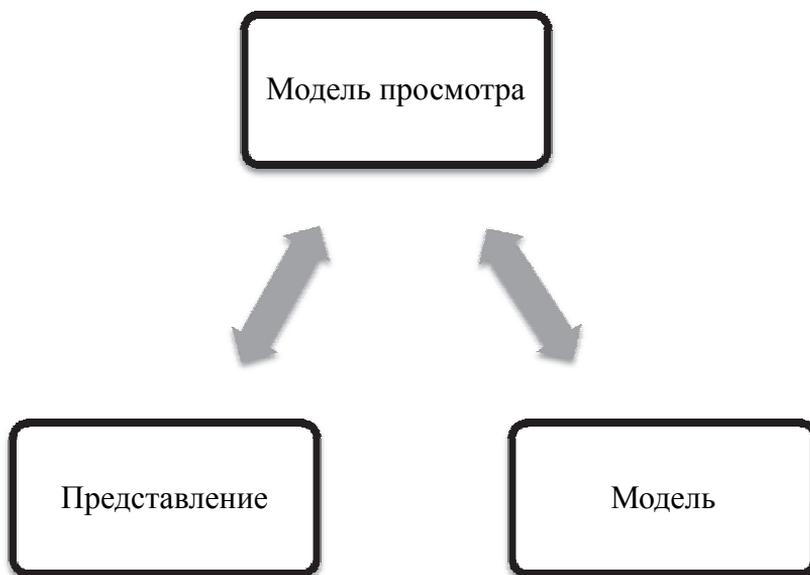


Рисунок 2 – Модель MVVM

Архитектура веб-фреймворков может быть различной в зависимости от конкретного фреймворка и его функциональности. Однако, все они имеют схожие компоненты, которые облегчают создание веб-приложений и сокращают время разработки.

#### Основные отличия

В MVC *Controller* используется для управления взаимодействием между представлением и моделью, а в MVVM *View-Model* отвечает за это взаимодействие. В MVVM *View-Model* также используется для управления состоянием представления и для обработки событий, таких как клики кнопок и изменения текстовых полей. Это делает код более чистым и понятным.

Таким образом, основное отличие между моделями MVC и MVVM заключается в том, что в MVVM *View-Model* принимает на себя больше задач по управлению взаимодействием между представлением и моделью. Это делает код более чистым, понятным и оснащенным высокой степенью контроля.

#### Фреймворки веб-разработки

*Django* – наиболее известный и популярный фреймворк для разработки веб-приложений [1]. *Django* – это сочетание двух типов фреймворков – *backend* + *frontend*, также использует архитектуру MVC. *Django* включает в себя URL маршрутизаторы, HTML-шаблоны, ORM – менеджер базы данных, для извлечения нужной информации, также включает администрирование и аутентификацию. *Django* поддерживает такие базы данных, как *Oracle*, *PostgreSQL*, *MySQL* и *SQLite*.

*CherryPy* – легкий и эффективный фреймворк, который основан на ООП,

это в свою очередь уменьшает размер исходного кода. *CherryPy* имеет минималистичный дизайн и легкий *API*, что делает его идеальным для создания как простых, так и сложных веб-приложений. Архитектура *CherryPy* предлагает средства для кодирования, кэширования, файлов *cookie*, сеансов, статических файлов, авторизации, сжатия и т.д. Подходит для легких и быстрых веб-приложений, также *CherryPy* имеет свой собственный сервер, что упрощает разработку приложения. *CherryPy* поддерживает широкий спектр шаблонов, включая *Makeo*, *Jinja2*, *Genshi*, и другие, что позволяет создавать красивые и удобные интерфейсы для пользователей.

**Flask** – микрофреймворк, создающий высокопроизводительные веб-приложения, обеспечивает маршрутизацию *URL*-адресов и визуализации. *Flask* хорошо подходит для новичков, используется для тренировочных проектов и для сложных проектов, но плохо подходит для асинхронного программирования. *Flask* предоставляет базовую структуру и набор инструментов для разработки веб-приложений, включая:

- маршрутизацию запросов;
- встроенный сервер;
- поддержку REST API.

*Flask* также обладает простым и интуитивно понятным синтаксисом, что позволяет быстро создать первое приложение и легко его изменять. Если сравнить *Django* и *Flask*, то нельзя сказать, что лучше, если не рассматривать только в отдельных спектрах. *Django* подходит для больших проектов и для небольших, которые так и останутся ими, фреймворк *Flask* – для небольших приложений, у которых есть перспектива стать больше. В безопасности выигрывает *Django*, но *Flask* поддерживает безопасные *cookie*-файлы на клиентской стороне. В гибкости лидирует *Flask*.

**Web2Py** – фреймворк типа *full-stack*, кроссплатформенный. *Web2Py* взаимодействует с базами данных, предоставляет многопоточный веб-сервер, также можно создавать и тестировать приложения в том же интерфейсе, из-за доступа к веб-серверу. Данный фреймворк работает со своей собственной *IDE*, имеющей различные инструменты, такие как редактор кода, отладчик и развертывание, также следует модели *MVC*.

**Bottle** – микрофреймворк, который создает веб *API*. Данный фреймворк минималистичный, для мелких и средних проектов хорошо подходит. *Bottle* позволяет выполняться только в одном исходном файле, не завися от других источников. Функциональные возможности включают встроенный веб-сервер, шаблонизацию, роутинг запросов, а также собственные инструменты и утилиты. *Bottle* позволяет создавать простые приложения для личного пользования.

**Tornado** – расширяемый асинхронный веб-сервер и фреймворк, отличный инструмент для создания приложений, требующих производительности при работе с операциями ввода/вывода и поддержки огромного количества одновременных соединений. *Tornado* может масштабировать до десятков тысяч открытых соединений, что делает его идеальным решением для длинных запросов. Возможности фреймворка *Tornado* включают в себя асинхронное I/O, встроенную поддержку *WebSockets* и автоматическое масштабирование под нагрузку.

*Tornado* также поддерживает многопоточность, что позволяет обрабатывать несколько запросов одновременно. Благодаря своей скорости и производительности, *Tornado* популярен среди разработчиков, работающих с высоконагруженными веб-приложениями.

**Pyramid** – кроссплатформенный фреймворк, может одинаково хорошо работать как с небольшими, так и с крупномасштабными приложениями. Основная цель этого фреймворка – разработка лучших веб-приложений с меньшей сложностью и минимальными ресурсами. Довольно легкий и имеет возможность обрабатывать различные виды проектов с максимальной прозрачностью и простотой. Еще одна важная особенность этого фреймворка заключается в том, что он идеально подходит для проверки подлинности и авторизации. Меры безопасности являются высоконадежными и упростят процесс оценки и настройки приложения.

**PyQt** – это библиотека *Python* для создания приложений с графическим интерфейсом с помощью инструментария *Qt*. *PyQt5* работает на всех основных платформах, включая *Linux*, *Windows* и *Mac OS X*, популярен среди разработчиков, и графический интерфейс может быть создан с помощью кодирования или *QT*-дизайнера. Фреймворк разработки *QT*-это визуальный фреймворк, который позволяет перетаскивать виджеты для создания пользовательских интерфейсов. Данный фреймворк предоставляет множество полезных функций, таких как автоматическое управление памятью, поддержка потоков, соединения сигнал / слот и многое другое. *PyQt* предлагает богатый выбор встроенных виджетов и инструментов для создания пользовательских виджетов для формирования сложных графических интерфейсов, а также надежную поддержку баз данных SQL для подключения к базам данных и взаимодействия с ними.

**TurboGears** – это веб-фреймворк, написанный на *Python*, который облегчает и ускоряет процесс веб-разработки, предоставляя разработчикам гибкую структуру приложения и решения для часто встречающихся задач. Этот веб-фреймворк с полным стеком, но благодаря минимальному интерфейсу и одностраничному скрипту он может действовать как микро-веб-фреймворк, когда не нужно использовать *TurboGears* с полным стеком. Данный фреймворк включает в себя ряд инструментов, таких как ORM, шаблонизатор, интеграцию с AJAX и многие другие. *TurboGears* позволяет разработчикам быстро разрабатывать и развертывать веб-приложения, благодаря своей скорости, гибкости и расширяемости.

**CubicWeb** – данный фреймворк основан на концепции семантической веб-разработки и предоставляет инструменты для создания приложений, которые могут работать с семантическими данными. Этот фреймворк основан на идее создания интерфейсных веб-приложений для баз данных. Потому что сразу после создания веб-приложения первое, что нам нужно сделать, это создать базу данных для вновь созданного куба или приложения. Как только модель данных определена, пользователь получает функциональное веб-приложение и может дополнительно настраивать представления. *CubicWeb* не похож на другие фреймворки *Python*, более монолитен и имеет не так много функций.

**Sanic** – это асинхронный фреймворк, основанный на асинхронном про-

граммировании, предназначенный для быстрых HTTP-ответов посредством асинхронной обработки запросов. Асинхронное программирование было введено в Python 3.5, поэтому *Sanic* доступен только для версий Python 3.5 и выше. Синтаксически *Sanic* напоминает *Flask*. *Sanic* может использоваться в качестве замены *Django* или *Flask* для создания масштабируемых, эффективных и невероятно быстродействующих веб-приложений.

Обобщенно достоинства и недостатки, рассмотренных фреймворков представлены в таблице 1.

**Таблица 1 – Достоинства и недостатки, рассмотренных фреймворков**

Фреймворк	+	-
<i>Django</i>	Открытый код, безопасный, гибкий фреймворк с большим количеством библиотек.	Сложный шаблон маршрутизации <i>URL</i> – для новичков может быть проблемно. Не обладает многозадачностью.
<i>CherryPy</i>	Мощный, простой, модульный и безопасный.	Ограниченные возможности и сложный для настройки.
<i>Flask</i>	Масштабируемый, гибкий, легко настраиваемый.	Однопоточный, нет встраиваемости многопоточности, нет готовых решений.
<i>Web2Py</i>	Гибкий, открытый код, встроенная среда разработки.	Непопулярный, нет хороших руководств, совместим только с <i>python 2</i> .
<i>Bottle</i>	Поддерживает плагины баз данных, легкий, простой, кроссплатформенность.	Непопулярный, не подходит для больших проектов.
<i>Tornado</i>	Высокая производительность, точность.	Сложность, неудобство использования.
<i>Pyramid</i>	Кроссплатформенность и гибкость	Схож с <i>Django</i> , но меньше ресурсов.
<i>PyQt</i>	Кроссплатформенность, удобство, набор компонент широкий и хороший пользовательский интерфейс.	Труден в освоении, отсутствие документации, сложность исправления ошибок в ходе работы.
<i>TurboGears</i>	Универсальный, встроенная расширяемость с помощью подключаемых приложений, хорошая документация.	Непопулярный, сложный для новичков и не подходит для маленьких проектов, т.к. содержит большое количество дополнительных функций и компонентов.
<i>CubicWeb</i>	Поддерживает многие БД, модульный, основан на концепции семантической веб-разработки.	Сложный для новичков, непопулярный, не подходит для маленьких проектов.
<i>Sanic</i>	Высокая скорость обработки, прост и легок, гибкий, поддерживает асинхронное программирование.	Мало функций и компонентов, не такой мощный, есть лучше аналоги.

### Заключение

В данной статье было разобрано только некоторая часть существующих фреймворков. Было разобраны самые популярные и востребованные, каждый по-своему удобен [4].

Выбор конкретного решения зависит от стоящих перед разработчиком задач и личных предпочтений. Необходимо каждый раз оценивать фреймворк на соответствие требованиям конкретной задачи. Например, если проект большой и требует интеграций сложных компонентов, стоит выбрать *Django*. Для небольших проектов, обучения или приложений с веб-сокетами и *NoSQL* больше подойдут *Flask* и *Tornado*. *Bottle* может быть идеальным выбором для небольших проектов или для тех, кто хочет быстро начать работу над веб-приложением. *Pyramid* может быть лучшим выбором для опытных разработчиков и для проектов, которым нужна масштабируемость и гибкость.

Выбрать правильный вариант для проекта непросто. В целом, выбор фреймворка для веб-разработки на Python зависит от многих факторов, включая тип проекта, требования к безопасности и масштабируемости, уровень опыта разработчиков и многое другое. Каждый из рассмотренных фреймворков имеет свои преимущества и недостатки, но все они могут быть полезны в правильных руках.

### Литература

1. Дронов Владимир *Django: практика создания Web-сайтов на Python* / Владимир Дронов. М.: БХВ-Петербург, 2018. 977 с.
2. Ликсин Сергей Сергеевич, Лукошкин Павел Андреевич, Шибанов Сергей Владимирович СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ШАБЛОНОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИЛОЖЕНИЙ С ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИМ ИНТЕРФЕЙСОМ // Вестник ПензГУ. 2021. № 4(36) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-shablonov-proektirovaniya-prilozheniy-s-polzovatelским-interfeysom> (дата обращения: 13.06.2023).
3. Мэтиз Эрик Изучаем Python. Программирование игр, визуализация данных, веб-приложения. СПб.: Питер, 2017. 496 с.
4. Новиков Ю.В., Карпенко Д.Г. Аппаратура локальных сетей: функции, выбор, разработка. М.: Эком, 2022. 288 с.
5. Форсье Джефф, Биссекс Пол, Чан Уэсли *Django. Разработка веб-приложений на Python* М.: Символ-плюс, 2021. 456 с.
6. Кирютенко Ю.А. Объектно-ориентированное программирование. Архитектура MVC: учебное пособие. Ростов-на-Дону, 2008. 153 с.
7. Янушко В.В., Жмурко С.А. Методология Model-View-Controller при построении корпоративных сайтов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2005. № 3 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologiya-model-view-controller-pri-postroenii-korporativnyh-saytov> (дата обращения: 13.06.2023).

УДК 004.056.55, 003.26

## Системный анализ методов шифрования текстовых файлов

**Сергей Николаевич Шульженко**, доктор технических наук, профессор кафедры «Информационных технологий и управляющих систем»,  
**Савелий Николаевич Останин**, магистрант первого года обучения кафедры «Математики и естественнонаучных дисциплин»,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

*Шифрование файлов – один из способов защиты данных, хранящихся в файлах и документах пользователя. В настоящее время заслуживает внимания информация по вопросам шифрования текстовых документов, с их использованием в различных предметных производственных областях. Существующие методы шифрования и дешифрования текстовых файлов являются недостаточно эффективными и проработанными, в связи со стремительным ростом информационных потоков и цифровизации экономики и производства в целом. Предлагается обобщение, анализ, с учетом достоинства и недостатков используемых алгоритмов и некоторые предложения по их совершенствованию.*

Шифр, симметричное и ассиметричное шифрование, кодирование информации.

## System analysis of methods for text files encryption

**Sergey Nikolaevich Shulzhenko**, doctor of technical sciences, professor of the department of information technologies and control systems,  
**Saveliy Nikolaevich Ostanin**, undergraduate first year of the department of Mathematics and Natural Sciences,  
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

*File encryption is one of the ways to protect the data stored in the user's files and documents. Currently, the information on the encryption of text documents, with their use in various subject production areas, deserves attention. The existing methods of encryption and decryption of text files are insufficiently effective and developed, due to the rapid growth of information flows and the digitalization of the economy and production as a whole. A generalization, analysis, taking into account the advantages and disadvantages of the algorithms used and some suggestions for their improvement are proposed.*

Cipher, symmetric and asymmetric encryption, encoding of information.

Актуальность данной темы обусловлена все более сильно возрастающим интересом к программным решениям, с помощью которых пользователь может обеспечить защиту данных на своем персональном компьютере. Также, в современном мире конфиденциальность информации играет очень большую роль и одним из способов добиться защиты файлов, от постороннего пользователя, является шифрование.

Само по себе понятие криптографии подразумевает под собой науку о шифровании, но в настоящее время термин криптография имеет более широкое значение. При упоминании криптографии люди часто могут подразумевать как обычное привычное для всех шифрование текста, так и цифровые подписи или аутентификацию. В наше время разговор о криптографии может захватывать большое количество различных областей, начиная от компьютерной безопасности, заканчивая высшей математикой, квантовой физикой или уголовным правом. Криптография вобрала в себя множество из разных областей науки, благодаря чему наука постоянно совершенствуется и развивается. Разнообразие криптографии привлекает в эту область специалистов совершенно различных профессий, в данной особенности и кроется необъятный потенциал этой сферы знания. Но рассматривая криптографию как отдельную сферу, можно сделать вывод о том, что сама по себе она довольно бесполезна. Правильнее всего рассматривать криптографию как часть крупной системы из множества составляющих. Криптография является частью системы безопасности предназначенной для защиты различного вида данных от нежелательного пользователя, и допуска к ней отдельных лиц, имеющих доступ к хранимой информации. Другими словами, криптография играет роль двери с замком, которая допускает к данным только пользователей, у которых есть ключ и не пропускает нежелательных пользователей. В данной особенности и заключается сложность криптографической системы безопасности, ведь гораздо проще не допускать к информации никого, чем реализовать выборочную систему пропусков.

Чаще всего метод защиты информации с помощью шифрования данных, используется, когда пользователь хочет защитить хранимые на жестком диске данные, к которым должен иметь доступ только он. В таком случае, пользователь обеспечивает конфиденциальность информации, даже если жесткий диск будет потерян или украден, ведь без ключа доступа, прочитать и получить какие-то полезные данные, будет либо крайне затруднительно, либо совсем невозможно.

Но шифрование данных можно использовать не только с целью защиты хранимых на жестком диске файлы, также шифрование будет удобно использовать для ограничения взаимодействия с файлом определенных пользователей, тем самым разделить права и контролировать доступ к файлу. Такой метод использования системы шифрования, помогает компаниям, удобно разделять то, какие сотрудники могут просматривать или изменять внутренние документы, а каким пользователям закрыт доступ к этим документам.

Также шифрование используют при передаче файлов, через третье лицо или при отправке файла по электронной почте или локальной сети. В таком сценарии, для безопасной передачи данных, ключ к зашифрованному файлу, должны знать только отправитель и получатель, без ключа доступа, файл не несет в

себе никакой полезной информации.

Потребность в защите информации, появляется у любой крупной компании, с увеличением штата сотрудников и файлов, циркулирующих в системе, между этими сотрудниками, увеличивается и риск утечки важной для предприятия информации, что в свою очередь, может привести к крупным убыткам.

Чаще всего, когда идет речь о шифровании данных, упоминаются два различных алгоритма кодирования, симметричное и асимметричное.

Оба алгоритма являются достаточно надежными и обеспечивают достаточный уровень защиты информации. Но при том их принцип работы кардинально разный, отличия заключаются в том, как в этих методах подходят к использованию ключа шифрования.

Первым делом следует рассмотреть метод симметричного шифрования. В данном методе ключ шифрования одинаковый для шифрования и дешифрования.

Для того, чтобы зашифровать текст, пользователю требуется придумать ключ (пароль) и непосредственно загрузить сам текст в математический алгоритм шифрования. На выходе пользователь получает тот же текст, но уже в зашифрованном виде. При необходимости дешифровать текст, пользователь, должен ввести тот же самый ключ (пароль), и зашифрованный текст в алгоритм дешифрования, после чего, пользователь получит исходный текст, который изначально был загружен в систему [2, С. 44] (рис. 1).

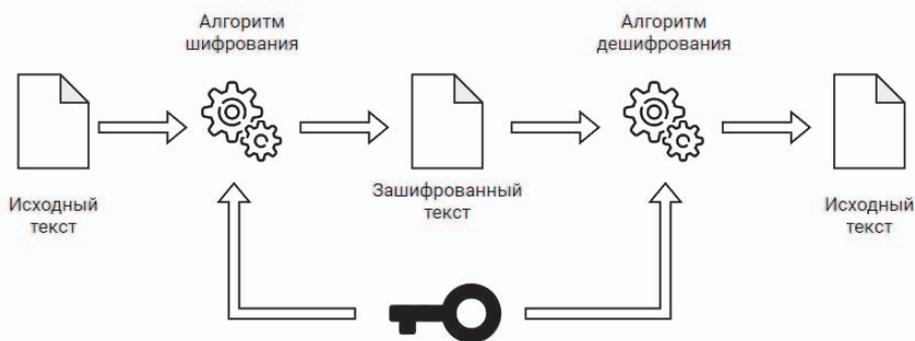


Рисунок 1 – Симметричное шифрование

Симметричное шифрование является довольно простым и одновременно удобным методом шифрования, но из-за своей простоты, простейшие симметричные шифры довольно легко поддаются взлому. Поскольку этот метод представляет из себя замену букв на символы, по составленной заранее таблице, таким образом, с помощью сопоставления самых часто используемых букв в языке и наиболее частых символов, можно довольно быстро подобрать ключ. По этой причине, современные системы симметричного шифрования должны соответствовать следующим требованиям:

1. Выходные данные не должны содержать статистических паттернов исходных данных

2. Шифр должен быть нелинейным

Также, в зависимости от алгоритма работы системы, симметричное шифрование можно разделить на два типа:

- Блочные
- Поточковые

Блочные алгоритмы шифруют данные блоками, длина которой фиксирована. Такой блок может быть 64, 128 или другого количества битов. Если же часть входных данных меньше чем размер блока, то система заполняет блок символами, которые называются дополнением [1, С. 6].

В настоящий момент существует множество видов симметричных шифров, основанных на блочном типе шифрования.

Одним из самых распространенных примеров блочного шифрования является шифр Виженера. Блез Виженер будучи одним из известнейших французских криптографов придумал шифр, который считался не раскрываемым на протяжении трех веков. Данный шифр предусматривает работу с заранее выбранным ключом, который будет определять и длину блока, и количество побуквенных сдвигов вправо. Например, шифруя сообщение «Прекрасная погода» с ключом «шифр», получится «ищъыййжющи дяъщс». Работа этого алгоритма довольно проста, ключ разбивается на числа, соответствующие их номеру, так «шифр» преобразуется в 25, 9, 21, 17, согласно номерам букв, в русском алфавите без буквы «ё». Эти числа означают на которое количество требуется шагнуть вправо, чтобы зашифровать букву. При случае, если блок чисел заканчивается, со следующей буквы он начинается заново.

Частным случаем шифра Вижера, можно назвать «Шифр Цезаря». В данном шифре каждая буква изначального текста смещается на определенное, заранее выбранное количество позиций, так текст «Добрый день» при сдвиге вправо на три позиции будет выглядеть следующим образом «Жсдуюм жзря». Конечно, такой шифр довольно быстро разгадать простым подбором, но это был один из первых примеров блочных шифров. В настоящее время блочные шифры довольно далеко ушли от шифра Цезаря, их уже не так просто раскрыть.

Так, шифр AES (**Advanced Encryption Standard**), принятый в качестве стандарта шифрования правительством США, используется довольно широко в сфере шифрования информации в интернете, а также для передачи данных с использованием проводных или же беспроводных сетей. Также данных тип шифрования используется в ГОСТ 28147-89 – советский и российский стандарт шифрования. Существует также международный алгоритм шифрования IDEA(InternationalDataEncryptionAlgorithm) [1, С. 7].

Поточковое шифрование осуществляется методом, в котором каждый бит информации обрабатывается с помощью соответствующего бита псевдослучайной последовательности чисел, которая генерируется с помощью ключа и имеет такую же длину, как и шифруемые данные [1, С. 6].

Существует множество вариаций поточковых шифров, например, одним из самых популярных поточковых шифров, является книжный шифр. Суть книжного шифра заключается в поиске в качестве ключа шифра начало какого-либо литературного произведения и построение шифра на его основе (табл. 1).

В данном шифре представлено каким образом шифруются сообщения, каждой букве сообщения сопоставляется буква заранее выбранного произведения после чего порядковый номер буквы из сообщения и порядковый номер буквы из ключа (части произведения) суммируются по основанию 32 и получившимся числам снова сопоставляется буква. Таким образом получается совершенно не читаемое сообщение, чтобы расшифровать которое, требуется проделать похожие действия, только в этот раз требуется вычитать из порядкового номера буквы шифра, порядковый номер буквы ключа [4, С. 17].

**Таблица 1 – Книжный шифр**

16	17	9	3	6	19	5	1	3	1	10	5	17	20	7	10	19	29	
п	р	и	в	е	т	д	а	в	а	й	д	р	у	ж	и	т	ь	+
б	у	р	я	м	г	л	о	ю	н	е	б	о	к	р	о	е	т	
2	20	17	0	13	4	12	15	31	14	6	2	15	11	17	16	6	19	
18	5	26	3	18	23	17	16	2	15	16	7	0	31	24	26	27	16	
с	д	щ	в	с	ц	р	п	б	о	п	ж	я	ю	ч	щ	ы	п	

Также довольно популярным является шифр с автоключом. В этом шифре ключ строится путем случайного выбора первой буквы, а далее подставляется либо открытый текст (табл. 2), либо буква, ставшая результатом первого действия (табл. 3).

**Таблица 2 – Шифр с автоключом с использованием открытого текста**

Открытый	п	р	и	в	е	т
Ключ	а	п	р	и	в	е
Криптограмма	р	а	щ	л	и	ш

**Таблица 3 – Шифр с автоключом с использованием результата предыдущего действия**

Открытый	п	р	и	в	е	т
Ключ	а	р	б	к	н	у
Криптограмма	р	б	к	н	у	ж

Существует же совершенно не раскрываемый шифр, придуманный Гилбертом Вернамом, который заключается в преобразовании шифра и ключа в бинарный вид и последующего выполнения XOR операции. Например, шифруя «Завет», первоначально следует перевести буквы в бинарный формат, проще всего это сделать по таблице Бодо. Сделав требуемые преобразования, получим: з – 10001, а – 00011, в – 11001, е – 00001, т – 10000, в общем длина шифра выйдет 25 знаков. Далее требуется зашифровать ключ, ключом будет являться набор случайно сгенерированных чисел, в качестве примера используем первые цифры после запятой числа  $e = 2,7182818$ , чтобы набрать нужное количество символов,

потребуется 7 знаков. Для того чтобы перевести цифры в побитовый формат достаточно 4х разрядов. Таким образом получаем 0 – 0000, 1 – 0001, 2 – 0010, 3 – 0011, 4 – 0100, 5 – 0101, 6 – 0110, 7 – 0111, 8 – 1000, 9 – 1001. Составляя бинарный вид ключа, получим 0111000110000010100000011000. Следующим шагом, после выполнение предыдущих шагов будет выполнение операции XOR (табл. 4).

Таблица 4 – Операция XOR для метода Вернама

1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1
1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1

Получившийся шифр 1111100101110000100110011 и является нашим зашифрованным сообщением. Также, при дешифрации, следует произвести похожий алгоритм, зашифрованное сообщение следует логически сложить с ключом шифрования, таким образом получится исходное сообщение.

Такой шифр в действительности считается не раскрываемым, по причине того, что если злоумышленник захочет получить ключ шифра путем подбора, ему будет предстоять проверить все значения двоичной последовательности из двадцати пяти символов, а это  $2^{25} = 33\,554\,432$  ключей. Но такое огромное количество возможных комбинаций, не единственная проблема на пути злоумышленника, во время невероятно длительного процесса подбора, он обязательно наткнется на зашифрованное слово «Завет», но также по мере прохождения по всем возможным значениям, например, проверяя ключ 0100111000111100100111101 он получит слово «дождь». Далее подбирая ключ, проверяя очередную случайную последовательность злоумышленник подставит 1100001111000010001101100 и на выходе получится слово «океан», и так он будет периодически получать множество осмысленных слов, состоящих из 5 букв, но какое было изначально зашифровано он никогда не узнает.

Ассиметричное шифрование, в свою очередь, основывается на использовании двух ключей, открытого (публичного) и закрытого (секретного) (рис. 2). В таком случае, зашифрованные данные, которые зашифровали открытым ключом, возможно расшифровать только с использованием закрытого ключа [3, С. 67].

При том, важно, чтобы закрытый ключ, знала только сторона, который, будет в последствии расшифровывать данные, а открытый ключ, может быть общедоступным [5,6]. Например, для отправки сообщений между пользователями, первый пользователь должен будет зашифровать сообщение, с использованием открытого ключа своего собеседника, а получатель будет расшифровывать сообщение с помощью своего закрытого ключа, который доступен только ему [7,8].

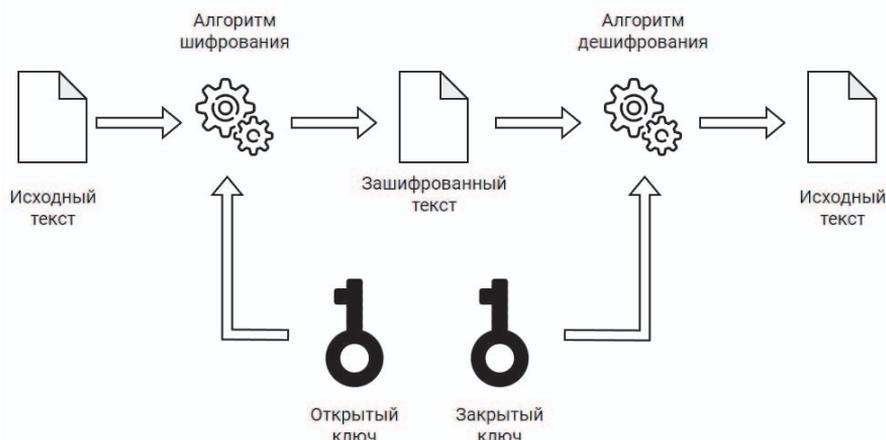


Рисунок 2 – Асимметричное шифрование

Таким образом асимметричный метод шифрования справляется с такой проблемой как перехват ключа, который передавался по незащищенному каналу.

Асимметричные алгоритмы строятся на проблеме решения сложных математических задач, на решение которых даже компьютеру придется потратить значимое количество времени, понятно, что речь идет не о паре дней, а о множестве десятков лет или даже столетий непрерывной работы вычислительной машины.

При упоминании асимметричного шифрования чаще всего упоминаются следующие алгоритмы:

1) Алгоритм, в сути которого лежит функция факторизации, называется RSA 2048 – Rivest Shamir Adelman (фамилии создателей алгоритма). Эта функция является довольно сложной функцией для вычисления для компьютера. В своей сути факторизация представляет собой разложение число на множители, но найти множители маленького числа не составит проблемы для компьютера, такие числа как 75, очень легко поддаются факторизации и его множители это 5, 5 и 3, такие задачи сможет легко решить и человек, но усложняя задачу, например, при выборе числа 182 325, множителями этого числа являются 3, 5, 5, 11, 13 и 17, человеку уже будет затруднительно найти его множители, но для вычислительной машины поиск множителей все еще не будет составлять особого труда. Дело в том, что в данном алгоритме шифрование осуществляется при помощи числа состоящего из 617 разрядов, для того чтобы разложить на множители число с таким количеством знаков, машине может потребоваться несколько сотен лет, таким образом, взлом подобного шифрования до сих пор является сложной и нерешенной задачей.

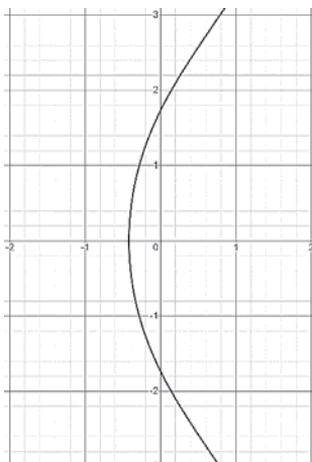
2) DSA (Digital Signature Algorithm), в прямом переводе «Алгоритм цифровых сигнатур». В основе представленного алгоритма лежит сложность вычисления дискретных логарифмов в простом поле. Также данный алгоритм является частным случаем схемы Эль-Гамала, и входит в стандарт DSS.

3) Система ECDSA также является алгоритмом формирования цифровой подписи и основывается на расчете и применении эллиптических кривых и модульной арифметики. Схожий алгоритм применяется при проведении криптовалютных транзакций. Используемые в данном методе эллиптические кривые строятся по следующей формуле:

$$y^2 = x^3 + ax + b \pmod{m}$$

**Формула 1 – Формула построения эллиптической кривой**

В формуле 1 параметры,  $a$  и  $b$  являются параметрами кривой, а  $m$  – модуль по которому производится вычитание в части модульной арифметики. Для более детального представления представлен пример эллиптического графика функции  $y^2 = x^3 + 7x + 3$  (рис. 3).



**Рисунок 3 – Пример эллиптического графика функции**

Как симметричный, так и ассиметричный методы, удобны и хороши, но каждый подходит для своего рода задач и имеет как сильные, так и слабые стороны:

1) Шифрование с симметричным ключом, работает быстрее и требует значительно меньше вычислительной мощности, поэтому он подходит для передачи информации в больших объёмах при том не сильно теряя времени на шифрование/дешифрование. Главным же минусом симметричного шифрования является то что открытый ключ должен иметь каждый, кто должен иметь доступ к зашифрованной информации, что довольно рискованно. Симметричный метод нашел свое применение в современных мессенджерах с защитой личной переписки. Также большинство банковских операций, таких как платежи, переводы и онлайн оплата шифруются симметричным методом.

2) Ассиметричный метод решает главную проблему симметричного, но при том жертвует скоростью работы и задействует большие количество вычислительных мощностей. Он в основном применяется для аутентификации на различных интернет ресурсах и других программных средств, в которых важна за-

щищенность данных пользователя. Также асимметричный метод шифрования используется при создании цифровых подписей.

*Литература*

1. Салий В.Н. «Криптографические методы и средства защиты информации». Саратов, 2017.
2. Григорьева Д.Р., Гареева Г.А., Басыров Р.Р. Симметричные криптографические системы: учебно-методическое пособие по дисциплине «Информационная безопасность». Набережные Челны: Издательство НЧИ КФУ, 2018.
3. Нильс Фергюсон, Брюс Шнайер «Практическая криптография» // Пер. с англ. Издательский дом «Вильямс». 2004.
4. Масленников М.Е. Практическая криптография. СПб.: БХВ-Петербург, 2003.
5. Фокин К.И. Преимущества внедрения учебного программного комплекса асимметричной системы шифрования // Информационные технологии в науке, бизнесе и образовании: сборник трудов XI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Москва, 28-29 ноября 2019 года. Москва: Московский государственный лингвистический университет, 2020. С. 333-337.
6. Щепочкин И.Н., Е.В. Шихалева, С.В. Солдатов Практическое применение асимметричного шифрования для санкционирования доступа // Ракетно-космическая техника. 2013. Т. 1. № 1(2). С. 23.
7. Храмушин Н.Н. Олейников Е.П. Анализ эффективности симметричных и асимметричных методов шифрования // Решетневские чтения: Материалы XXIV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева: в 2 частях, Красноярск, 10-13 ноября 2020 года. Том Часть 2. Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», 2020. С. 488-491.
8. Potugina D.A. Asymmetric encryption with the RSA algorithm // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. 2021. No. 20. P. 64-65.

УДК 004.5, 004.9, 517.938

**Системный анализ и разработка методики моделирования нелинейных нестационарных процессов в системе поддержки принятия решений**

**Алина Мажитовна Минитаева**, кандидат технических наук,  
доцент кафедры компьютерные системы и сети,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

(национальный исследовательский университет)», г. Москва,

**Сергей Владимирович Шайтура**, кандидат технических наук,  
доцент кафедры информационных технологий и управляющих систем,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

*В данной статье проводится системный анализ нелинейных нестационарных процессов (ННП) разной природы. Предложена методика их математического моделирования в системах поддержки принятия решений (СППР). Тенденции, характерные для современного этапа развития общества, концентрируют внимание на необходимости решения фундаментальных проблем, связанных с исследованием и прогнозированием ННП, развитие которых продолжается в условиях неопределенности и риска.*

Принятие многокритериальных решений, нелинейный нестационарный процесс, интервальная неопределенность, многомодельный подход, лицо принимающее решение.

**System analysis and development of of methods for modeling non-linear non-stationary processes in a decision support system**

**Alina Mazhitovna Minitaeva**, Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor of the Department computer systems and networks,  
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Bauman «Moscow State Technical University (National Research University)», Moscow,

**Sergey Vladimirovich Shaitura**, candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor of the Department of information technologies and control systems,

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

*This article discusses non-linear non-stationary processes (NSP) of different nature and proposes a technique for their mathematical modeling in decision support systems (DSS). The trends characteristic of the current stage of the development of society focus on the need to solve the fundamental problems associated with the study and forecasting of NNP, the development of which continues in conditions of uncertainty and risk.*

Multi-criteria decision-making, nonlinear non-stationary process, interval setting of preference of persons, multi-model approach.

### **Введение**

Процедура принятия решений является важнейшим аспектом интеллектуальной деятельности человека. Именно это обстоятельство определило давний и непрерывно возрастающий интерес к изучению этих процессов с целью их формализации и выработки на этой основе методов, правил, процедур выбора «эффективных» решений. В конечном счете эти исследования привели к возникновению теории принятия решений [1, 2].

Тенденции, характерные для современного этапа развития общества, концентрируют внимание на необходимости решения фундаментальных проблем, связанных с исследованием и прогнозированием нелинейных нестационарных процессов разной природы, развитие которых продолжается в условиях неопределенности и риска. То есть растет потребность в постоянном усовершенствовании методов прогнозирования за счет формирования принципиально новых подходов к формализации объекта прогнозирования, построения моделей и обработки результатов прогнозирования, которые будут служить основанием для принятия корректных управленческих решений [3-5].

**Цель статьи.** Провести системный анализ проблемы принятия многокритериальных решений в условиях разнородной интервальной неопределенности [6-8].

**Изложение основного материала.** Построение моделей и усовершенствование методов нуждаются в разработке современных методов системного анализа, позволяющих найти решение комплекса задач, связанных с анализом значительных объемов информации [9-13]. Последняя получается из разных источников, часто является неполной. Существует необходимость выявления в ней закономерностей, отражения свойств изучаемых явлений и процессов, в частности цикличности развития, сезонности, сходства процессов и т.д. Несмотря на наличие значительного количества исследований по данной тематике, проблема разработки моделей, методов прогнозирования нелинейных нестационарных процессов остается полностью нерешенной. В частности, следует отметить отсутствие общих подходов к анализу и предварительной обработке структурированных и неструктурированных данных, описывающих нелинейные нестационарные процессы, в том числе с применением методов интеллектуального анализа данных. Также нерешенным остается ряд задач, связанных с выявлением характера изучаемых процессов, разработкой универсальных методик построения

моделей и их ансамблей для получения прогнозов нелинейных нестационарных процессов для решения практических задач для ЛПР.

Наличие нестационарных процессов характерно для сферы анализа финансов, экономики, технологий и технических систем, биологии и т.д. [14-17]. Нестационарность проявляется в форме детерминированного или стохастического тренда, изменении во времени дисперсии и ковариации процесса (дисперсионно-ковариационная нестационарность). Развитие всех упомянутых типов процессов имеет нестационарный характер, что обусловлено особенностями развития, функционированием в условиях множества случайных внешних видов. Исследуемые процессы довольно часто содержат детерминированные и стохастические тренды, как индикаторы долгосрочных и среднесрочных изменений [18].

Следовательно, нелинейные нестационарные процессы, характерные для разных сфер, соответственно имеют особенности развития и протекают под влиянием многих специфических факторов [19]. Поэтому каждый класс таких процессов требует соответствующего формального описания с использованием математических моделей разных типов, методов интеллектуального анализа данных и т.д. Несмотря на то, что современные методы, модели и их комбинации широко применяются в прогнозном моделировании, отсутствует единый подход к построению технологий анализа, позволяющий реализовать различные подходы к прогнозному моделированию. Поэтому важно предложить схему анализа и прогнозирования процедур принятия решений, в основу которой должно быть положено комбинированное использование методов анализа данных, построения моделей и прогнозов, принятие решений в задачах управления развитием нелинейных нестационарных процессов (рис. 1) [20].

Для достижения более точных прогнозов и оценок нелинейных нестационарных процессов требуется разработка методов моделирования, которые учитывали бы как линейную, так и нелинейную составляющие этих процессов. Такой подход позволяет более адекватно описывать сложную динамику процессов и учесть влияние различных факторов на их поведение. Построение модели, разделяющей линейные и нелинейные компоненты, предоставляет более гибкий и точный инструмент для анализа и прогнозирования.

Важной особенностью нелинейных нестационарных процессов является их связь с различными сферами деятельности и случайными внешними воздействиями. Например, в финансовой сфере нестационарные процессы могут быть связаны с колебаниями цен на фондовых рынках, изменением ставок процента или валютных курсов. В экономике нестационарность может быть обусловлена флуктуациями спроса и предложения, изменением политики и экономической ситуации в целом. В каждой конкретной сфере нелинейные нестационарные процессы могут проявляться по-разному, и для их анализа и моделирования требуются специализированные подходы и методы.

При моделировании нелинейных нестационарных процессов также необходимо учитывать различные типы трендов. Если тренд имеет явно выраженное направление изменения во времени, то его называют детерминированным. Такие тренды могут свидетельствовать о долгосрочных или среднесрочных изменениях

в исследуемом процессе. Например, в экономике детерминированный тренд может отражать рост или спад экономической активности в течение определенного периода времени. Анализ и учет различных типов трендов является важной составляющей моделирования нелинейных нестационарных процессов.

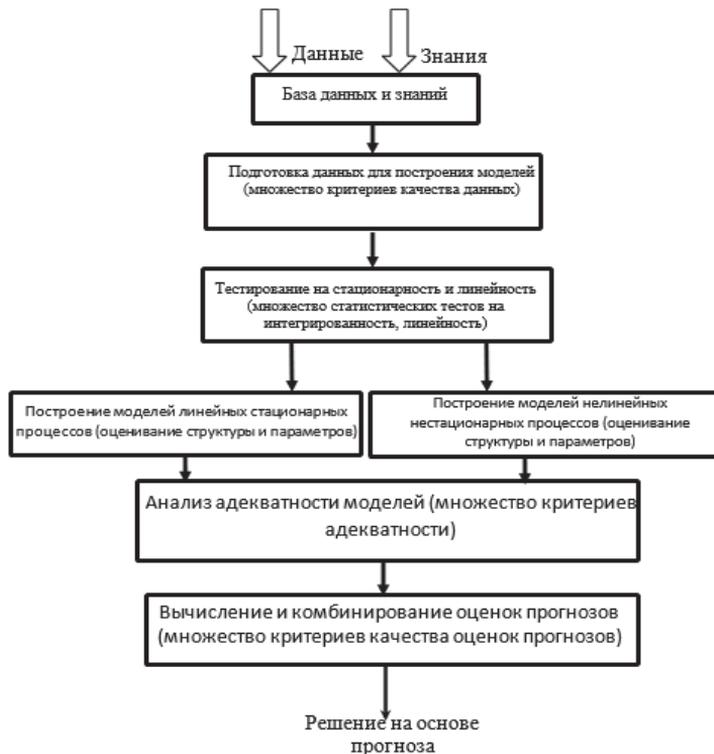


Рисунок 1 – Общая схема анализа нелинейных нестационарных процессов, построения моделей и оценки прогнозов

В целом, моделирование нелинейных нестационарных процессов представляет собой сложную задачу, требующую использования различных методов и подходов. Это включает в себя разработку математических моделей, применение статистических методов, методов машинного обучения и других инструментов. Комбинирование и адаптация этих методов к конкретным типам процессов и условиям их развития позволяет получать более точные и предсказуемые результаты. Развитие современных методов моделирования нелинейных нестационарных процессов является важной задачей, которая позволит лучше понимать и прогнозировать сложные динамики в различных сферах и добиться более эффективного управления и планирования.

В работе предлагается следующий метод моделирования нелинейных нестационарных процессов (ННП), который отличается тем, что формально описывается отдельно линейной и нелинейной составляющими изучаемого процесса и обеспечивает повышение адекватности модели в целом, а также повышение качества прогнозируемых оценок, исчисляемых с помощью этой модели [20].

Если тренд быстро меняется во времени в произвольном направлении, то его называют стохастическим. К таким процессам относятся, например, процессы формирования цен на биржах, значительные колебания курсов валют, обусловленные следующими случайными процессами: общая экономическая нестабильность и т.д.

Предлагаемая методика моделирования ННП состоит из следующих этапов.

Этап 1. Выделяется нелинейная часть путем построения авторегрессии высшего порядка, например, десятого.

Этап 2. Если остатки нелинейны, то подбирают нелинейную часть в классе регрессионных моделей и моделей на основе интеллектуального анализа данных.

Этап 3. Если модель в итоге неадекватна, продолжается итерационный подбор.

Этап 4. В свою очередь, линейная модель  $AP(10)$  оптимизируется с точки зрения уменьшения параметров.

Этап 5. Последним шагом является объединение линейной и нелинейной составляющих в единую модель, используемую для генерирования оценок прогнозов.

На рисунке 2 схематически представлена предлагаемая методика моделирования ННП. Представленная на рисунке 2 базовая процедура состоит из двух частей: линейной и нелинейной. При этом для построения моделей линейной и нелинейной составляющих используются итерационные оптимизационные процедуры, обеспечивающие адекватность модели в целом.

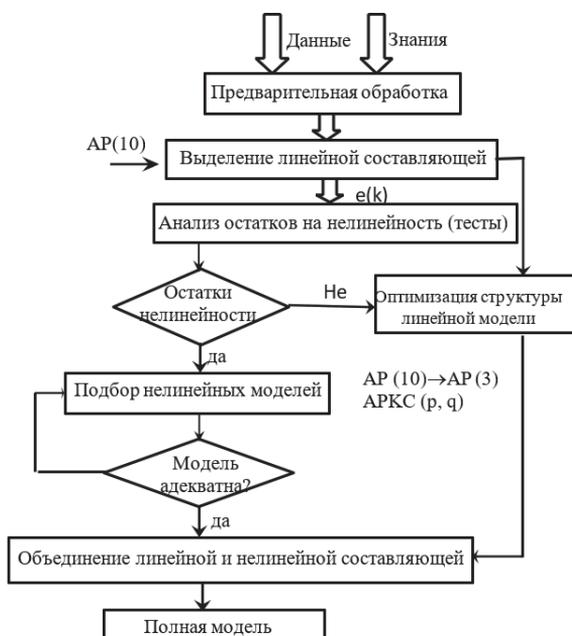


Рисунок 2 – Блок-схема метода моделирования ННП

Приведенная схема реализации данной методики может быть модифицирована и дополнена в зависимости от потребностей аналитика-пользователя. Для поиска нелинейной части может использоваться нелинейная регрессия (логистическая регрессия) или сети Байеса (СБ).

В свою очередь, результаты прогнозирования нелинейной части могут быть входными переменными для построения регрессионной модели (других моделей), уточняющих и дополняющих прогноз, полученный для нелинейной части.

Методика построения нелинейной модели реализуется в следующем порядке [21,22,23]:

1. Для каждого регрессора  $x_1, \dots, x_n$  происходит подбор наилучшей, по соответствующему критерию, нелинейной связи с целевой переменной  $y$ . В таблице выше приведены соответствующие возможные связи.

$\forall i = 1, \dots, n$  происходит поиск связи вида  $y = f_j(x_i)$  такого чтобы  $(y - f_j(x_i)) \rightarrow \min$ .

2. На основе выявленных индивидуальных функций связей  $f_1(x_1), f_2(x_2), \dots, f_n(x_n)$  строится общая полная модель вида:

$$y = g(x_1, \dots) = g(f(x_1), \dots, f(x_n)), \quad (1)$$

В простом аддитивном случае функциональной зависимости формула может быть представлена в виде [3]:

$$y = f_1(x_1) + f_2(x_2) + \dots + f_n(x_n). \quad (2)$$

Приведенная формула отражает декомпозицию функции  $y = g(x_1, \dots, x_n)$  как аддитивного уравнения, составляющими которого являются индивидуальные нелинейные функции связи между регрессором по целевой переменной.

Модель регрессии используется в случае, когда отклик – интервальная переменная и регрессоры – интервального типа [5]. Если же отклик – номинальная переменная, а регрессоры – интервального типа, используется модель логистической регрессии.

В случае отклика дихотомического типа (два уровня) используется бинарная логистическая регрессия [3]. Если же отклик содержит более двух уровней, то возможны следующие варианты:

- если отклик номинального типа, используют номинальную логистическую регрессию;
- если отклик ординарного типа, это случай ординарной логистической регрессии.

Модель логистической регрессии использует *logit*-преобразование, описываемое формулой:

$$\text{logit}(p_i) = \ln\left(\frac{p_i}{(1-p_i)}\right), \quad (3)$$

где  $i$  – номер наблюдения;  $p_i$  – вероятность того, что в  $i$ -ом наблюдении произойдет событие (например, факт продажи товара, или невозврат кредита);  $\ln$  – натуральный логарифм (с базой  $e = 2,7183$ ).

Модель логистической регрессии применяет *логит*-преобразование по отношению к вероятностям (рис. 3). Когда значение вероятности  $p$  приближается к

максимальному значению 1, то значение  $\ln(p/(1-p))$  переходит к бесконечности, а когда  $p$  приближается к своему минимальному значению 0, то  $p/(1-p)$  по приближающемуся к 0 аргументу идет значение отрицательной бесконечности. Как следствие логит-преобразования не имеет верхней или нижней границ.

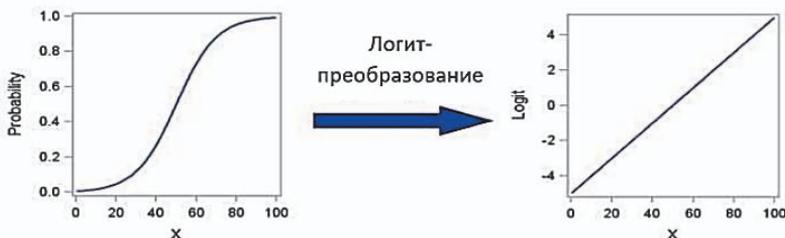


Рисунок 3 – Иллюстрация логит-преобразования значений вероятностей в логит-баллы

При использовании логистической регрессии делается предположение о линейной зависимости логит-балла от значения предиктора. Модель множественной логистической регрессии имеет вид [3]:

$$\log(p_i) = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \dots + \beta_k X_{ki}, \quad (4)$$

где  $\logit(p_i)$  – логит-балл для вероятности события;  $\beta_0$  – свободный член регрессионного уравнения;  $\beta_k$  – оценка параметра  $k$ -го предиктора модели.

В отличие от модели линейной регрессии, логит не является нормально распределенной и дисперсия не является постоянной:

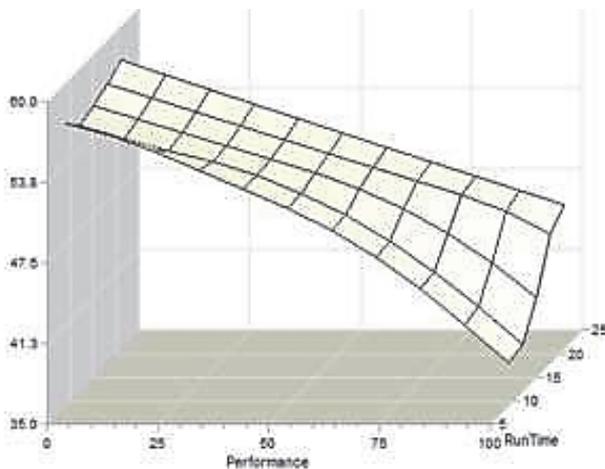


Рисунок 4 – Визуализация нелинейной модели с двумя регрессорами в трехмерном пространстве, когда присутствует нелинейная связь между отзывом и регрессорами

**Обсуждение и результат.** Таким образом, для оценки параметров логистическая регрессия требует более сложных методов вычисления оценок параметров, это так называемый метод максимального правдоподобия. Этот метод

находит значение параметров, позволяющих сделать наблюдаемые данные наиболее вероятными. Это достигается путем максимизации функции правдоподобия, выражающей вероятность наблюдаемых данных как функцию от неизвестных параметров.

Задачу многокритериального выбора лучшего решения на множестве математических моделей, можно представить следующим образом (1):

$$M = M_0(Y, I), M_E(X), M_{OE}, M_D(Q), M_{MO}, M_{ME}, M_U, A, M_H, M_{RS}, M_V \} \quad (5)$$

где  $M_0(Y, I, P)$  – идентифицирующая модель системы;  $Y$  – эндогенные переменные;  $I$  – вектор управляемых переменных;  $M_E(X)$  – модель окружающей среды;  $X$  – экзогенные переменные;  $M_{OE}$  – модель взаимодействия объекта и окружающей среды;  $M_D(Q)$  – модель поведения системы;  $Q$  – возмущающие воздействия;  $M_V$  – модель взаимодействия с подсистемами других уровней;  $M_{MO}$  – модель изменения состояния системы;  $M_{ME}$  – модель изменения состояния окружающей среды;  $M_U$  – модель управляющей системы;  $A$  – правило выбора действий конфигурации объекта;  $M_H$  – модель воздействия принимающего решения на систему и результаты исследования;  $M_{RS}$  – модель системных рисков.

Проблема формирования оптимальной методики прогнозного моделирования нелинейных нестационарных процессов в значительной степени обусловлена необходимостью одновременного преодоления ряда неопределенностей различных типов: ситуационной, статистической, структурной, вероятностной и т.д. Хотя большинство существующих информационных систем прогнозирования и поддержки принятия решений имеют соответствующие средства, однако внимание сосредотачивается на проработке неопределенностей только отдельных типов.

В данном исследовании для решения этой проблемы предложена информационная технология применения интеллектуального анализа больших массивов структурированных и неструктурированных данных. Важным преимуществом предлагаемого подхода есть возможность разработки моделей для разных горизонтов прогнозирования, ведь от того, какой горизонт прогнозирования выбран, зависит не только выбор типа модели, но и подбор входных данных, в частности, консолидация наиболее значимых факторов. Кроме того, необходимо учесть тенденции развития исследуемых процессов, формально-математическое описание алгоритмов и методов генерирования набора кандидатов-сценариев развития процесса [24-27].

## Выводы

Процедура принятия решений является результатом интеллектуальной деятельности ЛПР (индивидуума или группы индивидуумов, имеющих согласованное мнение). На современном уровне знаний о деятельности человеческого мозга и при современном развитии измерительных средств не представляется возможным непосредственно измерить в количественных шкалах результат оценивания ЛПР качества альтернатив, из которых производится выбор решения. Таким образом, классические методы идентификации параметров модели по результатам измерения численных значений входа и реакции системы оказываются неработоспособными и необходимы новые подходы к решению задачи извлечения знаний ЛПР.

#### *Литература*

1. Артюшенко В.М., Корчагин В.А. Расчет и моделирование вероятности появления внутриканальных и интермодуляционных помех беспроводных устройств с малым радиусом действия // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2014. Т. 10. № 1. С. 57-65.
2. Артюшенко В.М., Аббасова Т.С., Аббасов А.Э. Условия эффективного применения виртуальных лабораторий для инженерного образования. В сборнике: *Инновационные технологии в современном образовании, сборник трудов по материалам II Международной научно-практической интернет-конференции*. 2015. С. 12-19.
3. Аббасова Т.С., Артюшенко В.М. Методы инсталляции и проектирования электрических кабельных линий в 10-гигабитных системах связи // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2009. Т. 5. № 2. С. 8-16.
4. Артюшенко В.М. Анализ взаимного влияния кабельных линий электротехнических системах // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2006. Т. 2. № 2. С. 8-11.
5. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Анализ математических моделей информационных параметров сигналов, обрабатываемых радиолокационными устройствами наблюдения ближнего действия // *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. 2014. № 5. С. 14-20.
6. Артюшенко В.М., Самаров Е.К. Применение алгоритма фильтрации Калмана-Бьюси в задачах анализа качества электроэнергии // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2006. Т. 2. № 1. С. 17-23.
7. Bernardo J.M., Smith A.F.M. *Bayesian Theory*. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2000. 586 p.
8. Dobrescu E. Modelling an Emergent Economy and Parameter Instability Problem. *Journal for Economic Forecasting of Institute for Economic Forecasting*. 2017. Vol. 0(2). P. 5-28.
9. Hautaniemi S.K., Korpisaari P.T., Jukka P.P. Saarinen. Target identification with dynamic hybrid Bayesian networks // *Proceedings of the fourth SPIE's international symposium on sensor fusion: architectures, algorithms and applications*. Orlando (Florida US). 2000. P. 55-66.

10. Minitaeva A.M. Analysis of the multi-criteria decision-making problem under conditions of heterogeneous interval uncertainty // Proceedings of the 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). Lipetsk: IEEE, 2022. P. 42-45.
11. Минитаева А.М. Принятие решений в условиях интервального задания предпочтений лиц, принимающих решения // Сборник материалов конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2022): 15-я мультиконференция по проблемам управления. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2022. С. 197-200.
12. Минитаева А.М. Многомодельный подход к прогнозированию нелинейных нестационарных процессов в задачах оптимального управления // Необратимые процессы в природе и технике. Труды Двенадцатой Всероссийской конференции. В 2-х томах. Москва, 2023. Т. 1. С. 438-447.
13. Quinlan J.R. Induction of decision trees. Machine Learning. Boston: Kluwer Academic Publishers. 1986. Vol. 1. № 1. P. 81-106.
14. Цветков В.Я. Коррелятивный анализ в управлении // Славянский форум. 2012. № 1(1). С. 266-269.
15. Шайтура С.В., Цветков В.Я., Шайтура А.С., Кожаев Ю.П., Харитонов С.В., Степаненко Н.В. Теория и практика геомаркетинга: учебное пособие. Бургас, 2016.
16. Шайтура Н.С. Геопространственный анализ и стратегии управления ресурсами // Методы и программные средства дистанционного зондирования Земли. Сборник научных трудов. Бургас, 2022. С. 191-208.
17. Шайтура С.В. Интеллектуальный анализ данных // Славянский форум. 2015. № 2(8). С. 341-350.
18. Шайтура С.В., Галкин Д.А. Геомаркетинговый анализ больших данных // Информационные технологии. 2021. Т. 27. № 4. С. 180-187.
19. Шайтура С.В., Жиделев М.А., Гунина Е.В. Анализ систем комплексного управления доступом на основе радиочастотной идентификации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 12. С. 404-408.
20. Шайтура С.В., Жиделев М.А., Федоров И.Д. Системный анализ технологий компьютерных систем и систем связи // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 3. С. 290-296.
21. Шайтура Н.С. Применение космического мониторинга для анализа разновременных карт температур // Методы и программные средства дистанционного зондирования Земли. Сборник научных трудов. Бургас, 2022. С. 122-148.
22. Searle S.R. Linear Models for Unbalanced Data. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1987. 551. P. 8.
23. Shaitura S.V., Feoktistova F.M., Minitaeva A.M., Olenov L.A., Chulkov V.O., Kozhaev Y.P. Spatial geomarketing powered by big data // Revista Turismo Estudos and Praticas. 2020. № 55. P. 13.

24. Shaytura S.V., Minitaeva A.M., Rosenberg I.N., Kozhaev Yu.P. Threedimensional modeling and creation of panoramas: Monograph, Burgas, 2019.
25. Shaitura S.V., Minitaeva A.M., Ordov K.V., Shaparenko V.V. Virtual enterprises in a spatial economy // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). 2019. Vol. 7. № 6. P. 719-724.
26. Wilcox R.R. Keselman H.J. Modern robust data analysis methods: Measures of central tendency // Psychological Methods. 2003. Vol. 8(3). P. 254-274.

УДК 004.05

**Анализ дополнительных направлений технологического развития современных структурированных кабельных систем**

**Андрей Борисович Семенов**, доктор технических наук, профессор,  
Национальный исследовательский университет  
Московский государственный строительный университет  
(НИУ МГСУ), г. Москва,

**Владимир Михайлович Артюшенко**, доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой информационные технологии и управляющие системы,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,  
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

*В рамках системного подхода проводится анализ дополнительных возможностей и тенденций технологического совершенствования структурированных кабельных систем. Показана перспективность наращивания технико-экономической эффективности нижних уровней внутриобъектовой информационной системы за счет тесной интеграции структурированной кабельной системы и активного оборудования локальных сетей.*

Структурированные кабельные системы, технологии «длинного» Ethernet, дистанционное питание PoE, однопарный Ethernet.

**Analysis of additional directions of technological development of modern structured cabling systems**

**Andrey Borisovich Semenov**, Doctor of Technical Sciences, professor,  
National Research University Moscow State University of Civil Engineering  
(NRU MGSU), Moscow,

**Vladimir Mikhailovich Artyushenko**, doctor of Technical Sciences, Professor,  
head of the Department of information technologies and control systems,  
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,  
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

*Within the framework of the system approach, the analysis of additional opportunities and trends in technological improvement of structured cabling systems is carried out. The prospects of increasing the technical and economic efficiency of the lower levels of the intra-object information system due to the close integration of the structured cabling system and active equipment of local networks are shown.*

Structured cabling systems, «long» Ethernet technologies, remote PoE power supply,

single-pair Ethernet.

**Введение.** Ранее [1] в рамках системного анализа рассматривались ключевые направления развития техники СКС в рамках того классического определения этой техники, которое было заложено в нее еще в конце 80-х гг. прошлого века. Была установлена необходимость технологического совершенствования СКС как сложной технической системы для наращивания ее технико-экономической эффективности и восстановления той привлекательности для широкого круга пользователей, которое структурированное каблирование демонстрировало на ранних этапах своего развития.

Совершенствование СКС возможно также за счет отказа от жесткого соблюдения некоторых положений базовых нормативных документов, что позволяет придать структурированному каблированию ряд принципиально новых качеств. Далее рассмотрены некоторые из таких направлений, которые позволяют существенно усилить потребительскую ценность информационной кабельной системе.

**Однопарный Ethernet.** Появление однопарного Ethernet (известен также как SPE – от англ. Single Pair Ethernet) – естественная реакция отрасли на такие явления как:

- многократный рост цен на медь и нефть как основных сырьевых материалов для изготовления горизонтального кабеля;
- появление широкого круга новых потребителей ресурсов СКС (умный дом и промышленность), для которых классические кабельные линии функционально избыточны и экономически не привлекательны.

Использование в этой области классической техники локальных систем невыгодно из-за их существенной технической избыточности, а применение полевых шин неудобно из-за расширения номенклатуры активного сетевого оборудования и появления проблемы конверсии интерфейсов. Переход на однопарные кабели малого диаметра выгоден тем, что

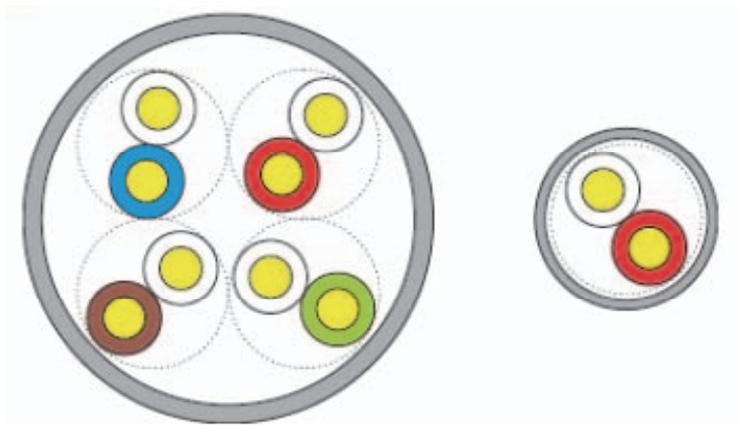
- значительно снижает стоимость;
- уменьшает пожарную нагрузку на объект недвижимости;
- позволяет заметно более эффективно использовать емкость существующих кабельных трасс.

Фокусной областью применения новой техники рассматриваются те многочисленные устройства цифрового потолка, которые, в первую очередь, обсуживают многочисленные системы инженерного обеспечения «умного» дома. Не исключается возможность их применения в классических системах автоматизации в случае установки в них соответствующих сетевых интерфейсов.

Отдельно укажем на то, что однопарный Ethernet ориентирован исключительно на нижний уровень информационных систем. Его практическое внедрение означает полную или частичную реализацию горизонтальной части СКС (или ее аналога за пределами офисных зданий) на технике новой разновидности.

С точки зрения линейной части физического уровня информационной системы однопарный Ethernet выгоден заметно лучшими массогабаритными ха-

рактическими кабельными изделиями. Выигрыш по площади поперечного сечения однопарных кабелей по сравнению с классическим 4-парным горизонтальным демонстрирует рисунок 1.



**Рисунок 1 – Сравнение поперечного сечения классического горизонтального и однопарного кабелей Ethernet**

За счет меньших габаритов разъемов коммутационное оборудование SPE превосходит классические коммутационные панели примерно в два раза по параметру плотности конструкции.

Внедрение активного сетевого оборудования заметно упрощается тем, что вновь разработанные сетевые интерфейсы SPE фактически представляют собой «четвертинку» тех решений, которые были разработаны в процессе создания техники 1G и 10G Ethernet.

Основные технические особенности сетевых интерфейсов SPE:

- возможность увеличения протяженности тракта до 1 км (при скорости 10 Мбит/с, которая вполне достаточна для промышленных применений);
- допустимость реализации шинных структур, которые хорошо востребованы при построении систем автоматизации инженерного обеспечения жилых и общественных зданий;
- возможность применения большой номенклатуры многосегментных и многоконнекторных трактов, схемы которых демонстрирует рисунок 2.

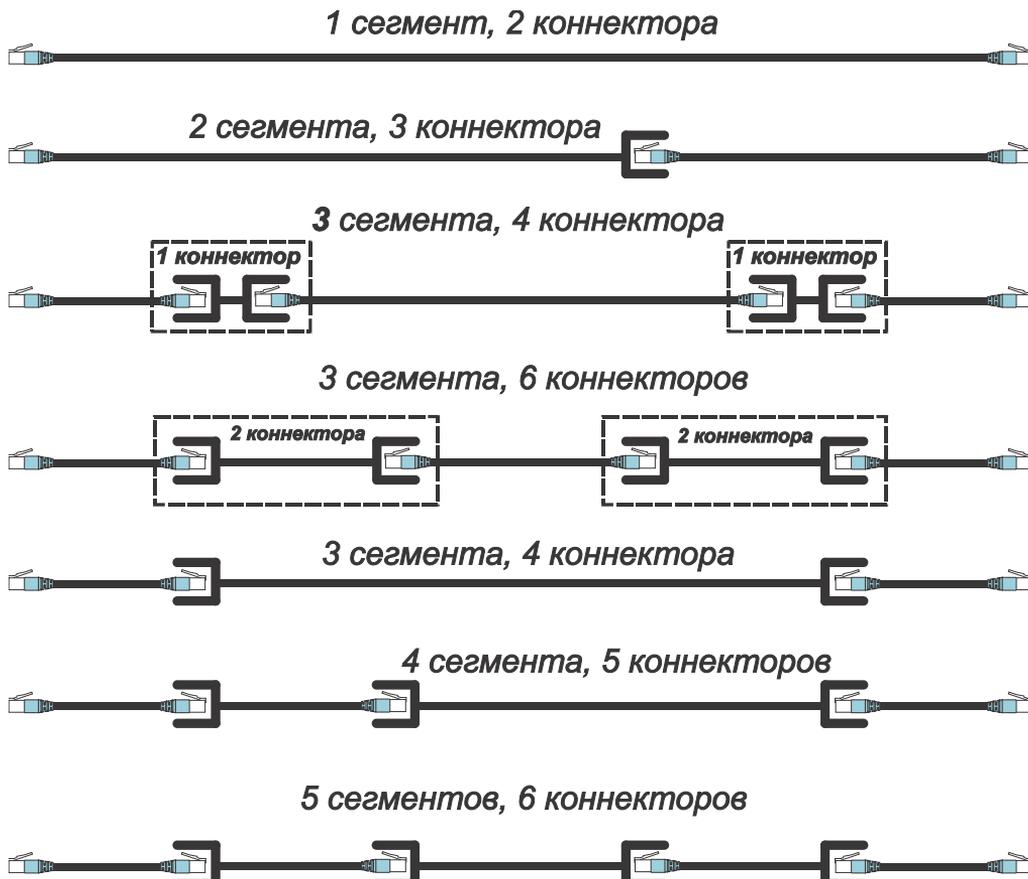


Рисунок 2 – Нормированные спецификациями IEEE конфигурации кабельных трактов однопарного Ethernet

С учетом фокусной области применения активное сетевое оборудование однопарного Ethernet заметно отличается от классической техники офисных и ранее известных промышленных систем. Наиболее существенные отличия заключаются в:

- возможности увеличения протяженности тракта нижнего уровня до 1 км при скорости 10 Мбит/с, что отдельно выделено на рисунке 3;
- допустимости реализации шинных структур, которые обеспечивают функционирование до восьми терминальных устройств – см. рисунок 4.

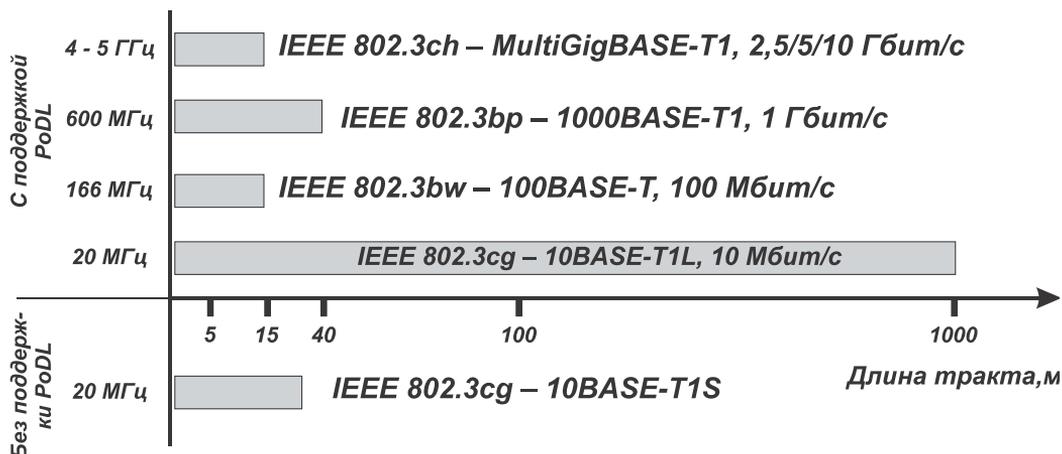


Рисунок 3 – Стандартизованные варианты реализации кабельных трактов однопарного Ethernet по протяженности и максимальной поддерживаемой скорости передачи

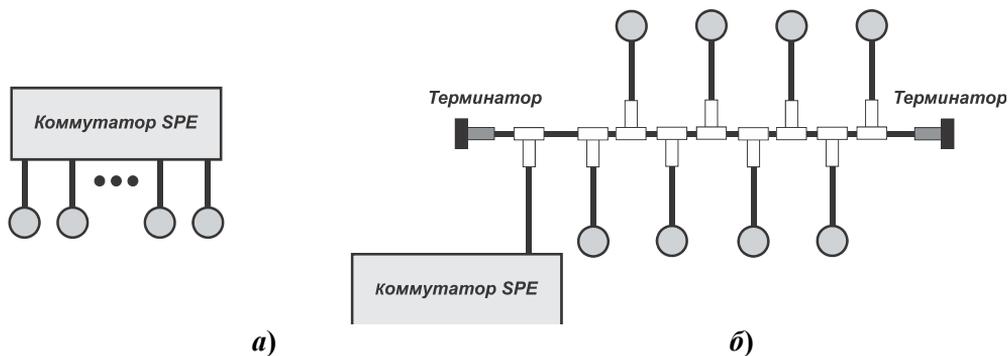


Рисунок 4 – Варианты подключения терминального оборудования к коммутатору однопарного Ethernet: а) традиционная; б) по шинной схеме

Проблема дистанционного питания маломощного терминального оборудования решена разработкой технологии PoDL. В отличие от систем PoE, в однопарном Ethernet невозможно задействовать фантомные цепи и задача подавления шунтирующего действия цепей питания на функционирование приемопередатчика сетевого интерфейса решается применением индуктивного фильтра, который включается на выходе источника так, как это показывает рисунок 5.

Максимальная мощность терминального оборудования может достигать 50 Вт, что вполне адекватно потребностям современной практики построения внутриобъектовых информационных систем.

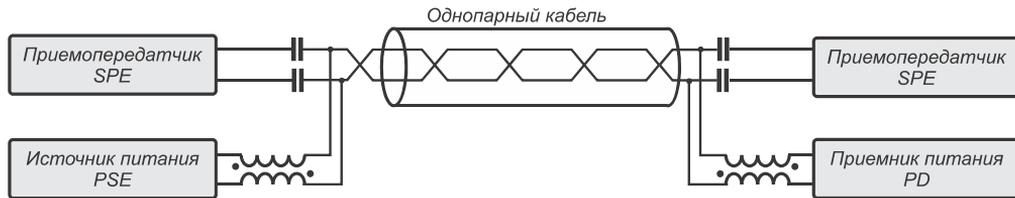


Рисунок 5 – Схема взаимодействия приемопередатчика однопарного Ethernet, источника и приемника системы PoDL

Применяются две разновидности разъемов: рассчитанные преимущественно на офисные применения LC-подобные (IEC 63171-1) и промышленного типа (IEC 63171-6) (рисунок 6).

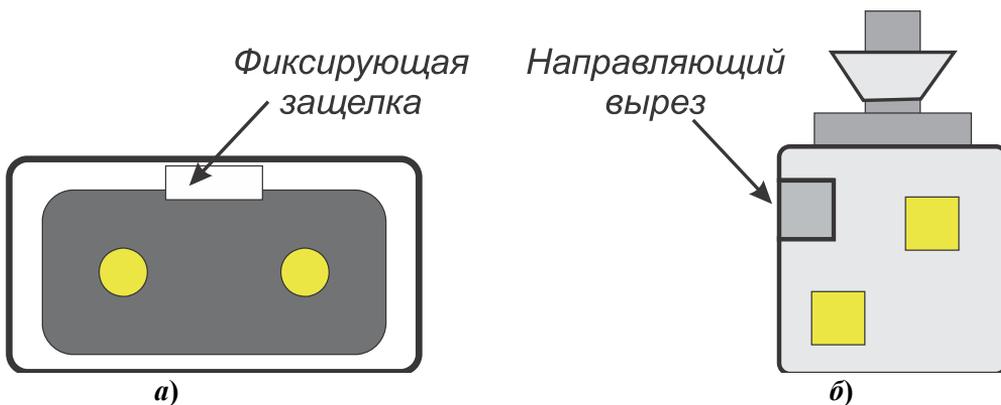


Рисунок 6 – Разновидности разъемов: а – LC-подобные офисного исполнения (IEC 63171-1); б – промышленного типа (IEC 63171-6)

Отдельно укажем на то, что за счет заметно меньших габаритов однопарных соединителей типовая конструктивная плотность коммутационного оборудования удваивается и достигает 40 портов на 1U высоты.

**СКС и активное оборудование.** Рост популярности исполнения нижних наиболее затратных по требуемым для реализации ресурсам уровням внутриобъектовой информационной системы в виде целенаправленной комбинации целенаправленной активного оборудования различного назначения, называемого иногда структурированным кабельным решением, обусловлен:

резким удешевлением активного сетевого оборудования на фоне увеличения стоимости СКС из-за роста цен на медь и нефть;

стремлением к увеличению эффективности через устранение проблемы взаимодействия интерфейсов.

Активное оборудование рассматриваемого комплекса вне зависимости от назначения взаимодействует с СКС в составе единого комплекса по двум основным схемам (см. рисунок 7):

- по схеме наложения с использованием компонентов кабельного тракта как механической несущей платформы;
- с исполнением активных устройств в виде адаптера, находящегося (в основной массе случаев) за пределами стационарной линии.

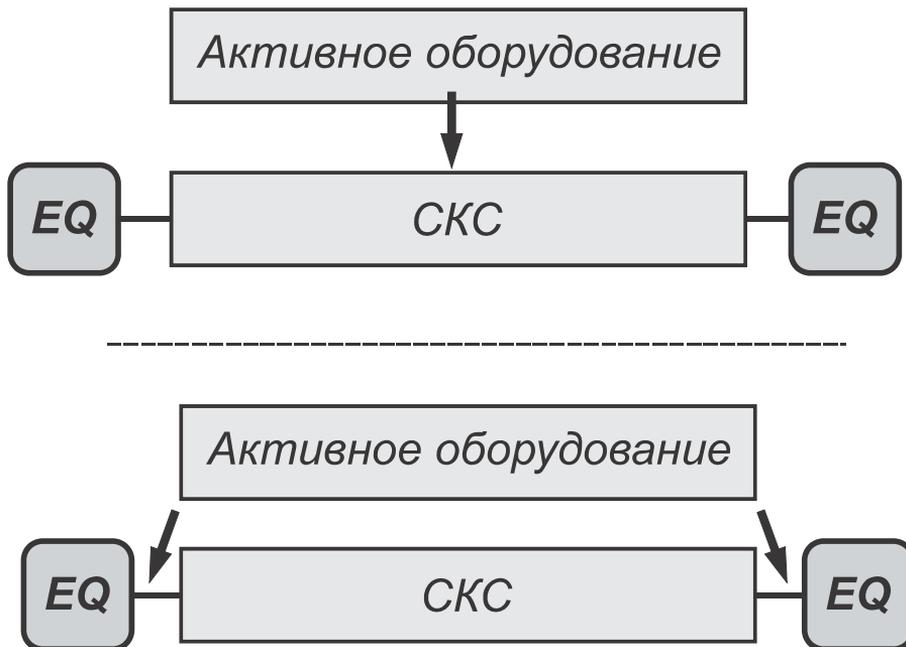


Рисунок 7 – Схемы взаимодействия активного сетевого оборудования с СКС

Рост популярности такого исполнения нижних уровней информационной системы и его техническая допустимость во многом обусловлен применением в информационной системе единой технологии Ethernet. Последнее означает отсутствие ограничения известного правила «четырёх репитеров» в связи с переходом на коммутирующие концентраторы как основной вид оборудования для связи терминальных устройств с серверами.

По схеме адаптера с СКС ранее взаимодействовали точки беспроводного доступа Wi-Fi.

**Системы интерактивного управления.** Идея систем интерактивного управления, которые представляют собой один из вариантов активного оборудования, непосредственно взаимодействующего со структурированной проводкой, состоит в частичной автоматизации процессов текущего администрирования СКС. Системы данной разновидности построены вокруг датчиков контроля подключения вилок коммутационных шнуров к портам панелей, светодиодов взаимодействия с системным администратором и специализированной БД на сервера. Обеспечивают частичную автоматизацию процессов текущего администрирования СКС.

Датчики подключения как ключевой аппаратный компонент системы интерактивного управления может иметь самое разнообразное исполнение, см. рисунок 8.



Рисунок 8 – Варианты исполнения датчиков подключения коммутационного шнура к портам коммутационной панели

Пример реализации такого датчика на контактной схеме приведен на рисунке 9.

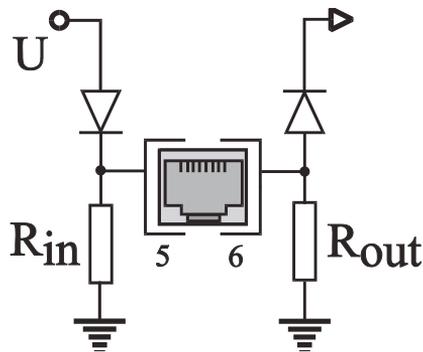


Рисунок 9 – Пример исполнения датчика подключения коммутационного шнура к розетке модульного разъема панели

Опрос состояния датчиков осуществляется специализированными контроллерами, которые при необходимости объединяются в полноценную сеть.

Управление работой системного администратора в процессе изменения конфигурации кабельной системы по рабочему заданию, которое в соответствии с идеологией построения системы администрирования СКС запускается на сервере [2], в большинстве случаев осуществляется светодиодами, которые тем или иным образом привязываются к конкретному порту коммутационной панели.

В настоящее время техническое развитие этого направления фактически прекратилось из-за ограниченного функционала и неустойчивой работы канала передачи данных от датчика к серверу из-за необходимости применения конвертора интерфейсов в контроллере [3].

**СКС и активное сетевое оборудование.** Применение активного сетевого оборудования в комбинации с СКС позволяет:

- решить проблему нехватки места в технических помещениях;
- снизить стоимость решения в целом за счет мультиплексирования;
- устранить опасность перегрева;
- уменьшить объемы линейных кабелей за счет мультиплексирования сигналов хотя бы на части трассы доставки данных до терминальных устройств, т.е. снизить стоимость СКС и ее пожароопасность (рисунок 10).

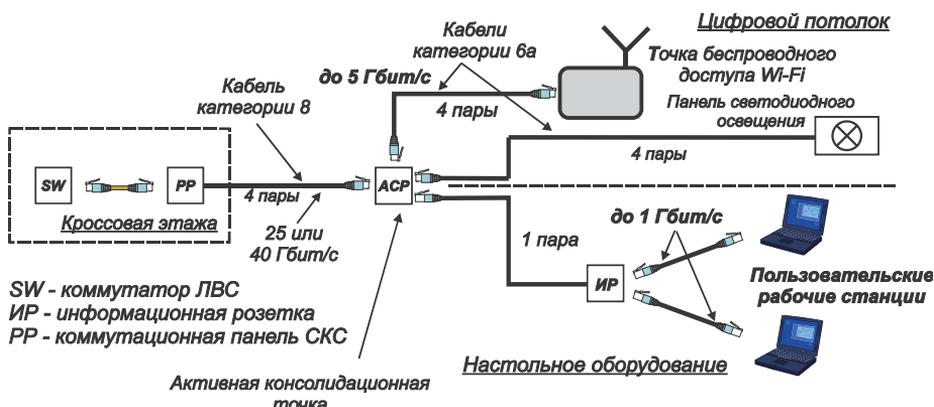


Рисунок 10 – Структура нижнего уровня информационной системы с использованием активной консолидационной точки (АСР) и однопарного Ethernet

Техническая основа возможности перехода на новые структуры – устранение необходимости выполнения правила четырех репитеров. Соответствующее активное оборудование весьма разнообразно по исполнению и представлено инсталляционными микрокоммутаторами, решением Beam Caster, точками доступа Wi-Fi, активными консолидационными точками (рисунок 11).



Рисунок 11 – Примеры оборудования нижнего уровня информационных систем: а – инсталляционный микрокоммутатор; б – базовый блок системы беспроводной оптической связи Beam Caster; в – точка доступа Wi-Fi

**Технология PoLAN.** С технологической точки зрения PoLAN представляет собой адаптацию на офисную область популярной в сетях доступа технологии xPON. Реализуется на одномодовой волоконно-оптической элементной базе, предполагает отказ от принципа универсальности и допустимость применения в составе кабельного тракта оптического сплиттера. Хорошо пригодна для построения централизованных структур (централизованная оптическая архитектура на новом технологическом уровне).

Сеть PoLAN может быть наложена на построенную ранее оптическую СКС, в т.ч. многомодовую даже в случае ее реализации на волокнах старых типов при условии применения т.н. «пассивных преобразователей среды» (внутренний или внешний адаптер, подавляющий эффект модовой конверсии и реализованный по образцу известных МСР-шнуров) [4].

**Учет технологии PoE при проектировании СКС.** Технология PoE, внедренная в широкую инженерную практику в начале нулевых годов, за счет своих высоких технико-экономических показателей получила широкое распространение при построении информационных систем разнообразных объектов недвижимости [5]. Сама технология PoE оказывает сильное обратное влияние на технику СКС, а высокая вероятность ее применения учитывается как на компонентном, так и на системном уровне [6]. Последнее выражается в том, что при функционировании оборудования PoE в режиме максимальной мощности потенциально возможен большой нагрев центральных кабелей в пакетах [7].

Острота проблемы нагрева витопарных кабелей усиливается тем фактом, что кондиционирование пространства за фальшпотолком недопустимо из-за высоких затрат и соображений пожарной безопасности. Рост температуры приводит к ограничению предельной протяженности стационарной линии. Для минимизации вредных последствий этого эффекта IEEE предлагает:

- увеличивать категорию СКС,
- применять экранированные конструкции,
- ограничивать количество кабелей в пакете,
- размещать пакеты в лотке с зазором так, как это показано на рисунке 12.

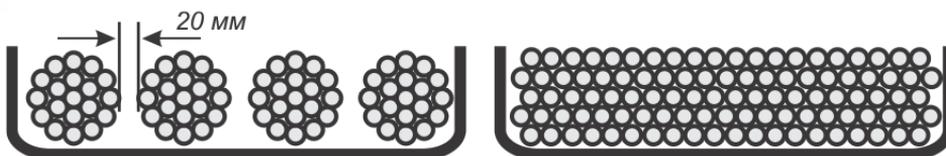


Рисунок 12 – Варианты размещения пакетов горизонтальных кабелей СКС в лотках

Высказываются также предложения по увеличению максимальной рабочей температуры кабеля до 70 С.

Анализ модели IEEE показывает ее чрезмерную жесткость, что следует хотя бы из типовой схемы прокладки горизонтальных кабелей, представленной на рисунке 13.

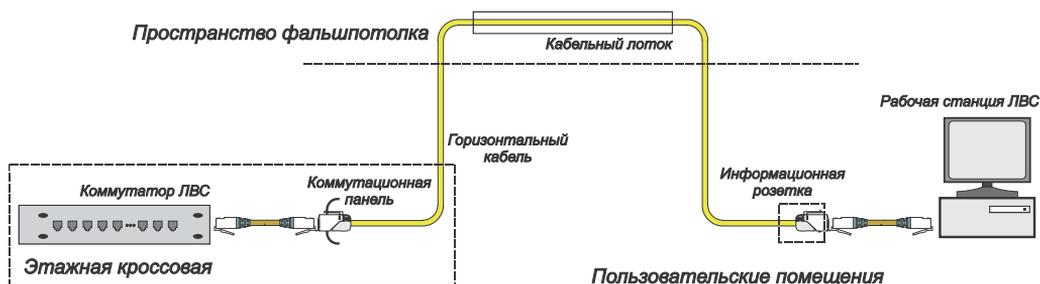


Рисунок 13 – Типичная для современных офисных зданий структура кабельной трассы горизонтальной подсистемы СКС

Важным здесь является то, что температура в технических и пользовательских помещениях не может превышать  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$  (задается условиями эксплуатации аппаратуры в первом случае и нормами СанПиН во втором).

Сами горизонтальные кабели крайне редко имеют максимальную протяженность (в правильно спроектированной СКС длина горизонтального проброса превышает 70 м максимум в 5% случаев). Одновременно, функционирование терминального оборудования PoE в режиме максимальной мощности происходит достаточно редко, что, в частности, отражается в популярности применения на практике источников с уменьшенной выходной мощностью и иллюстрируется рисунком 14.

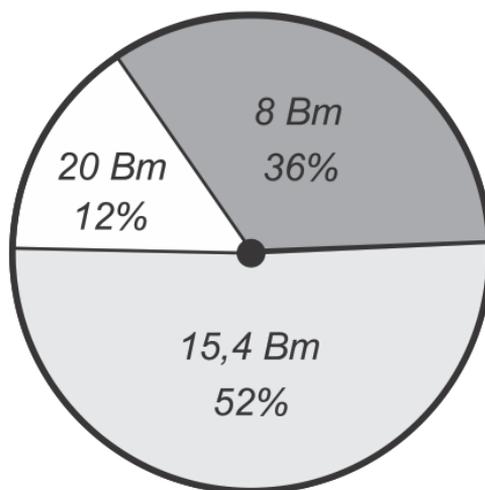


Рисунок 14 – Распределение мощностей источников дистанционного питания коммутаторов уровня рабочей группы с опцией PoE

Распределение температуры вдоль той части кабельной трассы, которая находится за фальшпотолком, также показывает ее падение по мере удаления от технического помещения, что демонстрирует рисунок 15.

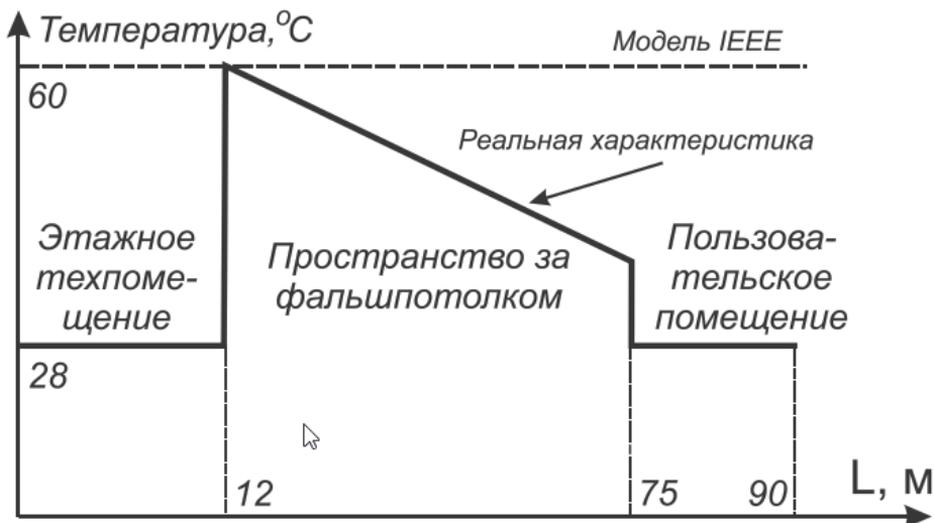


Рисунок 15 – Распределение температуры горизонтальных кабелей при использовании технологии PoE

В основе этого эффекта лежит постепенное уменьшение количества кабелей в пакете и связанное с этим улучшение условий охлаждения. Все эти факторы показывает возможность реализации кабельной системы на U/UTP-технике категории 5e даже при максимальной протяженности.

**Заключение.** Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Одним из главных направлений развития техники структурированного каблирования в части наращивания ее технико-экономической эффективности становится интенсивное использование внутренние резервы линий СКС за счет:

- устранения имеющейся избыточности различных видов;
- более точного учета взаимодействия кабельной линии с активным сетевым оборудованием различного функционального назначения.

2. Техника однопарного Ethernet по своим функциональным возможностям в части быстродействия и дистанционного питания терминального оборудования мало уступает классическим решениям и за счет этого при построении внутри объектовых информационных систем имеет перспективы внедрения за пределами цифрового потолка.

3. Главным резервом по увеличению объемов строительства СКС становятся объекты класса «Умный дом», которые за счет внедрения технологий однопарного Ethernet и перевода части систем на централизованную схему построения требуют увеличенного объема горизонтальных кабелей различного назначения.

4. Дальнейшее наращивание эффективности нижних уровней внутриобъектовой информационной системы возможно за счет перехода на схему структурированного кабельного решения, предполагающего тесную интеграцию активного оборудования СКС и аппаратуры локальных сетей.

*Литература*

1. Семенов А.Б., Артюшенко В.М. Анализ современных технологических тенденции развития классических структурированных кабельных систем // Технологический вестник. 2023. С. 27-39.
2. Семенов А.Б. Администрирование структурированных кабельных систем. М.: ДМК-Пресс, 2008. 192 с.
3. Семенов А.Б. Системы интерактивного управления СКС. М.: Эко-Трендз, 2011. 223 с.
4. Семенов А.Б. Реализация сетей PoLAN на существующей кабельной инфраструктуре // Первая миля. 2021. № 7(99). С. 38-43.
5. Семенов А.Б. Эволюция дистанционного питания // Журнал сетевых решений LAN. 2015. № 10. С. 51-55.
6. Семенов А.Б. Как технология PoE меняет подходы к построению и эксплуатации СКС // Вестник связи. 2021. № 8. С. 24-28.
7. Семенов А.Б. Влияние повышенной температуры на предельную протяженность витопарных трактов СКС // Первая миля. 2022. № 1(101). С. 14-19.

УДК 004.03

### **Автоматизированные платформы для подбора трудовых ресурсов строительной отрасли: сравнительный анализ**

**Людмила Евгеньевна Суркова**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве», ORCID: 0000-0002-4067-1875,

**Алексей Анатольевич Щиголь**, магистрант второго года обучения кафедры «Информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве»,

Национальный Исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва

*В работе приведен сравнительный анализ наиболее популярных платформ по подбору исполнителей работ с возможностью учета специфики строительной отрасли, таких как HeadHunter, Superjob, Avito, Profi.ru. Исследованы следующие функциональные возможности данных платформ: размещение вакансий, поиск кандидатов, профили соискателей, отзывы и рейтинги, система сообщений, платежные возможности. Выделены сильные и слабые стороны и возможность учета специфики строительной отрасли. Сформулированы требования к платформе по подбору исполнителей для строительной сферы деятельности.*

Цифровая платформа, цифровая трансформация, строительство, исполнители работ.

### **Automated platforms for the selection of labor resources in the construction industry: comparative analysis**

**Liudmila Evgenievna Surkova**, Candidate of Technical Sciences, associate Professor, associate Professor of the Department of «Information Systems, Technologies and Automation in Construction»,

**Alexey Anatolyevich Shchegol**, second-year master's student of the Department of «Information Systems, Technologies and Automation in Construction», National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

*The article presents a comparative analysis of the most popular platforms for the selection of performers with the possibility of taking into account the specifics of the construction industry, such as HeadHunter, Superjob, Avito, Profi.ru. The following functionality of these platforms was investigated: employment, candidate search, job seeker profiles, reviews and ratings, message system, payment options. The strengths and weaknesses are highlighted, as well as the possibility of taking into account the specifics of the construction industry. The requirements for the platform for the selection of performers for the construction industry are formulated.*

Digital platform, digital transformation, construction, performers of works.

### **Введение**

Автоматизация, цифровизация и цифровая трансформация стали повседневными спутниками жизни. Цифровизация является первым шагом, заключающимся в переводе информации в цифровой формат, автоматизация – это использование технологий для автоматического выполнения задач, а цифровая трансформация – это стратегический процесс преобразования бизнеса с использованием цифровых технологий. Цифровая трансформация затрагивает все отрасли хозяйственной деятельности, охватывая более широкий спектр изменений, чем цифровизация и автоматизация. Цифровая трансформация позволяет стратегически переосмыслить бизнес-процессы, провести их реинжиниринг с использованием цифровых технологий, что приводит к появлению новых моделей деятельности. Цифровая трансформация – это глубокое преобразование продуктов и услуг, структуры организации, стратегии развития, работы с клиентами и организационной культуры.

Одной из отличительной особенностей цифровой трансформации является цифровая платформа. Цифровая платформа – это единая цифровая площадка / совокупность площадок, на базе которой происходит формирование экосистемы взаимодействующих субъектов (экономических контрагентов, сотрудников, регуляторов и т.д.), где организовано сквозное взаимодействие всех участников, сокращены количество и время выполнения операций, используются инструменты аналитики на основе исследования больших данных. Цифровые платформы могут быть различными по своей природе и целям использования: электронная коммерция, социальные сети, финансовые платформы, рынки труда и услуг и другие.

Цифровая платформа для подбора сотрудников и исполнителей работ является одной из наиболее нужных и востребованных платформ. Представляет собой онлайн-ресурс или приложение, разработанное для связи между работодателями и потенциальными сотрудниками или исполнителями работ. Она обеспечивает удобный и эффективный способ поиска, оценки и найма персонала и предлагает различные инструменты и функции как для соискателей, так и для работодателей, что упрощает процесс подбора персонала (исполнителей работ) и сокращает время и усилия, необходимые для поиска и найма сотрудников. Такие платформы обеспечивают более удобное взаимодействие между работодателями и соискателями.

На текущий момент на рынке представлено несколько таких решений. На сколько хорошо и удобно они учитывают специфику подбора сотрудников для строительной отрасли предстоит выяснить в этом исследовании.

Строительная отрасль является одним из важнейших секторов экономики, оказывая огромное влияние на создание рабочих мест, экономический рост и развитие инфраструктуры. Однако строительная отрасль также сталкивается с множеством проблем, одной из которых является сложность поиска подходящих

исполнителей, либо частных лиц для выполнения строительных работ. Во многих случаях поиск подходящего исполнителя для строительного проекта может оказаться сложной и трудоемкой задачей, особенно для частных лиц или малых предприятий, у которых может не хватить ресурсов или опыта для проведения большого количества собеседований и встреч с представителями фирм-подрядчиков.

Для решения этой проблемы разработано множество платформ, призванных помочь частным лицам и компаниям найти подходящих исполнителей для своих строительных проектов. Однако многие из этих платформ имеют ряд недостатков, таких как неадекватные фильтры поиска, плохой пользовательский опыт и отсутствие прозрачности в процессе выбора исполнителя. Поэтому существует потребность в платформе, которая могла бы эффективно находить подходящих исполнителей для частных лиц и предприятий и обеспечивать прозрачный и эффективный процесс выбора исполнителя работ для строительной отрасли, что делает данное исследование актуальным.

Объектом исследования данной работы является процесс подбора исполнителей для выполнения определенных работ строительной сферы. Предметом исследования являются автоматизированные решения для подбора исполнителей.

Цель работы – сформулировать требования к специализированной платформе по подбору исполнителей работ для строительной сферы на основе сравнительного анализа имеющихся платформ.

### **Методы и материалы**

Процесс подбора персонала является важнейшим и сложным аспектом многих отраслей, включая строительство. Он включает в себя поиск подходящих специалистов с необходимыми навыками и опытом для успешного завершения проекта. Сложность процесса усугубляется необходимостью учитывать различные факторы, такие как стоимость, качество, безопасность и своевременность. Ряд научных статей посвящен проблемам процесса подбора персонала. В них рассматриваются различные аспекты, такие как критерии, используемые в процессе отбора, стратегии принятия решений и роли заинтересованных сторон [4, 12, 14]. Данный процесс включает в себя следующие этапы, рассмотренные в научных публикациях и нормативных документах [5-8, 13]:

1. Определение требований;
2. Анализ потенциальных исполнителей;
3. Предварительная квалификация;
4. Запрос предложений;
5. Оценка предложений и выбор исполнителя.

В работе использованы методы системного и сравнительного анализа наиболее популярных платформ в России для подбора исполнителей работ. Рассмотрены следующие платформы: HeadHunter [1], Superjob [2], Avito [3], Profi.ru [11]. Исследованы следующие функциональные возможности данных платформ: размещение вакансий, поиск кандидатов, профили соискателей, отзывы и рейтинги, система сообщений, платежные возможности. Выделены сильные и сла-

бые стороны и возможность учета специфики строительной отрасли.

## Результаты

### Анализ существующих платформ по выбору исполнителей

В России существует несколько платформ для отбора частных исполнителей или подрядчиков в строительной отрасли. Далее представлен краткий анализ наиболее популярных платформ.

### HeadHunter

HeadHunter – это ведущая онлайн-платформа для поиска работы и подбора персонала в России, которая может быть использована работодателями для поиска и найма подходящих кандидатов на различные должности, включая строителей. На рисунке 1 представлена главная страница сайта hh.ru.

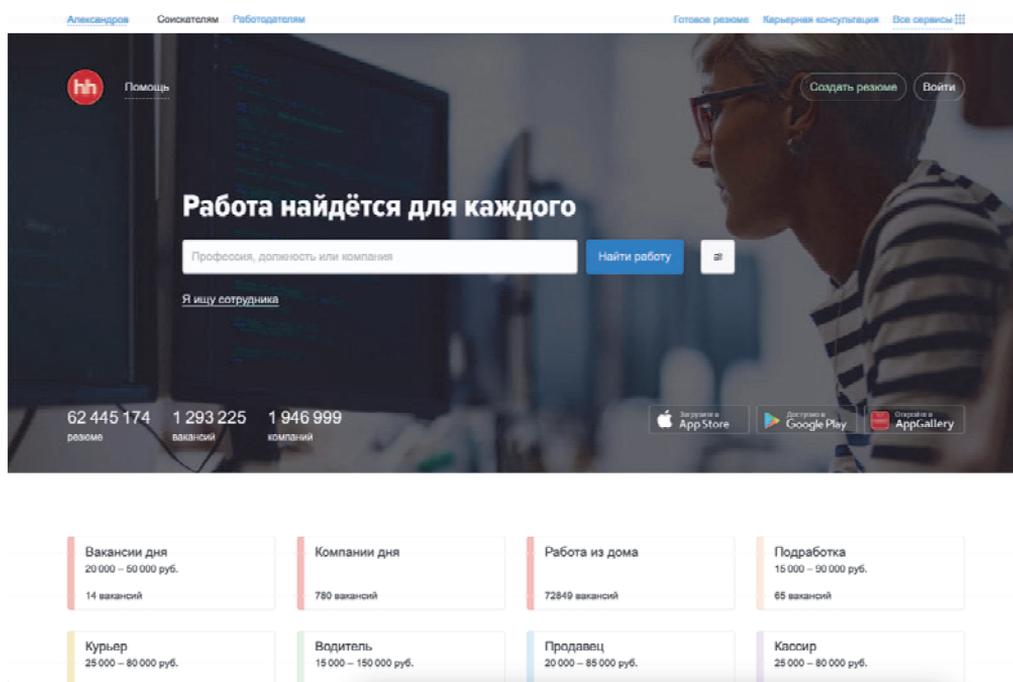


Рисунок 1 – Главная страница hh.ru

### Преимущества:

- Широкий охват: HeadHunter – это хорошо зарекомендовавшая себя платформа с большой базой пользователей, что означает, что она может обеспечить доступ к большому пулу потенциальных кандидатов для строительной отрасли;
- Расширенные возможности поиска: HeadHunter предлагает расширенные возможности поиска, включая возможность искать кандидатов на основе различных критериев, таких как местоположение, опыт, навыки, образование и ожидаемая зарплата. Это может помочь сузить круг поиска и найти наиболее подходящих строителей для конкретного проекта;

- **Подробные профили кандидатов:** HeadHunter предоставляет подробные профили кандидатов, которые могут включать информацию об опыте работы, образовании, навыках и достижениях кандидата. Это может помочь оценить соответствие кандидата конкретной роли в строительной отрасли;

- **Проверка и отбор:** HeadHunter проверяет профили кандидатов, что помогает убедиться в том, что кандидаты являются настоящими и соответствуют требуемой квалификации и опыту для данной роли;

- **Поддержка и руководство:** HeadHunter предоставляет работодателям поддержку и рекомендации на протяжении всего процесса найма, включая помощь в размещении вакансий, отборе кандидатов и проведении переговоров.

Недостатки:

- **Ограниченный региональный охват:** хотя HeadHunter охватывает широкий географический регион в России, он может не иметь полного охвата в некоторых отдаленных или сельских районах, что может ограничить круг потенциальных кандидатов на строительные вакансии в этих районах;

- **Стоимость:** Использование HeadHunter для подбора строителей может быть дорогостоящим, особенно для малых и средних компаний, поскольку платформа взимает плату за размещение вакансий и другие услуги.

В целом, HeadHunter может быть полезной платформой для подбора строителей в строительной отрасли в России, поскольку предлагает широкий спектр возможностей и преимуществ. Главным недостатком является высокая стоимость использования платформы для заказчика.

### **Superjob**

Superjob – популярная онлайн-платформа для поиска работы и подбора персонала в России, которая также может быть использована работодателями для поиска и найма подходящих кандидатов на различные должности, в том числе строителей.

На рисунке 2 представлена главная страница сайта superjob.ru.

Преимущества:

- **Большая база данных кандидатов:** Superjob имеет большую базу данных кандидатов, что означает, что он может предоставить доступ к широкому пулу потенциальных кандидатов для строительной отрасли;

- **Расширенные возможности поиска:** Superjob предлагает расширенные возможности поиска, что помогает сузить круг поиска и найти наиболее подходящих строителей для конкретного проекта;

- **Проверка и отбор:** Superjob проверяет и проверяет профили кандидатов, что помогает убедиться в том, что кандидаты являются настоящими и соответствуют требуемой квалификации и опыту для данной роли;

- **Подробные профили кандидатов:** Superjob предоставляет подробные профили кандидатов, включающие информацию об опыте работы, образовании, навыках и достижениях кандидата.

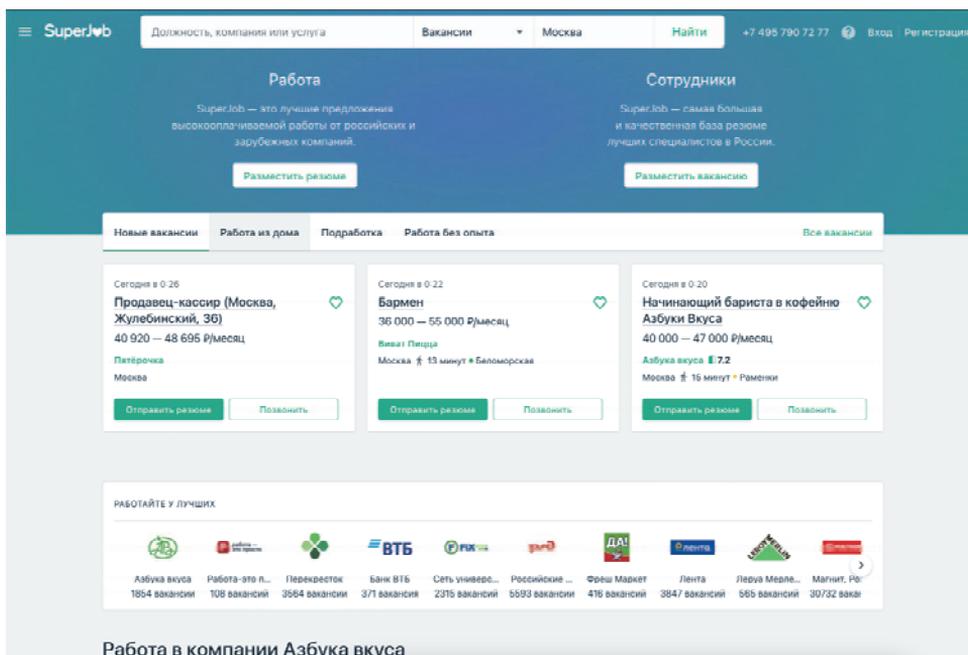


Рисунок 2 – Главная страница Superjob.ru

Недостатки:

- Ограниченные отраслевые возможности: Superjob – это общая платформа для поиска работы и подбора персонала, что означает, что у нее могут отсутствовать отраслевые функции или инструменты, адаптированные к потребностям строительной отрасли;
- Отсутствие возможности общения в режиме реального времени: Superjob не предлагает возможности общения в режиме реального времени, такие как чат или видеоконференции, что может затруднить своевременное общение с кандидатами;
- Ограниченные возможности подбора кандидатов: Superjob не предлагает расширенные возможности подбора кандидатов, которые используют искусственный интеллект или алгоритмы машинного обучения для подбора подходящих кандидатов.

В целом, Superjob может быть полезной платформой для подбора строителя в строительной отрасли в России, поскольку предлагает ряд функций и преимуществ. Однако ограниченные отраслевые функции и отсутствие интеллектуального поиска могут быть потенциальными недостатками, которые необходимо учитывать.

### Avito

Avito – популярная в России онлайн-площадка для покупки и продажи товаров и услуг, включая наем подрядчиков для строительных работ. На рисунке 3 представлена страница сайта Avito.ru, посвященная поиску сотрудников и работы.

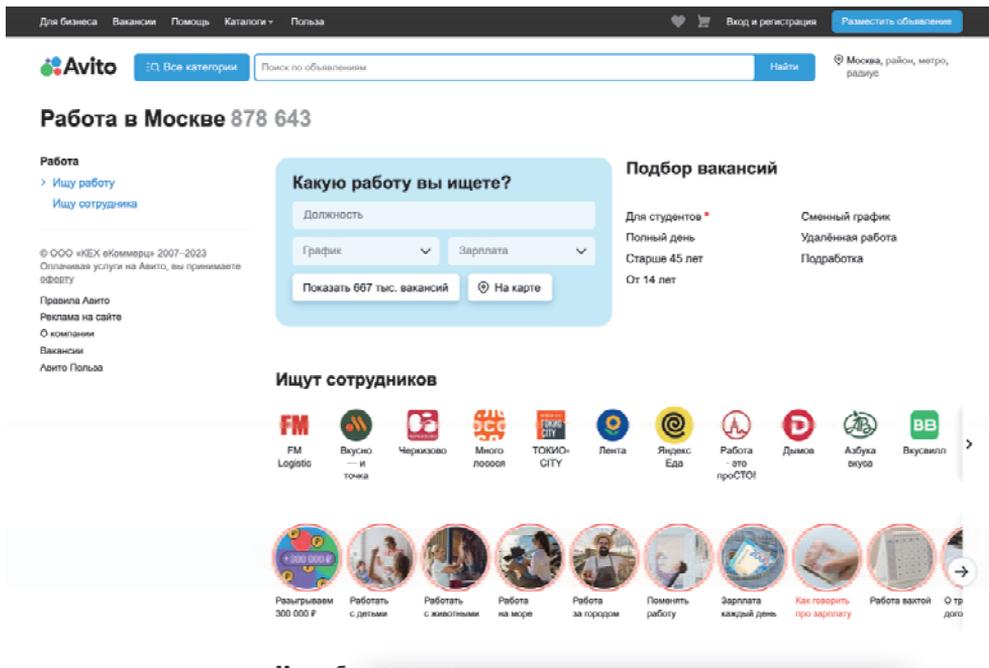


Рисунок 3 – Страница «Работа» сайта avito.ru

#### Преимущества:

- Большой пул потенциальных кандидатов: Avito располагает большим пулом потенциальных кандидатов на строительные работы, среди которых могут быть как индивидуальные подрядчики, так и небольшие строительные компании;
- Бесплатность использования: Avito бесплатен в использовании, что может быть полезно для малых и средних строительных компаний, у которых может не быть большого бюджета на подбор персонала;
- Возможность обсуждать условия: Avito предоставляет возможность напрямую обсуждать условия с кандидатами, что может помочь убедиться в том, что условия работы устраивают обе стороны;
- Региональный охват: Avito имеет обширный региональный охват в России, что может быть полезно для поиска строителей в конкретных регионах или городах.

#### Недостатки:

- Ограниченная проверка и отбор: Avito не обеспечивает всестороннюю проверку и отбор анкет кандидатов, что может увеличить риск найма некачественных или мошеннических кандидатов;
- Ограниченные возможности поиска: Avito не предлагает расширенные возможности поиска строителей, что может усложнить поиск подходящих кандидатов для конкретных строительных работ;
- Ограниченная поддержка и руководство: Avito не предлагает всесторонней поддержки и рекомендаций для работодателей, что может усложнить

процесс найма на строительные вакансии.

Avito является популярной и доступной платформой для поиска строителей для строительных проектов в России. Среди ее преимуществ – большой пул потенциальных кандидатов, возможность обсуждения условий и региональный охват. Однако у нее есть и некоторые недостатки, такие как ограниченные возможности проверки и отбора, поиска, поддержки и руководства, а также брендинга работодателя.

### **Profi.ru**

Profi.ru – платформа, направленная на поиск и предоставление услуг, охватывающих различные сферы, таких как строительство, ремонт, обучение и др. Главная страница сайта представлена на рисунке 4.

Преимущества:

- Проверенные подрядчики: Profi.ru имеет строгий процесс проверки подрядчиков, который включает в себя проверку их лицензий, рекомендаций и страховки, гарантируя, что только квалифицированные и надежные подрядчики размещены на платформе;
- Подробные профили подрядчиков: Каждый подрядчик на Profi.ru имеет подробный профиль, который включает в себя его опыт, отзывы предыдущих клиентов и портфолио его работ, что может помочь работодателям принять обоснованное решение при выборе строителя;
- Расширенные возможности поиска: Profi.ru предлагает расширенные возможности поиска, которые позволяют работодателям фильтровать подрядчиков на основе местоположения, доступности и специфических навыков, что облегчает поиск подходящего кандидата на строительную должность;
- Прозрачное ценообразование: Profi.ru предоставляет прозрачные цены на свои услуги, что может помочь работодателям составить бюджет строительного проекта и избежать непредвиденных расходов.

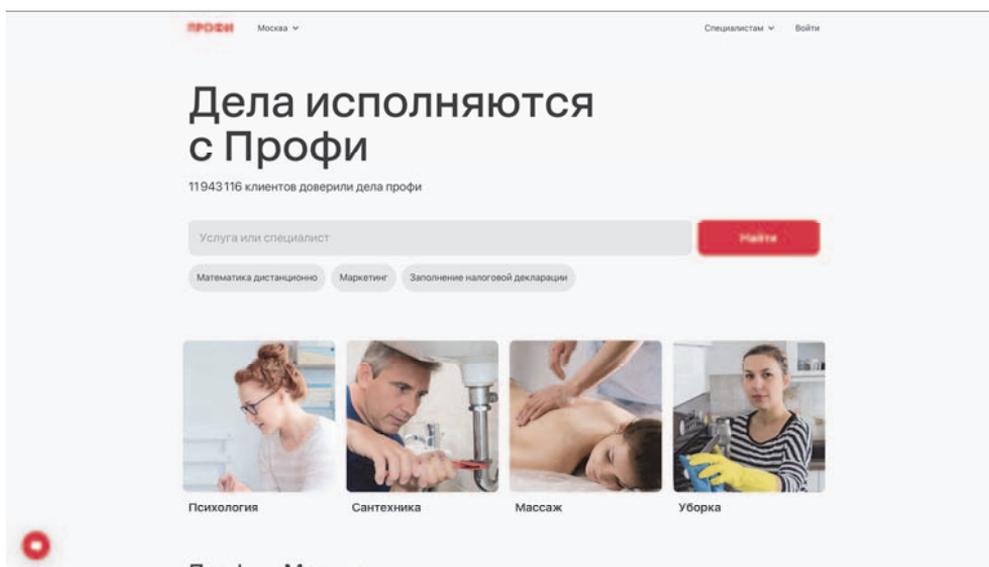


Рисунок 4 – Главная страница сайта profi.ru

Недостатки:

- Ограниченный круг подрядчиков: Profi.ru имеет относительно небольшой пул подрядчиков по сравнению с другими платформами, что может ограничить возможности работодателей, ищущих строителя;
- Более высокие затраты: Profi.ru взимает комиссию с каждой сделки, совершенной через платформу, что может сделать ее использование более дорогим по сравнению с другими платформами;
- Ограниченный региональный охват: Profi.ru имеет ограниченное покрытие в некоторых регионах России, что может затруднить поиск подходящих строителей для проектов за пределами крупных городов.

В целом, Profi.ru может быть полезной платформой для выбора подрядчика в строительной отрасли в России. Среди его преимуществ – строгий процесс проверки, подробные профили подрядчиков и расширенные возможности поиска. Однако ограниченный круг подрядчиков, более высокая стоимость и ограниченный региональный охват могут быть потенциальными недостатками, которые необходимо учитывать. Важно тщательно оценить эти плюсы и минусы, чтобы определить, является ли Profi.ru подходящей платформой найма исполнителя.

#### **Формирование требований к платформе по подбору исполнителей для строительной сферы деятельности**

С учетом проведенного анализа существующих платформ по подбору исполнителей в строительной сфере, разрабатываемое приложение, или усовершенствование уже имеющихся, должно соответствовать следующим требованиям:

- Возможность формирования списка выполняемых работ. Каждый исполнитель должен сформировать список выполняемых им работ, при этом у них должно быть четкое развернутое описание, с указанием требуемых материалов, времени работы (с учётом технологических пауз и т.д.) типа и стоимости работы [10];
- Развернутое описание контрагентов-заказчиков. Также должно включать в себя все необходимые юридические данные;
- Усовершенствованный поиск. Поиск в платформе, помимо стандартного контекстного по наименованиям и типам работ, должен поддерживать автоматизированный подбор исполнителей на основе математических методов с учётом времени выполнения, стоимости, рейтинга исполнителей и т.д.;
- Возможность прямого общения между заказчиком и исполнителем через встроенный чат;
- Встроенная система для оплаты работ [9] и механизм заключения договоров для взаимодействия физических и юридических лиц.

#### **Заключение**

Проанализированные платформы для рынка труда связывают спрос и предложение на работу или услуги, позволяют нанимателям и исполнителям находить друг друга и осуществлять сделки через онлайн-платформу. Однако специфика строительной отрасли выдвигает свои функциональные требования: бо-

лее детальное описание области строительных работ, типы работ, стоимости, времени выполнения, а также автоматизированный подбор исполнителей из базы данных соискателей, и другие сервисные возможности. На данный момент большинство платформ для подбора исполнителей работ не полностью реализовали данный функционал. Есть возможности для его улучшения, доработки и разработки.

#### *Литература*

1. HH-сервис поиска работы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://hh.ru> (дата обращения 13.05.23).
2. Superjob – поиск вакансий в Москве [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.superjob.ru> (дата обращения 14.05.23).
3. Авито: недвижимость, транспорт, работа, услуги, вещи [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.avito.ru> (дата обращения 15.05.23).
4. Баженов О.В. Обоснование выбора подрядной организации для выполнения строительно-монтажных работ доступного жилья // Экономический анализ: теория и практика. 2011. № 20(227). С. 55-58.
5. Валитова Ю.М., Трофимова Т.А. Управление рисками при выборе подрядных организаций // SAF. 2017. № 8 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-riskami-pri-vybore-podryadnyh-organizatsiy> (дата обращения 09.05.2023).
6. Галкина Е.В. Анализ надежности претендентов и их конкурсных предложений для тендеров на выполнение строительных работ // Строительство: наука и образование. 2016. № 2. С. 3-10.
7. ГОСТ Р 52806-2007 Менеджмент рисков проектов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200073589?section=text> (дата обращения 16.05.2023).
8. Кулакова Я.А. Конкурсные торги как инструмент выбора аутсорсера // Финансовая аналитика: проблемы и решения. 2011. № 45. С. 56-59 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17072179> (дата обращения 12.05.2023).
9. Маргарян Е.А., Лехмус М.Ю. Методы оплаты через Интернет // Символ науки. 2016. № 11-1 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-oplaty-cherez-internet> (дата обращения 01.06.23).
10. Приказ Министерства регионального развития РФ от 30.12.2009 N 624 (ред. от 14.11.2011) «Об утверждении Перечня видов работ по инженерным изысканиям, по подготовке проектной документации, по строительству, реконструкции, капитальному ремонту объектов капитального строительства, которые оказывают влияние на безопасность объектов капитального строительства» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/902196819> (дата обращения 16.05.2023).
11. Профи.ру – поиск специалистов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://prof.ru> (дата обращения 16.05.23).

12. Решетова А.Ю. Законодательные и научные аспекты выбора генеральных подрядных организаций для выполнения строительных работ по объектам капитального строительства // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12. № 1. С. 38-48.
13. Становой Д.С. Полнота и достаточность требований, предъявляемых к проекту организации строительства // STUDNET. 2021. Т. 4. № 2. С. 51 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44758104> (дата обращения 08.05.2023).
14. Шарипов М.И. Критерии выбора подрядной организации // Технические и математические науки. Студенческий научный форум: сборник статей по материалам XXXV студенческой международной научно-практической конференции, Москва, 14 декабря 2020 года. Том 12(35). Москва. 2020. С. 55-58.

УДК 629.7.017.1

### **Отказы космических аппаратов и их вероятные причины**

**Артем Алексеевич Брусков**, аспирант четвертого года обучения кафедры «Информационных технологий и управляющих систем»,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

*Анализ отказов систем космических аппаратов – сложная и ответственная задача, требующая тщательного учета различных факторов. Сюда входят вопросы, связанные со сбором данных, методами анализа и выявлением вероятных причин отказов.*

*В связи с этим остро стоит вопрос о создании условий для анализа отказов систем КА. Это включает в себя разработку надежных и точных методов сбора данных, а также внедрение соответствующих статистических и аналитических методов для выявления потенциальных видов отказов и их причин.*

Анализ отказов, непараметрический анализ многопараметрических отказов подсистем, сравнительный анализ надежности, многофазные отказы космических аппаратов, анализ аномалий.

### **Spacecraft failures and their probable causes**

**Artem Alekseevich Bruskov**, fourth-year postgraduate student of the Department of Information Technologies and Control Systems,  
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

*Analysis of spacecraft system failures is a complex and responsible task that requires careful consideration of various factors. This includes issues related to data collection, analysis methods and identification of probable causes of failures.*

*In this regard, the issue of creating conditions for the analysis of failures of spacecraft systems is acute. This includes the development of reliable and accurate data collection methods, as well as the introduction of appropriate statistical and analytical methods to identify potential types of failures and their causes.*

Failure analysis, nonparametric analysis of multiparametric subsystem failures, comparative reliability analysis, multiphase failures of space apparatuses, anomaly analysis.

**Введение.** Космические аппараты могут столкнуться с различными отказами, которые могут иметь разную степень тяжести. Они могут переходить из полностью работоспособного состояния в различные состояния, где системы частично деградируют или полностью отказывают. Для этого исследования был проведен сбор данных о 1584 спутниках, запущенных на низкую околоземную орбиту с января 1990 года по октябрь 2020 года, которые потерпели аварию. В данной работе для статистического анализа используется база данных, которая выделяет четыре класса аномалий и отказов для каждой подсистемы космического аппарата: три класса деградированных состояний и одно состояние полного отказа.

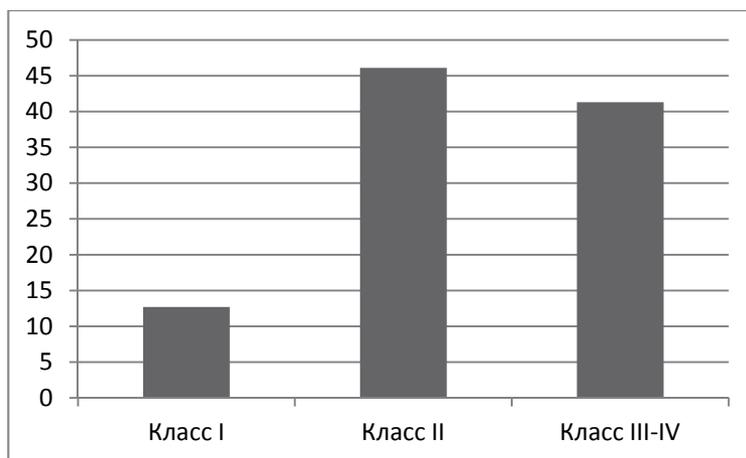
Класс I: отказ систем, который приводит к неработоспособности космических аппаратов;

Класс II: серьезные неисправности, которые невозможно устранить в процессе эксплуатации;

Класс III: серьезные неисправности, которые могут быть устранены в процессе эксплуатации;

Класс IV: незначительные или временные неисправности, которые могут быть устранены в процессе эксплуатации.

Были собраны все аномалии и отказы, их распределение по различным классам показано на рисунке 1.

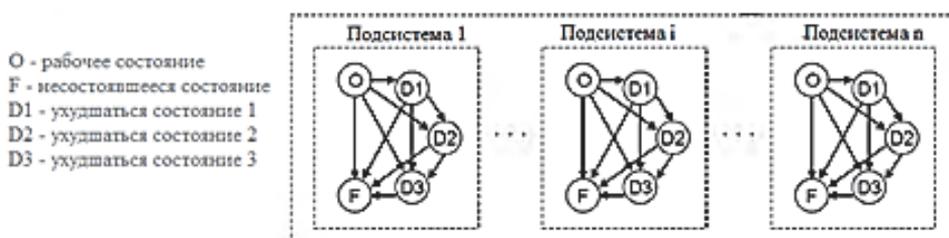


**Рисунок 1 – Распределение аномалий и отказов по степени тяжести для космических аппаратов, успешно запущенных в период с января 1990 года по октябрь 2020 года**

Анализ данных показывает, что частичные отказы различной степени тяжести являются значительной частью аномальных событий, с которыми сталкиваются космические аппараты на орбите. Изучение этих отказов может предоставить дополнительную и важную информацию для понимания поведения и склонности космических аппаратов к отказам подсистем.

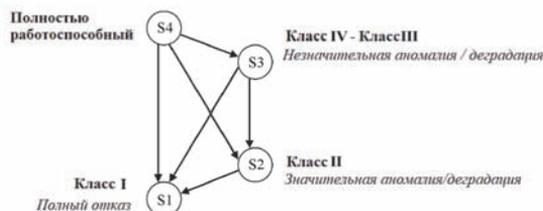
**Создание условий для анализа отказов в нескольких состояниях космического аппарата.**

Для проведения исследований отказов подсистем космических аппаратов важно выйти за рамки бинарной концепции надежности и перейти к анализу аномалий и отказов в множественных состояниях, а также к происхождению отказов различной степени серьезности, как показано на рисунке 2. Анализ отказов в нескольких состояниях вводится понятие частичных отказов, которое обеспечивает более полное понимание за счет более точного изучения поведения деградации элемента и его развития до полного отказа.



**Рисунок 2 – Прогрессия в статистическом анализе отказов космических аппаратов и подсистем космических аппаратов**

На рисунке 3 показана диаграмма состояний отказа для каждой подсистемы. Состояние 1, также известное как отказ класса I, считается поглощающим состоянием в стохастическом моделировании, поскольку оно не может быть восстановлено и из него не исходят исходящие переходы. Примечательно, что на рисунке 3 не показаны переходы от частично отказавшего состояния к более высокому функциональному состоянию, что означает отсутствие направленных дуг от  $S_i$  к  $S_{(i+1)}$  для  $i \neq 1$ . На практике переходов в этом «лечебном» направлении очень мало (3,6%), как указывает база данных.



**Рисунок 3 – Диаграмма перехода отказоустойчивости подсистем космического аппарата**

Рассмотрим следующие обозначения:

$T_{ij}$  – переход между состояниями  $i$  и  $j$  в состояние

$P_{ij}$  – условная вероятность перехода из состояния  $i$  в состояние  $j$

Диаграмма перехода для отказоустойчивости подсистемы космического

корабля показывает различные состояния, в которых может находиться подсистема, и переходы между этими состояниями. Например, переход подсистемы из полностью работоспособного состояния (S4) в серьезную аномалию (S2) обозначается как  $T_{42}$ , а вероятность перехода между этими двумя состояниями  $P_{42}$ . Расчет этих вероятностей перехода зависит от различных факторов, таких как конструкция подсистемы, операционная среда и требования миссии. В целом анализ дерева отказов и анализ видов и последствий отказов являются широко используемыми методами для оценки вероятности возникновения различных отказов и аномалий. Затем вероятности и серьезность этих отказов используются для расчета вероятностей перехода между различными состояниями подсистемы. Диаграмма перехода представляет собой ценный инструмент для анализа надежности и отказоустойчивости подсистемы и помогает в поиске причин отказов. Как вычислить эти вероятности перехода рассмотрим далее.

**Множественные отказы и анализ состояний: теоретические наработки и применения к подсистемам космических аппаратов.**

Анализ множественных отказов и состояний – это теоретическая основа, разработанная для изучения поведения сложных систем, таких как подсистемы космического корабля, при множественных отказах. Этот подход рассматривает систему как набор дискретных состояний и переходов между этими состояниями, где каждое состояние представляет различный уровень функциональности или сбоя. Переходы представляют собой вероятность перехода из одного состояния в другое из-за различных факторов, таких как деградация компонента, факторы окружающей среды или ошибка оператора.

Подход, основанный на анализе множественных отказов и состояний, позволяет всесторонне изучить влияние различных факторов на поведение системы и может использоваться для выявления критических подсистем, компонентов и условий эксплуатации. Этот подход был применен к проектированию и оценке подсистем космического корабля, включая системы питания, системы связи и двигательные установки.

В целом подход, основанный на анализе множественных отказов и состояний, обеспечивает мощную основу для изучения сложных систем, таких как подсистемы космических аппаратов, и может помочь в разработке более надежных и отказоустойчивых систем.

**Непараметрический анализ многопараметрических отказов подсистем.** Здесь данные об отказах и аномалиях из всех ранее определенных состояний используются для вычисления вероятности перехода из одного состояния в другое для всех подсистем космического аппарата. Для каждой подсистемы и каждого перехода состояния ( $ij'$ ) собираются следующие данные:

- 1) дата его прибытия в состояние  $i$ ;
- 2) дата его выхода из состояния  $i$  в состояние  $j$ , если этот переход произошел;
- 3) «лимитированное время», если переход состояния ( $ij$ ) не произошел.

При проведении анализа надежности важно уделять особое внимание ограничениям, чтобы гарантировать точность и значимость результатов. Анализ

отказов с несколькими состояниями также вносит дополнительные тонкости с точки зрения определения выборочных данных и их обработки.

В случае сбоев с несколькими состояниями набор данных по-прежнему подвергается случайной выборке в шахматном порядке, которая включает случайный выбор подмножества точек данных из разных состояний для получения репрезентативной выборки. Однако определение выборочных данных и их обработка могут быть более сложными из-за наличия множества состояний и переходов в системе.

Например, определение события отказа может различаться в зависимости от конкретного анализируемого состояния и перехода. Кроме того, при обработке данных может потребоваться учитывать вероятность различных переходов и влияние внешних факторов на систему.

В целом, анализ отказов с несколькими состояниями требует тщательного рассмотрения пределов данных и соответствующих методов определения и обработки выборочных данных, что означает следующее:

- подсистемы в выборке активируются (дата прибытия в состояние  $i$  или дата запуска для  $i = 4$ ) в разные моменты времени, но всегда время активации известны.
- даты отправления из состояния  $i$  в состояние  $j$  являются стохастическими (как и выборка).

Выборка возникает при анализе отказов подсистем космического корабля по нескольким причинам. Во-первых, космический аппарат может быть удален из выборки до того, как произойдет  $T_{ij}$ , а это означает, что для этого конкретного перехода нет доступных данных. Во-вторых, период наблюдения может закончиться до того, как подсистема испытает переход  $T_{ij}$ , что также ограничивает доступность данных.

Кроме того, при анализе сбоев в нескольких состояниях выборка происходит, когда подсистема входит в состояние  $k$ , отличное от состояния  $j$ . В этом случае выборкой для расчета  $T_{ij}$  является  $T_{ik}$ .  $sk \neq j$ . Например, при изучении  $T_{43}$ , который представляет собой переход подсистемы из полностью работоспособного состояния в состояние незначительной аномалии/деградации,  $T_{43}$  отбирается с помощью  $T_{42}$  и  $T_{41}$ , которые представляют собой переходы в состояние 2 (серьезная аномалия/деградация) и состояние 1 (общая аномалия) или отказ соответственно.

В целом выборка играет решающую роль в анализе отказов подсистем космических аппаратов и должна быть тщательно продумана для получения точных и значимых результатов.

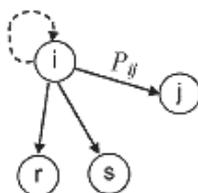
Оценка условной вероятности  $P_{ij}$  перехода из состояния  $i$  в состояние  $j$  в условиях множественных отказов при явной их выборке требует адаптации оценки Каплана-Мейера. Это необходимо для точной оценки вероятности перехода при текущем состоянии системы.

В бинарном анализе надежности элемент обычно удаляется из наблюдения до того, как произойдет отказ, но в анализе отказов с несколькими состояниями любой переход в другое состояние, отличное от интересующего, считает-

ся выбором. Это означает, что при оценке вероятности перехода из состояния  $i$  в состояние  $j$  любые переходы в состояния, отличные от  $j$ , считаются выборочными выборками.

Например, на рисунке 4 переходы из состояния  $i$  в состояние  $r$  или  $s$  (где  $r \neq j$  и  $s \neq j$ ) рассматриваются как выборочные выборки для расчета  $P_{ij}$ . Оценка Каплана-Мейера должна быть адаптирована для учета этих выборочных выборок при оценке условной вероятности возникновения перехода.

В целом, адаптация оценки Каплана-Мейера необходима для точной оценки вероятности перехода из одного состояния в другое в контексте отказов с несколькими состояниями и выборочной выборки. Это важный фактор, который следует учитывать при анализе надежности и отказоустойчивости подсистем космического корабля.



**Рисунок 4 – Переходная диаграмма  $P_{ij}$**

Оценка  $\hat{P}_{ij}$  от  $P_{ij}$  записывается в виде:

$$P_{ij}(t) = 1 - \prod_{\substack{\text{все } k \\ \text{такие, что } t_{ij,k} \leq t}} \widehat{P}_{ij,k} = \prod_{\substack{\text{все } k \\ \text{такие, что } t_{ij,k} \leq t}} \frac{n_{ij,k} - 1}{n_{ij,k}} \quad (1)$$

где:

$t_{ij,k}$  – время до  $k$ -го вылета из состояния  $i$  в состояние  $j$  (расположено в порядке возрастания)

$n_{ij,k}$  – количество единиц в состоянии  $i$  непосредственно перед  $t_{ij,k}$

$= n - [\text{количество отобранных единиц непосредственно перед } t_{ij,k}]$

$- [\text{количество единиц, перешедших в состояние } j \text{ непосредственно перед } t_{ij,k}]$ .

С исходной информацией и адаптацией оценки Каплана-Мейера можно использовать анализ множественных отказов подсистем космического корабля для анализа данных об орбитальных аномалиях и отказах космического корабля 1584 в выборке. Этот анализ может дать непараметрические оценки вероятности перехода из одного состояния в другое  $\hat{P}_{ij}$  от  $P_{ij}$  на основе наблюдаемых данных.

Используя подход анализа множественных отказов, набор данных можно разделить на дискретные состояния и переходы, что позволяет рассчитать условную вероятность перехода, происходящего с учетом текущего состояния системы. Затем оценщик Каплана-Мейера можно адаптировать для учета выборочной выборки отказов с несколькими состояниями и оценки вероятности возникнове-

ния перехода.

Применяя этот подход к данным, можно получить непараметрические оценки вероятностей переходов между различными состояниями подсистем космического корабля. Эти оценки дают ценную информацию о надежности и отказоустойчивости подсистем и могут использоваться для определения критических компонентов и условий эксплуатации.

В целом, анализ множественных отказов является мощным инструментом для анализа поведения сложных систем, таких как подсистемы космического корабля, и может предоставить ценную информацию для проектирования более надежных и отказоустойчивых систем.

### **Сколько существует непараметрических вычислений $\hat{P}_{ij}$ ?**

Комбинаторика проблемы множественных отказов подсистем космического корабля может быть сложной, поскольку она включает анализ 11 различных подсистем и четырех состояний для каждой подсистемы (плюс дополнительная неизвестная категория). Теоретически это означает, что для каждой подсистемы можно рассчитать 16 возможных вероятностей перехода ( $4^2$ ).

Анализ множественных отказов 11 подсистем и 6 возможных переходов состояний для каждой подсистемы требует вычисления 66 непараметрических вероятностей, исключая неизвестную категорию. Кроме того, для оценки 95%-го доверительного интервала требуется два непараметрических расчета для каждой вероятности перехода, что дает в общей сложности 198 непараметрических расчетов для полной характеристики отказоустойчивого поведения спутников в выборке.

На рисунке 5 представлен пример непараметрических расчетов, используемых в анализе. Он показывает шесть вероятностей перехода для подсистемы гироскоп/датчик/двигатель-маховик. Например, он показывает, что после четырех лет пребывания на орбите вероятность перехода этой подсистемы из состояния 4 в состояние 3 (незначительная аномалия) составляет примерно 4,8% с 95% доверительным интервалом между 3,5% и 6,0%. Вероятности перехода в состояния 2 (большая аномалия) и 1 (полный отказ) составляют 1,3% и 0,3% соответственно. Вероятности перехода  $P_{41}$ ,  $P_{31}$  и  $P_{21}$  обеспечивают более точное определение механизмов, ведущих к полной потере космического корабля, в отличие от традиционных анализов надежности, которые объединяют эти переходы.

В целом, анализ множественных отказов подсистем космического корабля требует значительного количества непараметрических расчетов, но может дать ценную информацию о надежности и отказоустойчивости этих систем. Это позволяет проводить более подробный анализ различных режимов отказа и переходов, а также может помочь определить критические компоненты и условия эксплуатации.

Важно отметить, что в анализируемом наборе данных могут отсутствовать несколько переходов состояний для различных подсистем. Например, для топливной системы/двигателя в наборе данных может не наблюдаться переход от незначительной аномалии (состояние 3) к полному отказу (состояние 1). В результате эти отсутствующие переходы не могут быть подвергнуты статистиче-

скому анализу.

Другие переходы также могут отсутствовать в наборе данных, что уменьшает общее количество переходов до 48, а всего требуется 144 непараметрических расчета (исключая неизвестную категорию).

Несмотря на эти отсутствующие переходы, параметрические соответствия для всех вероятностей переходов все еще могут быть определены. Это позволяет более детально проанализировать поведение подсистем космического корабля и может дать ценную информацию об их надежности и отказоустойчивости. Тем не менее, важно признать ограничения набора данных и влияние, которое отсутствующие данные могут оказать на анализ.

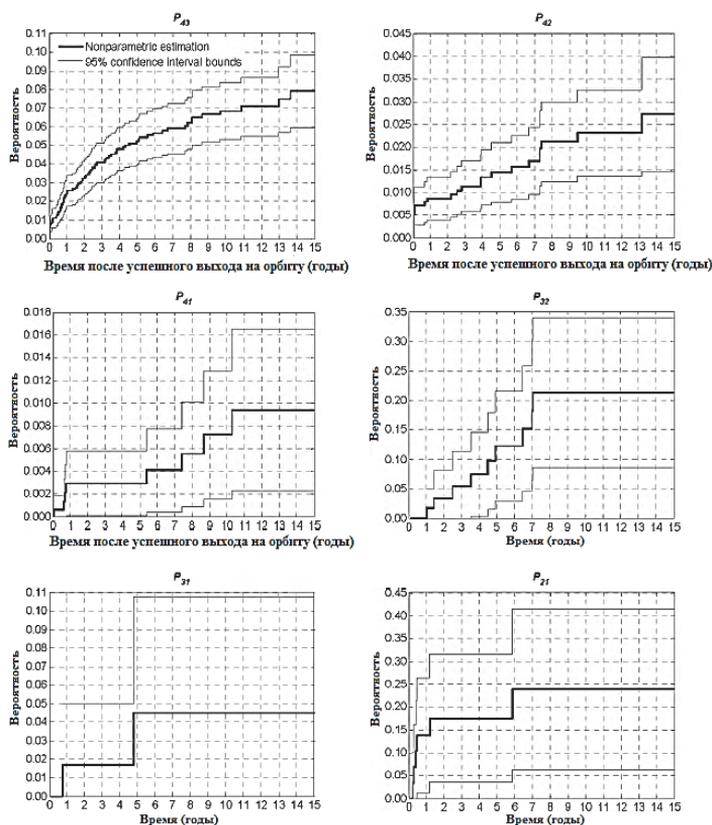


Рисунок 5 – Вероятности перехода для гироскопа

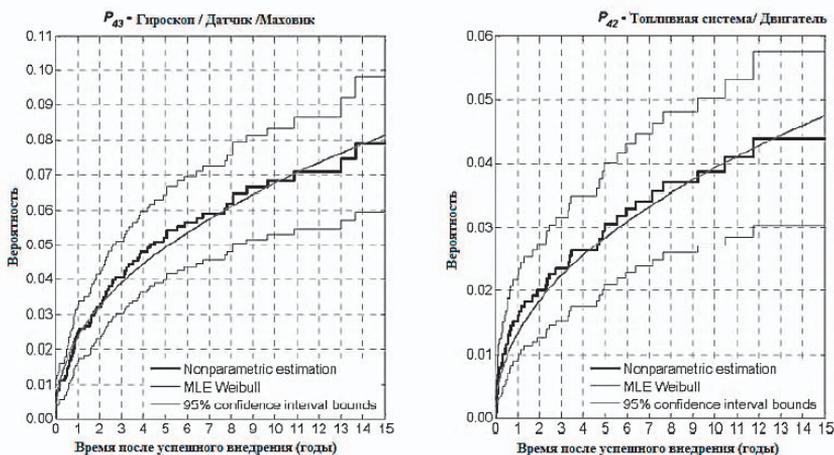
**Параметрические модели Вейбулла.** Поскольку интерес здесь представляет совокупная вероятность отказа (переход в деградированное состояние), параметры формы и масштаба ниже рассчитываются с помощью процедуры оценки правдоподобия:

$$P_{ij}(t) = 1 - \exp \left[ -\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta \right] \quad (2)$$

На рисунке 6 показано визуальное представление непараметрических кривых для  $\hat{P}_{43}$  подсистемы гироскопа и  $\hat{P}_{42}$  топливной системы/двигателя вместе с их соответствующим смещением Вейбулла (с доверительным интервалом 95%). На рисунке показано, что распределения Вейбулла, хорошо подходят для этих двух подсистем, поскольку непараметрические кривые хорошо согласуются с соответствующим смещением Вейбулла.

Аналогичные результаты были получены для вероятностей перехода других подсистем космического корабля с использованием параметров Вейбулла. Это говорит о том, что распределение Вейбулла является подходящей моделью для описания отказного поведения этих подсистем.

В целом, рисунок 6 наглядно подтверждает пригодность распределения Вейбулла для моделирования отказов подсистем космического корабля. Используя соответствующие статистические методы и модели, можно получить ценную информацию о надежности и отказоустойчивости этих систем, а также определить потенциальные причины сбоев, которые могут помочь в будущих усилиях по проектированию и разработке.



**Рисунок 6 – Примеры непараметрических вероятностей перехода и смещения Вейбулла**

Проверка параметрических моделей, используемых при анализе многоуровневых отказов подсистем космических аппаратов, имеет решающее значение для обеспечения того, чтобы эти модели были правильно построены и точно отражали данные на орбите. Учитывая относительную сложность этих моделей подсистем, важно разработать соответствующие тесты для проверки их достоверности и надежности.

Процесс валидации обычно включает сравнение прогнозируемых частот и вероятностей отказов, созданных параметрическими моделями, с фактическими частотами и вероятностями отказов, наблюдаемыми на орбите. Обычно это включает в себя статистические тесты и моделирование для оценки точности и

надежности моделей.

Вывод из процесса валидации состоит в том, что параметрические модели, используемые в анализе многоуровневых отказов подсистем космического корабля, являются адекватными и исчерпывающими. Это говорит о том, что эти модели обеспечивают надежное и точное представление отказного поведения этих подсистем и могут использоваться для направления дальнейших исследований и разработок.

В целом проверка параметрических моделей является важным шагом в анализе отказов подсистем космических аппаратов, поскольку она обеспечивает точность, надежность и информативность моделей. Используя соответствующие модели и методы проверки, можно получить ценную информацию о надежности и отказоустойчивости этих систем и разработать в будущем более надежные и отказоустойчивые конструкции космических аппаратов.

#### **Обсуждение неопределенности и разброса доверительных интервалов.**

При анализе надежности или множественном анализе подсистем космического корабля неопределенность, возникающая в результате выбора данных или отсутствия полного набора данных, определяется доверительными интервалами. Оценщик Каплана-Мейера обеспечивает оценку максимального правдоподобия, но не сообщает о дисперсии вокруг этой оценки. Следовательно, должны быть построены доверительные интервалы, чтобы представить неопределенность, связанную с наилучшей оценкой, и их анализ дает интересные наблюдения.

Разброс доверительных интервалов увеличивается со временем, как показано на рисунке 5 для вероятностей перехода между состояниями для подсистемы гироскопа. Это результат того, что размер выборки со временем уменьшается по мере того, как все больше космических аппаратов выходит из строя или удаляется из выборки. Однако разброс доверительных интервалов остается небольшим, что указывает на точность результатов надежности и множественных отказов.

В случае множественного анализа вероятность перехода между полностью работоспособным состоянием и состоянием незначительной аномалии для гироскопической системы рассеивается в интервале 1,6% пункта после 1 года на орбите, а в интервале 3,9% после 15 лет на орбите. Это подчеркивает важность учета влияния размера выборки на точность результатов.

В целом, использование доверительных интервалов в анализе надежности и множественном анализе подсистем космического корабля имеет решающее значение для понимания неопределенности, связанной с данными, и надежности результатов. Используя соответствующие статистические методы и модели, можно получить ценную информацию о производительности и надежности этих систем, а также предоставить информацию для будущих усилий по проектированию и разработке.

Еще одно наблюдение о неопределенности в многопозиционном анализе можно увидеть на рисунке 5: в случае системы гироскопа разброс доверительных

интервалов больше для  $P_{32}$ ,  $P_{31}$  и  $P_{21}$ , чем для любых вероятностей перехода из полностью рабочего состояния S4 ( $P_{43}$ ,  $P_{42}$  и  $P_{41}$ ). Например, максимальное распространение доверительного интервала составляет около 11 процентных пунктов для  $P_{31}$ , в то время как максимальное распространение для  $P_{42}$  составляет около 2,5 процентных пунктов. Это является прямым следствием разницы в размере выборки для получения вероятностей перехода: для переходов из S4 выборка состоит из всех 1584 космических аппаратов в выборке, в то время как выборка для переходов из S3 и S2 сводятся к тем космическим аппаратам среди 1584 космических аппаратов, которые эффективно перешли в эти состояния после исходной выборки. В случае гироскопа 62 космических аппарата перешли в состояние малой деградации (S3), а 30-в состояние большой деградации (S2). Аналогичная тенденция наблюдается и для всех рассматриваемых в данной работе систем космических аппаратов. Влияние этой неопределенности на вероятности пребывания в деградированных состояниях уменьшается из-за малого числа космических аппаратов, которые подвергаются этим переходам. Уменьшение неопределенности (уменьшение разброса доверительных интервалов) может быть достигнуто путем сбора более точных и полных данных о деградации и отказе подсистем космических аппаратов для этих состояний с улучшенным мониторингом состояния работоспособности космических аппаратов или проведением ускоренных испытаний жизненного цикла.

Результаты многократного и последующего моделирования при анализе отказов подсистем космических аппаратов ограничиваются наилучшими оценками вероятностей перехода. Однако распространение неопределенности, связанной с этими вероятностями, на окончательные результаты может предоставить дополнительную информацию о деградации и отказах различных рассматриваемых космических систем и может стать плодотворным путем для будущих улучшений.

Принимая во внимание неопределенность, связанную с предполагаемыми вероятностями перехода, можно лучше понять надежность и отказоустойчивость подсистем космического корабля. Это может дать информацию для будущих усилий по проектированию и разработке, а также помочь повысить безопасность и эффективность освоения космоса и научных исследований.

Кроме того, изучение различных источников неопределенности, таких как изменения условий эксплуатации или факторов окружающей среды, также может дать ценную информацию о характере отказов подсистем космического корабля. Рассмотрев ряд возможных сценариев и связанных с ними неопределенностей, можно разработать более надежные и устойчивые системы, способные лучше противостоять проблемам освоения космоса.

В целом, расширение неопределенности, связанной с расчетными вероятностями перехода, на окончательные результаты анализа отказов подсистем космического корабля может предоставить ценную информацию и идеи для повышения надежности и безопасности этих систем. Будущие исследования в этой области могут значительно улучшить наше понимание сложной космической техники.

### Сравнительный анализ надежности и многофазные отказы космических аппаратов.

В данной статье представлены полные результаты множественных отказов, полученные в результате моделирования для конкретной подсистемы космического корабля: топливной системы и двигателя. Эта подсистема была выбрана потому, что анализ отказов с несколькими состояниями дает ключевую информацию, которую невозможно получить с помощью традиционного анализа надежности двоичных файлов.

Как известно, топливная система и двигатель являются основной причиной отказов космических аппаратов, особенно в первые годы их эксплуатации. Например, в первый год пребывания на орбите 20% всех отказов космических аппаратов происходит из-за двигателей и топливных систем, а за первые 10 лет пребывания на орбите 13% всех отказов космических аппаратов происходят из-за этих же систем.

На рисунке 7 слева показана кривая надежности и вероятность нахождения в состоянии 4, которое представляет собой вероятность полной работоспособности топливной системы и двигателя. Кривая надежности, или функция выживания, представляет собой вероятность того, что подсистема не находится в состоянии отказа 1. В правой части рисунка 7 показаны различные вероятности пребывания в состоянии отказа от состояния 1 до состояния 3.

Анализ множественных отказов топливной системы и двигателя дает важную информацию о поведении и ухудшении состояния этой подсистемы. По выявлению вероятностей отказа.

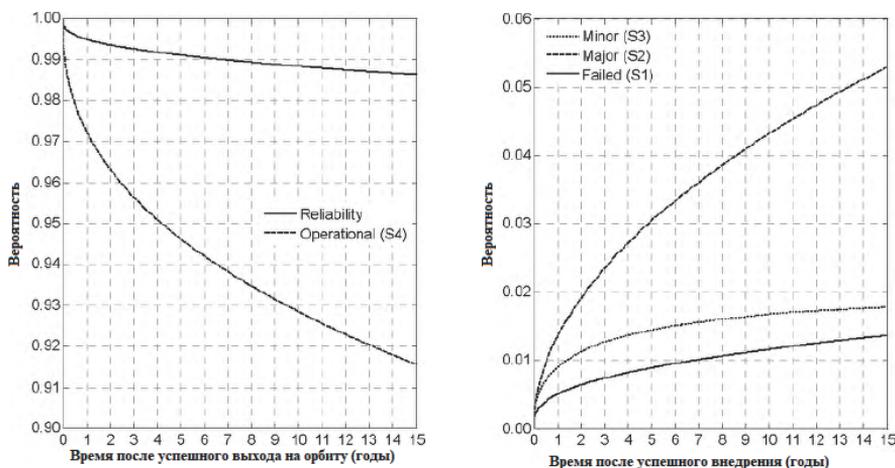


Рисунок 7 – (слева) Надежность и вероятность полной работоспособности и (справа) вероятности ухудшения состояния систем двигателя / топлива

Рисунок 7 иллюстрирует важное различие, которое делается в анализе отказов с несколькими состояниями, которое не может быть зафиксировано традиционным бинарным анализом надежности. На рисунке показаны две кривые, од-

на из которых представляет надежность подсистемы (верхняя кривая), а другая представляет вероятность пребывания подсистемы в разных состояниях (нижняя кривая).

Верхняя кривая на рисунке 7 показывает, что надежность подсистемы через 15 лет составляет 98,5%, что означает, что вероятность работоспособности (не поломки) подсистемы составляет 98,5%. Однако нижняя кривая на рисунке 7 показывает, что через 15 лет подсистема будет полностью работоспособна только на 91,5%. Эта разница в вероятностях между полностью работоспособным состоянием и состоянием частичного отказа связана с частичными отказами, которые вводятся и исследуются при анализе отказов с несколькими состояниями.

Кривая отказов в правой части рисунка 7 является дополнением надежности подсистемы, а это означает, что она представляет вероятность того, что подсистема будет находиться в состоянии отказа, а не в полностью рабочем состоянии. Это различие между частичными отказами и полными рабочими состояниями является важным аспектом анализа множественных отказов и дает ценную информацию о поведении и деградации подсистем космического корабля.

В целом, на рисунке 7 показаны ограничения традиционного бинарного анализа надежности и показаны преимущества анализа отказов с несколькими состояниями в обеспечении более детального понимания надежности и отказоустойчивости подсистем космического корабля. Наиболее интересной особенностью анализа множественных отказов этой подсистемы является динамика деградированных состояний и особенно вероятность нахождения в основном аномальном состоянии (S2). Вероятность нахождения в состоянии малой аномалии невелика (менее 2%), тогда как вероятность нахождения в состоянии большой аномалии значительно выше, непрерывно увеличиваясь с годами и в конечном итоге достигая примерно 5% через 15 лет. Быстрое увеличение вероятности перехода в состояние 3 (крупная аномалия) в первые годы можно назвать «тяжелой деградацией» двигателя/топливной системы, как множественный аналог концепции младенческой смертности в традиционном анализе надежности.

Анализ многоуровневых отказов двигателя/топливной системы показывает, что, когда эта подсистема частично выходит из строя, она, вероятно, переходит в серьезное ненормальное/ухудшенное состояние (S2). Этот вывод согласуется с предыдущими исследованиями, которые определили двигатель/топливную систему как одного из главных виновников отказов космических аппаратов.

Анализ также показывает, что функциональность этой подсистемы на орбите значительно ухудшается, что подчеркивает важность повышения надежности и отказоустойчивости этой подсистемы. Это дает ценные рекомендации производителям космических аппаратов и поставщикам оборудования, чтобы сосредоточить свои усилия на улучшении двигателя/топливной системы и других подсистем, которые либо склонны к отказу, либо очень подвержены серьезным повреждениям.

В целом, результаты анализа отказов с несколькими состояниями могут быть использованы при проектировании и разработке космических аппаратов, а также при техническом обслуживании и ремонте. Выявляя критические подсистемы

темы и виды отказов, этот анализ может способствовать разработке более надежных и отказоустойчивых систем космического корабля.

**Выводы.**

Таким образом, в этой статье представлен всесторонний анализ отказов подсистем космического корабля в нескольких состояниях. Применяя анализ отказов с несколькими состояниями, исследование может дать представление о поведении и деградации этих подсистем, включая частичные отказы или ухудшенные состояния.

В статье представлена формальная теоретическая основа для проведения анализа отказов в нескольких состояниях, позволяющая более детально понять характеристики отказов этих подсистем. Результаты показывают, что полученные модели адекватно отражают отказное поведение этих подсистем в различных состояниях.

В заключение, анализ множественных отказов дает ценную информацию о надежности и отказоустойчивости подсистем космического корабля и может использоваться для направления технических усилий по улучшению производительности этих систем в будущем.

*Литература*

1. Брусков А.А. Взаимозависимые многоуровневые космические сети: формальная характеристика // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы модели, анализ и управление / Complex system: models, analysis, management». 2021. № 3. С. 79-90.
2. Брусков А.А. Оценивание надежности спутника в зависимости от типа орбиты // ЭКОНОМИКА ИНФОРМАТИКА. 2021. Том 48. № 3. С. 152-164.
3. Севастьянов Н.Н., Андреев А.И. Основы управления надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации: учебное пособие: Томск: ТГУ, 2015. 266 с.
4. Тюгашев А.А. Подход к обеспечению отказоустойчивости космических аппаратов на основе автоматизации проектирования интеллектуальных бортовых программных средств // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 2(14). С. 9-16.
5. Мещерякова А.А., Глухов Д.А. Диагностика и надежность автоматизированных систем: Учебное пособие. Воронеж: ВГЛУ им. Г.Ф. Морозова, 2016. 124 с.

УДК 629.7

**Анализ статистических структур контроля технических параметров и надежности для оптимизации планов выборочного контроля космической техники в условиях мелкосерийного производства**

**Марат Шамильевич Насибулин**, кандидат технических наук, руководитель филиала АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», директор «НИИ КС им. А.А. Максимова», г. Королев, Московская область,

**Валерий Борисович Рудаков**, доктор технических наук, профессор, АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», г. Королев, Московская область

*Проводится анализ статистических структур приемочного контроля сложных систем космической техники (КТ) в условиях производства с точки зрения теории принятия решений. Впервые установлено полное соответствие статистических структур контроля технических параметров и контроля надежности систем КТ, но со своими характеристиками. Обосновываются целевые функции, минимизация которых приводит к определению оптимальных планов контроля, обеспечивающих выполнение заданных требований к техническим параметрам и надежности систем при минимуме экономических затрат на контроль и потерь, связанных с принятием ошибочных решений*

Контроль, надежность, оптимизация, планирование, потери, риски 1 и 2 рода, техническая документация, технические параметры, требования, экономические затраты.

**Analysis of statistical structures of control of technical parameters and reliability for optimization of plans of selective control of space technology in conditions of small-scale production**

**Marat Shamilevich Nasibulin**, Candidate of Technical Sciences, Head of the branch of Khrunichev State Scientific Research Center – Director of A.A. Maksimov Research Institute of Space Systems, Korolev, Moscow region,

**Valery Borisovich Rudakov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, branch of JSC «GKNPTs im. M.V. Khrunichev», Korolev, Moscow region

*The analysis of statistical structures of acceptance control of complex systems of space technology in production conditions from the point of view of the theory of decision-making is carried out. For the first time, full compliance of statistical structures for monitoring technical parameters and monitoring the reliability systems of space technology, but with their own characteristics, has been established. Objective functions are justified, the minimization of which leads to the definition of optimal con-*

*trol plans that ensure the fulfillment of specified requirements for technical parameters and reliability of systems with a minimum of economic costs for control and losses associated with making erroneous decisions.*

Control, reliability, optimization, planning, losses, risks of the first and second kind, technical documentation, technical parameters, requirements, economic costs.

Современное состояние космической техники и перспективы ее развития характеризуются тем, что происходит постоянное усложнение конструкции систем КТ, что связано с развитием и внедрением в производство новых технологий и возрастанием спектра задач, выполняемых в космосе. Это приводит к постоянному повышению требований к техническим параметрам систем и повышению требований к их надежности, что, в свою очередь, влечет за собой постоянное увеличение экономических затрат на контроль выполнения этих требований и экономических потерь, связанных с принятием неправильных решений по результатам контроля.

Этап производства таких систем КТ является важным этапом. Главная задача этого этапа [1] состоит в том, чтобы обеспечить полное соответствие технических характеристик изготавливаемых изделий и систем всем требованиям технической документации. Окончательно система будет удовлетворять всем требованиям, если каждая ее деталь, каждая сборочная единица, изготовленные на предприятиях, строго соответствует установленным требованиям. Поэтому важное место в обеспечении требований, предъявляемым к изделиям КТ, принадлежит контролю выполнения заданных требований.

Как правило, контроль на предприятиях-изготовителях осуществляют подразделения технического контроля. Этот контроль осуществляется следующим образом [1].

На сборочное предприятие-изготовитель конкретной системы поступают материалы, партии одинаковых деталей, партии комплектующих элементов, а также совокупности разных изделий от предприятий-смежников, необходимых для изготовления системы. На начальном этапе проводится входной приемочный контроль этих технических объектов. То есть, от каждой партии на контроль отбирается выборка соответствующих элементов или определенная номенклатура изделий из совокупности. В каждом элементе или изделии контролируются наиболее важные технические параметры. Допуски на каждый параметр и их номинальные значения заданы в технической документации. К числу таких параметров относятся, например, геометрические размеры, величины электрического напряжения, обратные токи и так далее. При этом входной выборочный контроль технических параметров осуществляется с помощью технических средств измерения, таких как: калибры, измерительные инструменты, автоматизированные средства контроля, в том числе электронные средства (3d-контроль) и т.д.

Далее посредством выполнения различных технологических операций пайки, сварки, сверления, сборки и т.д. в соответствии с технологией производства изготавливается готовая система.

После изготовления системы проводится контроль ее технических параметров, допуски на каждый параметр и их номинальные значения также заданы в технической документации. Затем система проходит испытания для контроля выполнения требований к ее надежности. Количественные значения этих требований определены заказчиком и также содержатся в технических документах.

Системы космической техники относятся к классу систем, которые обладают высокой сложностью в конструктивном отношении, высокой стоимостью, являются уникальными с точки зрения выполняемых задач, состоят из множества элементов и изделий, которые изготавливаются малыми партиями или в единичных экземплярах. Производство таких систем является мелкосерийным, а производство систем КТ, которые изготавливаются по коммерческим заказам, вообще не имеют серийности, то есть является единичным. К таким системам предъявляются высокие требования в части их технических параметров. Это вызывает необходимость использования при контроле статистических планов [2, 3] вида  $(n, \alpha, \beta, c=0)$  с приемочным числом (контрольный норматив)  $c = 0$ , которое не допускает ни одного отклонения технических параметров от заданных допусков. Здесь характеристиками плана контроля являются:  $n$  – объем контроля;  $\alpha$  – безусловная вероятность ошибки 1 рода (забраковать годный параметр, который находится в пределах заданного допуска);  $\beta$  – принять дефектный параметр (вышедший за пределы заданного допуска). Риски 1 и 2 рода  $\alpha$  и  $\beta$  характеризуют вероятности принятия ошибочных решений при контроле технических параметров и обусловлены длительностью работы изделия, длительностью измерения параметра, погрешностью технических средств контроля и других факторов.

В дальнейшем будем использовать, где это необходимо, термин «изделие КТ», под которым будем понимать любой иерархический уровень системы КТ, то есть входящие в нее подсистемы или элементы, которые подлежат изготовлению или изготовлены на промышленном предприятии как предмет или продукт производства.

Как показал проведенный анализ, при входном выборочном контроле технических параметров изделий КТ различных иерархических уровней наблюдается следующая взаимосвязанная иерархия вероятностных ошибок или рисков 1 и 2 рода: риски при контроле каждого технического параметра, риски при контроле определенной номенклатуры параметров конкретного изделия КТ, которые относятся уже к изделию в целом, а также риски 1 и 2 рода, относящиеся к партии одинаковых изделий или совокупности разных изделий. Реализация тех или иных значений этих рисков при входном контроле связана с принятием ошибочных решений, которые влекут за собой определенные потери. То есть, интуитивно ясно, что, изменяя номенклатуру контролируемых параметров изделия, объем контролируемой выборки изделий от партии или номенклатуру контролируемых изделий из совокупности, можно влиять на последствия принимаемых решений и уменьшать, соответственно, потери и затраты на контроль.

Проведенный анализ показал, что использование традиционных методов статистического контроля не позволяет учесть эти взаимосвязи рисков в условиях производства и последствия принятия ошибочных решений на каждом иерар-

хическом уровне, которые являются следствием возникающих рисков. Кроме того, традиционные методы ориентированы на значительные объемы статистических данных, которые в практике мелкосерийного производства КТ, как правило, отсутствуют, а для учета экономических факторов контроля эти методы используют различные целевые функции, что не позволяет получить однозначного решения.

Проведем анализ статистических структур контроля сложных систем космической техники (КТ) в условиях производства с точки зрения теории принятия решений. Результатом этого анализа является обоснование целевых функций, использование которых позволяет учесть взаимосвязанную иерархию рисков, о которой говорилось выше. Эти целевые функции проистекают из самой статистической структуры контроля, а их минимизация приводит к определению оптимальных планов контроля, которые обеспечивают выполнение заданных требований к техническим параметрам при минимуме экономических затрат на контроль и потерь, связанных с принятием ошибочных решений. При этом сначала рассмотрим контроль технических параметров изделий КТ, а затем контроль их надежности в условиях мелкосерийного производства.

Рассмотрим статистическую структуру контроля технических параметров изделия КТ при входном выборочном контроле.

Предположим, что показатель работоспособности конкретного изделия полностью определяется совокупностью  $N_p$  независимых между собой параметров (физических или определяющих)  $\{x_j\}$ ,  $j=1, \dots, N_p$ .

Пусть на каждый параметр изделия в технической документации задан допуск (двухсторонний или односторонний). Реально, как правило, контроль параметров проводится следующим образом: по результатам контроля определяется, находится ли каждый параметр в допуске или он вышел за пределы заданного допуска. Будем рассматривать момент  $t_k$  окончания контроля (сечение процесса контроля).

Определим некоторые понятия. Условимся под годным понимать параметр, находящийся в пределах заданного допуска, под дефектным – параметр, вышедший за пределы допуска. Сначала предположим, что проводится контроль каждого параметра изделия. Далее будет рассмотрен более общий случай контроля некоторой номенклатуры параметров из общей совокупности  $N_p$ .

По результатам контроля принимаются определенные решения. Поскольку контроль параметров изделия не является абсолютно достоверным, решения могут быть правильными и ошибочными. Поэтому систему контроля можно охарактеризовать следующими показателями:

- потерями вследствие ошибочных решений;
- затратами на контроль.

Чтобы оценить потери вследствие ошибочных решений, рассмотрим статистическую структуру контроля.

Введем следующие возможные события в отношении каждого  $j$ -го параметра:

- $A_j$  – событие, состоящее в том, что  $j$ -ый параметр изделия годный (нахо-

дится в пределах заданного допуска);

$\bar{A}_j$  – событие, состоящее в том, что  $j$ -ый параметр изделия дефектный (противоположное событие);

$V_j$  – событие, состоящее в том, что по результатам контроля  $j$ -ый параметр будет признан годным;

$\bar{B}_j$  – событие, состоящее в том, что по результатам контроля  $j$ -ый параметр будет признан дефектным.

События  $A_j$  и  $\bar{A}_j$ , а также события  $V_j$  и  $\bar{B}_j$  образуют полную группу, поэтому сумма вероятностей наступления этих событий равна:

$$P(A_j) + P(\bar{A}_j) = 1, \quad (1)$$

$$P(V_j) + P(\bar{B}_j) = 1. \quad (2)$$

События  $A_j$  и  $\bar{A}_j$  могут произойти совместно с событиями  $V_j$  и  $\bar{B}_j$ . Запишем эти сложные события через простые.

$A_j V_j$  – событие, состоящее в том, что  $j$ -ый параметр изделия годный (находится в пределах заданного допуска) и по результатам контроля будет признан годным (эквивалентно решению принять параметр по результатам контроля);

$A_j \bar{B}_j$  – событие, состоящее в том, что  $j$ -ый параметр изделия годный и по результатам контроля будет признан дефектным (эквивалентно решению забраковать параметр по результатам контроля);

$\bar{A}_j V_j$  – событие, состоящее в том, что  $j$ -ый параметр изделия дефектный и по результатам контроля будет признан годным (эквивалентно решению принять параметр по результатам контроля);

$\bar{A}_j \bar{B}_j$  – событие, состоящее в том, что  $j$ -ый параметр изделия дефектный и по результатам контроля будет признан дефектным (эквивалентно решению забраковать параметр по результатам контроля);

Эти четыре сложных события также образуют полную группу, поэтому сумма вероятностей наступления этих событий равна:

$$P(A_j V_j) + P(A_j \bar{B}_j) + P(\bar{A}_j V_j) + P(\bar{A}_j \bar{B}_j) = 1. \quad (3)$$

Система контроля параметров изделия с помощью технических средств контроля основана на проверке гипотезы о том, что  $j$ -ый параметр изделия является годным (событие  $A_j$ ) против альтернативы, что  $j$ -ый параметр изделия дефектный (событие  $\bar{A}_j$ ). Решающее правило, на основе которого принимается та или другая гипотеза основано на результатах контроля (события  $V_j$  и  $\bar{B}_j$ ). Поскольку контроль не является абсолютно достоверным (зависит от длительности работы изделия, длительности измерения параметра, погрешности технических средств контроля и других факторов), на практике истинное значение  $j$ -ого пара-

метра неизвестно, а известно лишь значение его оценки, полученное по результатам контроля. Поэтому в силу случайности оценки, наряду с правильными решениями при контроле, неизбежны и ошибочные.

Ошибка 1 рода возникает в случае, когда наступает событие  $A_j \bar{B}_j$ , состоящее в том, что  $j$ -ый параметр изделия годный и по результатам контроля будет признан дефектным.

Ошибка 2 рода возникает в случае, когда наступает событие  $\bar{A}_j B_j$ , состоящее в том, что  $j$ -ый параметр изделия дефектный и по результатам контроля будет признан годным.

Вероятности наступления этих событий называются рисками 1 и 2 рода  $\alpha_j$  и  $\beta_j$ , возникающими при контроле  $j$ -го параметра изделия, которые являются важнейшими показателями эффективности контроля. Таким образом, с использованием формулы полной вероятности [4, 5], риски 1 и 2 рода определяются следующим образом:

$$\alpha_{Пj} = P(A_j \bar{B}_j) = P(A_j)P(\bar{B}_j / A_j), \quad (4)$$

$$\beta_{Пj} = P(\bar{A}_j B_j) = P(\bar{A}_j)P(B_j / \bar{A}_j) \quad (5).$$

Риски (4) и (5) являются безусловными вероятностями соответствующих событий. Следует особо отметить их важное свойство. Если  $j$ -ый параметр изделия не контролируется, то есть параметр принимается без контроля, или параметр уже принят, то с рисками (4) и (5) происходит следующее:

1\*. Риск 1 рода  $\alpha_{Пj}$ , выражение (4), становится равным нулю.

То есть, при отсутствии контроля условная вероятность забраковать  $j$ -ый параметр изделия, т.е. составляющая  $P(\bar{B}_j / A_j) = 0$ .

2\*. Риск 2 рода  $\beta_{Пj}$ , выражение (5), совпадает с вероятностью того, что  $j$ -ый параметр является дефектным  $\beta_{Пj} = P(\bar{A}_j)$  (не находится в пределах заданного допуска). Это объясняется тем, что поскольку  $j$ -ый параметр изделия не контролируется, то составляющая  $P(B_j / \bar{A}_j)$ , входящая в выражение (5), равна единице, то есть условная вероятность принять  $j$ -ый параметр равна единице.

Наряду с введенными понятиями рисков 1 и 2 рода (4) и (5), которые являются безусловными вероятностями соответствующих событий, важными показателями контроля, которые широко используются в практике, являются также условные или метрологические риски 1 и 2 рода [6]. Они определяются формулами:

$$\alpha_{Уj} = P(\bar{B}_j / A_j), \quad (6)$$

$$\beta_{Уj} = P(B_j / \bar{A}_j), \quad (7)$$

где  $\alpha_{Уj}$  – вероятность того, что предъявленный на контроль  $j$ -й параметр изделия будет признан дефектным (забракован), в то время как (при условии, что), он является годным;

$\beta_{Uj}$  – вероятность того, что предъявленный на контроль  $j$ -й параметр изделия будет признан годным (будет принят), в то время как (при условии, что), он является дефектным.

Поскольку все необходимые понятия по отношению к параметрам изделия определены, перейдем теперь к рассмотрению изделия в целом.

Усложним исходную задачу. Рассмотрим наиболее общий случай альтернативного контроля, некоторой неизвестной номенклатуры  $x_p \leq N_p$  наиболее важных параметров сложного изделия из общей совокупности  $N_p$  параметров, определенных документацией. Как будет показано ниже, случай  $x_p = N_p$ , является частным случаем.

Годным будем считать изделие, у которого годны (находятся в пределах заданных допусков) все параметры, и соответственно дефектным – изделие, у которого дефектен хотя бы один параметр.

Введем в рассмотрение следующие события, относящиеся к изделию:

$A$  – событие, состоящее в том, что предъявленное на контроль изделие является годным;

$\bar{A}$  – событие, состоящее в том, что предъявленное на контроль изделие является дефектным (противоположное событие);

$B$  – событие, состоящее в том, что по результатам контроля изделие будет признано годным (эквивалентно решению принять изделие по результатам контроля);

$\bar{B}$  – событие, состоящее в том, что по результатам контроля изделие будет признано дефектным (эквивалентно решению забраковать изделие по результатам контроля).

События  $A$  и  $\bar{A}$ , а также события  $B$  и  $\bar{B}$  образуют полную группу, поэтому, как и в случае рассмотрения параметра, сумма вероятностей наступления этих событий равна:

$$P(A) + P(\bar{A}) = 1, \quad (8)$$

$$P(B) + P(\bar{B}) = 1. \quad (9)$$

Поскольку события  $A$  и  $\bar{A}$  могут произойти совместно с событиями  $B$  и  $\bar{B}$ , по аналогии с предыдущим запишем эти сложные события через простые.

$B_1 = AB$  – событие, состоящее в том, что изделие является годным и по результатам контроля будет признано годным (будет принято);

$B_2 = A\bar{B}$  – событие, состоящее в том, что изделие является годным и по результатам контроля будет признано дефектным (будет забраковано);

$B_3 = \bar{A}B$  – событие, состоящее в том, изделие является дефектным и по результатам контроля будет признано годным (будет принято);

$B_4 = \bar{A}\bar{B}$  – событие, состоящее в том, что изделие является дефектным и по результатам контроля будет признано дефектным (будет забраковано).

Эти сложные события также образуют полную группу, поэтому сумма

вероятностей наступления этих событий равна:

$$P(B1) + P(B2) + P(B3) + P(B4) = 1. \quad (10)$$

По аналогии с предыдущим, для изделия в целом также можно сказать, что при контроле изделия, наряду с правильными решениями В1 и В4 могут иметь место и ошибочные решения В2 и В3. Здесь также безусловные вероятности принятия ошибочных решений можно оценить с помощью рисков 1 и 2 рода, которые относятся уже к изделию в целом и имеют следующий вид:

$$\alpha_{и} = P(B2) = P(A \bar{B}) = P(A) P(\bar{B} / A) \quad (11)$$

$$\beta_{и} = P(B3) = P(\bar{A} B) = P(\bar{A}) P(B / \bar{A}) \quad (12)$$

Здесь также отметим важное свойство рисков 1 и 2 рода.

Если изделие не контролируется, то есть принимается без контроля, или изделие уже принято для дальнейшего использования, то с рисками (11), (12) происходит следующее:

1\*. Риск 1 рода  $\alpha$ , выражение (11), становится равным нулю.

То есть, при отсутствии контроля условная вероятность забраковать изделие, т.е. составляющая  $P(\bar{B} / A) = 0$ .

2\*. Риск 2 рода  $\beta$ , выражение (12), совпадает с вероятностью того, что изделие является дефектным, т.е.  $\beta_{и} = P(\bar{A})$ . Это объясняется тем, что поскольку изделие не контролируется или уже принято, то составляющая  $P(B / \bar{A})$ , входящая в выражение (12), равна единице, то есть условная вероятность принять изделие равна единице.

Для изделия в целом условные риски 1 и 2 рода, возникающие при контроле, определяются выражениями:

$$\alpha_{уи} = P(\bar{B} / A), \quad (13)$$

$$\beta_{уи} = P(B / \bar{A}), \quad (14)$$

Последствия ошибочных решений, связанных с возникновением рисков при контроле изделий, могут быть различны. Аналитически это учитывается путем введения функции потерь, которая предписывает каждому ошибочному решению определенные потери.

Поставим в соответствие каждому из возможных событий В1, В2, В3 и В4 определенные потери. При этом заметим, что реализация любого из этих событий связана с затратами СК на контроль параметров изделия.

Реализация событий В1 и В4 с вероятностями  $P(B1)$  и  $P(B4)$  влечет за собой потери, равные нулю, так как по результатам контроля годное изделие принимается, а дефектное бракуется. Поэтому реализация событий В1 и В4 с соответствующими вероятностями связана только с затратами на контроль СК.

Реализация событий В2 и В3 с вероятностями  $P(B2)$  и  $P(B3)$  влечет за собой не только затраты на контроль СК, но и соответствующие потери С1 и С2, связанные с рисками 1 и 2 рода, возникающими при контроле параметров изделия в целом. Очевидно, что математическое ожидание затрат на контроль и потерь, имеющих место при контроле изделия Си, можно записать в следующем

виде:

$$C_{и} = P(B1) C_{К} + P(B4) C_{К} + P(B2) [C_{К} + C1] + P(B3) [C_{К} + C2]. \quad (15)$$

Или, учитывая из (10), что  $P(B1) + P(B4) = 1 - P(B2) - P(B3)$ ,

$$C_{и} = C_{К} - P(B2) C_{К} - P(B3) C_{К} + P(B2) C_{К} + P(B2) C1 + P(B3) C_{К} + P(B3) C2 =$$

$$= P(B2) C1 + P(B3) C2 + C_{К} = C1\alpha_{и} + C2\beta_{и} + C_{К}, \quad (16)$$

где  $C1\alpha_{и}$  – математическое ожидание потерь за счет браковки годного изделия;

$C\beta = C2\beta_{и}$  – математическое ожидание потерь за счет приёмки дефектного изделия.

Поскольку по условию задачи рассматривается наиболее общий случай контроля некоторой неизвестной номенклатуры  $x_{п} \leq N_{п}$  наиболее важных параметров изделия из общей совокупности  $N_{п}$  технических параметров, определенных документацией на изготовление, величину  $C_{К} = C1_{к}$ , которая представляет собой математическое ожидание затрат на контроль одного изделия, можно определить следующим образом. Если  $C_{1j}$  – средние затраты (математическое ожидание), приходящиеся на контроль  $j$ -го параметра изделия, то

$$C_{1к} = \sum_{j=1}^{x_{п}} C_{1j} \quad (17)$$

Таким образом, в результате получаем функцию потерь в виде:

$$C_u = C_1\alpha_u + C_2\beta_u + \sum_{j=1}^{x_n} C_{1j} \quad (18)$$

Функцию (18) можно рассматривать в качестве целевой функции для оптимизации контроля технических параметров изделия, поскольку, как показано в [2, 3], априорные риски 1 и 2 рода  $\alpha_{и}$  и  $\beta_{и}$ , входящие в (18), в зависимости от объема номенклатуры  $x_{п}$  контролируемых параметров из общей совокупности  $N_{п}$  параметров изделия изменяются в противоположных направлениях: с увеличением  $x_{п}$  риск  $\alpha_{и}$  возрастает, а риск  $\beta_{и}$  убывает. Поэтому функция (18) должна иметь минимум при определенном значении  $x_{п}$  номенклатуры контролируемых параметров изделия.

Заметим, что в случае отсутствия контроля изделия, учитывая ранее установленные свойства рисков 1\* и 2\*, функция потерь будет определяться выражением

$$C_{и} = C2 \beta_{и} = C2 P(\bar{A}). \quad (19)$$

Таким образом, если изделие принимается без контроля, или контроль уже проведен и изделие принято для дальнейшего использования, то всегда будет иметь место потери (19).

Подведем некоторые итоги и сформулируем ряд исходных положений, которые определяют специфику контроля технических параметров сложных изделий:

1. Совокупность  $N_p$  всех параметров конкретного изделия, их номинальные значения и допуски на них закреплены в документации.

2. При контроле каждого параметра возникают ошибки 1 и 2 рода, в результате которых годный параметр можно принять за дефектный, а дефектный – за годный. Эти ошибки характеризуются рисками 1 рода  $\alpha_j$  и 2 рода  $\beta_j$ , относящимися к каждому  $j$ -му параметру.

3. При контроле номенклатуры  $x_p$  параметров каждого изделия из общей совокупности  $N_p$  возникают ошибки 1 и 2 рода, которые уже относятся к изделию в целом. Эти ошибки, очевидно, зависят от общего количества параметров изделия  $N_p$ , объема контролируемой номенклатуры  $x_p$  и от ошибок 1 и 2 рода (рисков  $\alpha_j$ ,  $\beta_j$ ), возникающих при контроле каждого параметра.

Наблюдается следующая взаимосвязанная иерархия ошибок 1 и 2 рода или рисков: риски при контроле каждого параметра изделия, риски при контроле изделия в целом.

Таким образом, возникает задача: на основе минимизации целевой функции потерь найти оптимальный план контроля изделия ( $x_p^*$ ,  $\alpha_i^*$ ,  $\beta_i^*$ ,  $c=0$ ), где  $c$  – приемочное число плана контроля,  $x_p^*$  оптимальная номенклатура параметров конкретного изделия, подлежащих обязательному контролю, а априорные оптимальные риски 1 и 2 рода  $\alpha_i^*$ , и  $\beta_i^*$ , относящиеся к изделию в целом будут являться оптимальными характеристиками плана параметрического контроля изделия.

Для формализации постановки этой задачи рассмотрим математическую модель (18), т.е. целевую функцию потерь и проведём анализ входящих в неё составляющих.

Составляющие  $C_1$  и  $C_2$  представляют собой математические ожидания потерь (за счёт браковки годного и приёмки дефектного изделия), приходящиеся на одно изделие, и потому они не связаны с глубиной контроля и ошибками, возникающими при контроле.

Риски 1 и 2 рода  $\alpha_i$  и  $\beta_i$ , относящиеся к каждому контролируемому изделию, являются функциями общего числа параметров изделия  $N_p$ , номенклатуры параметров  $x_p$ , подлежащих обязательному контролю, а также рисков 1 и 2 рода  $\alpha_j$ ,  $\beta_j$ , возникающих при контроле каждого  $j$  – го параметра:

$$\alpha_i = \alpha_i(N_p, x_p, \alpha_j, \beta_j), \quad (20)$$

$$\beta_i = \beta_i(N_p, x_p, \alpha_j, \beta_j). \quad (21)$$

При этом риски  $\alpha_j$ ,  $\beta_j$  можно определить методами метрологии [6].

С учётом выражений (18)...(21), формализованную постановку задачи определения априорного оптимального плана выборочного контроля технических параметров изделия можно записать в следующем виде:

найти

$$\min_{(x_p, \alpha_u, \beta_u)} C_u = \min_{(x_p, \alpha_u, \beta_u)} \left[ C_1 \alpha_u + C_2 \beta_u + \sum_{j=1}^{x_p} C_{1j} \right], \quad (22)$$

в области, определяемой следующими неравенствами

$$\beta_u > 0, \alpha_u \geq 0, \alpha_{nj} \geq 0, \beta_{nj} > 0, \dots \quad (23)$$

$$0 < x_n \leq N_n, j = \overline{1, N_n} \quad (24)$$

где  $\alpha_u$  и  $\beta_u$  определяются выражениями (20) и (21).

Выражение (22) можно рассматривать в качестве целевой функции, а полученные в результате решения задачи (22)...(2.24) оптимальные значения  $x_{п*}$ ,  $\alpha_{и*}$  и  $\beta_{и*}$  и будут являться оптимальным планом контроля изделия ( $x_{п*}$ ,  $\alpha_{и*}$ ,  $\beta_{и*}$ ,  $c=0$ ).

Подводя итог контролю технических параметров, можно сказать следующее. Поскольку при приемочном входном контроле проводится выборочный контроль партий одинаковых изделий и совокупностей разных изделий, то применяя аналогичный подход, можно построить целевые функции для определения оптимальных планов контроля партии одинаковых изделий и совокупности разных изделий, предварительно определив аналогичные понятия годной и дефектной партии и годной и дефектной совокупности.

Таким образом, возникает более общая задача: на основе минимизации целевых функций потерь, имеющих ту же природу, что и функция (22) найти одновременно следующие взаимосвязанные априорные оптимальные планы контроля технических параметров при входном контроле:

оптимальный план контроля технических параметров каждого изделия ( $x_{п*}$ ,  $\alpha_{и*}$ ,  $\beta_{и*}$ ,  $c=0$ ), где  $x_{п*}$  – оптимальная номенклатура параметров, подлежащих обязательному контролю;

оптимальный план контроля партии одинаковых изделий при контроле их технических параметров ( $n^*$ ,  $\alpha^*$ ,  $\beta^*$ ,  $c=0$ ), где  $n^*$  – оптимальный объем выборки контролируемых изделий от партии;

оптимальный план входного контроля совокупности разных изделий ( $xS^*$ ,  $\alpha s^*$ ,  $\beta s^*$ ,  $c=0$ ), где  $xS^*$  – оптимальная номенклатура изделий, подлежащая обязательному контролю с точки зрения минимума всех возможных экономических потерь, связанных с рисками принятия ошибочных решений, и затрат на контроль.

Решение этой задачи представляет собой предмет отдельного исследования.

По определению [2] контроль технических параметров характеризует работоспособность системы в целом и ее иерархических уровней. Однако в процессе производства сложной системы КТ проводится контроль не только технических параметров, но и показателей их надёжности, требуемые значения которых заданы в технической документации, как правило, в виде вероятностей безотказной работы системы и входящих в нее изделий за заданное время.

Рассмотрим статистическую структуру контроля надежности изделия КТ.

Контроль показателей надежности в процессе производства систем КТ по уровням иерархии их создания проводится при следующих видах контроля:

- при заводских испытаниях на предприятиях-изготовителях после изготовления изделий, из которых состоит система КТ;
- при приемо-сдаточных испытаниях системы в целом после ее изготов-

ления на сборочном предприятии-изготовителе.

Кроме того, контроль надежности так же, как и контроль параметров, проводится по статистическим планам контроля. А поскольку к надежности иерархических систем КТ предъявляются высокие требования, при этом для составляющих их изделий эти требования еще более высокие, то для планирования контроля надежности целесообразно также использовать статистические планы вида  $(n, \alpha, \beta, c=0)$  с приемочным числом  $c = 0$ , которое не допускает ни одного отказа при контроле надежности [2, 3]. Здесь характеристиками планов контроля являются:

$n$  – объем контроля (количество циклов контроля за заданное время, либо количество изделий, подвергаемых контролю и т.д.),  $\alpha$  – безусловная вероятность ошибки 1 рода (забраковать годное изделие удовлетворяющее требованиям к надежности),  $\beta$  – безусловная вероятность ошибки 2 рода (принять дефектное изделие не удовлетворяющее требованиям к надежности).

Риски 1 и 2 рода  $\alpha$  и  $\beta$  характеризуют безусловные вероятности принятия ошибочных решений при контроле надежности и обусловлены стохастическим характером проявления отказов, как случайных событий, и ограниченным объемом контроля, в том числе и времени испытаний. Такие объемы контроля соответствуют условиям мелкосерийного производства, поэтому, наряду с правильными решениями при контроле надежности изделий и системы в целом возможны и ошибочные решения. При этом последствия ошибочных решений для конкретных уровней различны.

Например, ошибочная приёмка дефектных изделий (которые не удовлетворяют заданным требованиям по надёжности) может привести к большому количеству отказов при контроле системы в целом, к авариям, необходимости их устранения, проведению доработок, что влечёт за собой значительные экономические потери.

В то же время ошибочная браковка годных изделий (которые удовлетворяют заданным требованиям по надёжности) также вызывают экономические потери, связанные, например, с дополнительными затратами на проведение повторного контроля и испытаний этих изделий, проведения различного рода доработок, вплоть до замены изделий, и т.д.

Предположим, что после контроля технических параметров изделия КТ на его предприятии – изготовителе планируется проведение испытаний (заводские испытания) и контроль показателей надежности изделия, требования к которым задаются в виде РТР вероятности безотказной работы за заданное время, что соответствует биномиальному расчетному случаю (плану контроля) [2, 7].

Итак, пусть к конкретному изделию предъявлены требования по надёжности в виде вероятности безотказной работы  $P_{тр}$  за заданное время  $t_{зад}$ .

Предположим, что контроль надежности изделия осуществляется следующим образом: проводятся испытания изделия в течение определенного времени  $t_i$ , по их результатам определяется вероятность безотказной работы. Далее, эта характеристика сравнивается с заданными требованиями, и если требования выполняются, то изделие принимается как годное, в противном случае изделие

бракуется (проводится доработка изделия, повторный контроль и др.).

Введем следующие определения.

годным будем считать изделие, для которого выполняются условие:

$$P \geq P_{Tr}$$

Если  $P < P_{Tr}$ , то изделие является дефектным.

По аналогии с рассмотренным выше параметрическим контролем изделия, такую систему контроля также можно охарактеризовать следующими показателями:

потерями вследствие ошибочных решений;

затратами на контроль.

Потери вследствие ошибочных решений возникают в связи с тем, что отказы изделия в процессе испытаний носят стохастический характер, как случайные события, и время проведения испытаний ограничено.

Чтобы оценить потери вследствие ошибочных решений, можно также рассмотреть статистическую структуру контроля надежности изделия [2, 3].

Можно также ввести события  $A$  и  $\bar{A}$ , означающие годное и дефектное изделие с точки зрения надежности; события  $B$  и  $\bar{B}$  его приемки и браковки; рассмотреть сложные события  $AB$ ,  $A\bar{B}$ ,  $\bar{A}B$ , и  $\bar{A}\bar{B}$ , как это сделано выше при контроле технических параметров изделия. Далее, по тому же алгоритму можно определить вероятности принятия ошибочных решений, то есть риски 1 и 2 рода, возникающие при контроле надежности изделия, по аналогии с (11) и (12)

$$\alpha_H = P(B2) = P(A\bar{B}) = P(A)P(\bar{B}/A), \quad (25)$$

$$\beta_H = P(B3) = P(\bar{A}B) = P(\bar{A})P(B/\bar{A}), \quad (26)$$

где индекс «Н» означает «надежность изделия».

Аналогичным образом, можно показать, что если контроль надежности изделия не проводится, то есть изделие принимается без контроля, или изделие уже принято, то с рисками (25), (26) происходит следующее:

1\*. Риск 1 рода, выражение (25), становится равным нулю

Это связано с тем, что условная вероятность забраковать изделие, т.е. составляющая  $P(\bar{B}/A) = 0$ .

2\*. Риск 2 рода, выражение (26), совпадает с вероятностью того, что изделие является дефектным, т.е.  $\beta_H = P(\bar{A})$ . Это объясняется тем, что поскольку изделие не контролируется или уже принято по результатам контроля, то составляющая  $P(B/\bar{A})$ , входящая в выражение (26), равна единице, то есть условная вероятность принять изделие равна единице.

Продолжая далее, как это сделано выше при контроле технических параметров, можно построить целевую функцию потерь и затрат на контроль надежности изделия для контроля заданных требований к вероятности безотказной работы изделия  $P_{Tr}$ :

$$C\Sigma H = C_1H\alpha_H + C_2H\beta_H + C_1KH n, \quad (27)$$

где индекс «н» означает надежность;

$C_{1H}\alpha_n$  – математическое ожидание экономических потерь за счет браковки годного изделия;

$C_{2H}\beta_n$  – математическое ожидание экономических потерь за счет приёмки дефектного изделия;

$C_{1K}n$  – представляет собой математическое ожидание экономических затрат на контроль надежности изделия;

$n$  – объем контроля (количество изделий, подвергаемых контролю, либо количество циклов контроля изделия).

Функцию (27) можно рассматривать в качестве общей целевой функции для определения оптимального плана контроля надежности изделия, поскольку априорные риски 1 и 2 рода  $\alpha_n$  и  $\beta_n$ , входящие в (27), в зависимости от объема контроля изделия изменяются в противоположных направлениях [2, 3]: с увеличением  $n$  риск  $\alpha_n$  возрастает, а риск  $\beta_n$  убывает. Поэтому функция (27) должна иметь минимум при определенных значениях  $n$  объема контроля изделия.

При этом так же, как и при контроле технических параметров изделия, в случае отсутствия контроля надежности изделия, учитывая ранее установленные свойства рисков 1\* и 2\*, функция потерь будет определяться выражением

$$C_{\Sigma H} = C_{2H}\beta_n = C_{2H}P(\bar{A}). \quad (28)$$

То есть, если изделие принимается без контроля или уже принято по результатам контроля, всегда будут иметь место потери (28).

С учётом выражения (27) формализованную постановку задачи определения оптимального плана контроля надежности изделия КТ можно записать в следующем виде:

найти

$$\min_{(n, \alpha_n, \beta_n)} C_{\Sigma H} = \min_{(n, \alpha_n, \beta_n)} [C_{1H}\alpha_n + C_{2H}\beta_n + C_{1K}n] \quad (29)$$

в области, определяемой следующими неравенствами

$$\beta_n > 0, \alpha_n \geq 0, \quad (30)$$

$$n \geq 0. \quad (31)$$

При этом риски 1 и 2 рода, возникающие при контроле надежности [2, 3], являются функциями объема контроля, заданных требований к надежности и накопленной статистической информации о надежности, а целевая функция (29) содержит экономические составляющие, связанные только с контролем надежности.

Минимизация целевой функции потерь позволяет найти соответствующий оптимальный статистический план контроля надежности изделия ( $nH^*$ ,  $\alpha H^*$ ,  $\beta H^*$ ,  $c=0$ ).

где  $nH^*$  – оптимальный объем контроля;  $\alpha H^*$ , и  $\beta H^*$  – оптимальные априорные риски 1 и 2 рода, относящиеся к изделию в целом, а  $c$  – приемочное число плана контроля (контрольный норматив).

Таким образом, в результате проведенного анализа статистических структур приемочного контроля сложных систем КТ с точки зрения теории при-

нения решений обоснованы целевые функции, которые можно использовать для определения априорных оптимальных планов контроля их технических параметров и надежности. При этом впервые установлено полное соответствие статистических структур контроля технических параметров и контроля надежности систем КТ, но со своими характеристиками.

*Литература*

1. РК-11. Положение о порядке создания и серийного производства ракетных и космических комплексов. М.: РОП, 2010. 382 с.
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. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Прикладные задачи теории вероятностей. М.: Наука, 1983. 284 с.
5. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 524 с.
6. Сычев В.И., Храменков В.Н., Шкитин А.Д. Основы метрологии военной техники. М.: Воен.издат., 1993. 393 с.
7. Беляев Ю.К. Вероятностные методы выборочного контроля. М.: Наука, 1975. 406 с.

УДК 629.783

**Предложения по выбору диапазона высот функционирования  
многоспутниковых низкоорбитальных группировок связи**

**Алексей Романович Фалько**, соискатель,  
**Максим Владимирович Черемисин**, кандидат технических наук,  
преподаватель,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,  
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область,  
преподаватель, МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

*В данной работе рассмотрены предложения по выбору диапазона высот функционирования многоспутниковых низкоорбитальных группировок связи. Выявлены особенности низких орбит различных диапазонов, их влияние на процессы утилизации отработавших малых космических аппаратов, а также поддержания их рабочих орбит в ходе эксплуатации. Предложены методики предварительного определения орбитальной структуры группировок связи.*

Многоспутниковая низкоорбитальная группировка связи, утилизация отработавших космических аппаратов, бюджет рабочего тела, орбитальная структура.

**Multi-satellite low-orbit communication groups structure attitude range  
proposals**

**Alexey Romanovich Falko**, applicant,  
**Maxim Vladimirovich Cheremisin**, Candidate of Technical Sciences, teacher,  
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,  
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region,  
teacher, The Bauman Moscow State Technical University, Moscow

*This paper considers multi-satellite low-orbit communication groups structure attitude range proposals. Orbital features of various attitude ranges and their influence on spent small spacecraft utilization processes, as well as maintaining their working orbits during operation, have been revealed. The methods for the preliminary determination of the orbital structure of communication groups.*

Multi-satellite low-orbit communication group, disposal of spent spacecraft, working fluid budget, orbital structure.

**Введение**

Одним из наиболее революционных решений этого десятилетия в облас-

ти автоматической космической техники стало развертывание малых космических аппаратов (МКА) в составе многоспутниковых низкоорбитальных группировок связи (МНГС), в частности, Starlink американской корпорации SpaceX и OneWEB британской организации Airbus Defence and Space. Обе системы стали пионерами в области дешевой спутниковой интернет-связи и имеют широкие перспективы развития и интеграции в различные сферы общественной жизни.

В качестве основной проблемы при проектировании МНГС выступает выбор параметров рабочих орбит, позволяющих без изменений в приборном составе единичного спутника сократить количество МКА и орбитальных плоскостей группировки при условии сохранения глобального радиопокрытия поверхности планеты и качества предоставляемых абонентам услуг.

Кроме того, с учетом актуальной тенденции по увеличению количества МНГС, одновременно функционирующих на орбите, существует потребность в снижении рисков столкновений с космическим мусором, либо активными МКА, а также в упрощении процессов утилизации отработавших спутников после окончания сроков их эксплуатации и в случае нештатных ситуаций.

В рамках данной статьи будут приведены предложения по созданию отечественных низкоорбитальных группировок диапазона высот 300..340 км, реализация которых позволит решить вышеперечисленные проблемы современных МНГС.

#### Определение параметров рабочих орбит

В качестве места запуска ракет-носителей (РН) для выведения МНГС предлагается космодром «Восточный», выбор которого позволяет добиться возможности единовременного выведения большого числа МКА ввиду выигрыша среди прочих стартовых площадок РФ по диапазону масс полезной нагрузки, что наглядно показано на примере РН «Союз-2.1б» в таблице 1 [5].

**Таблица 1 – Характеристики РН «Союз-2.1б»**

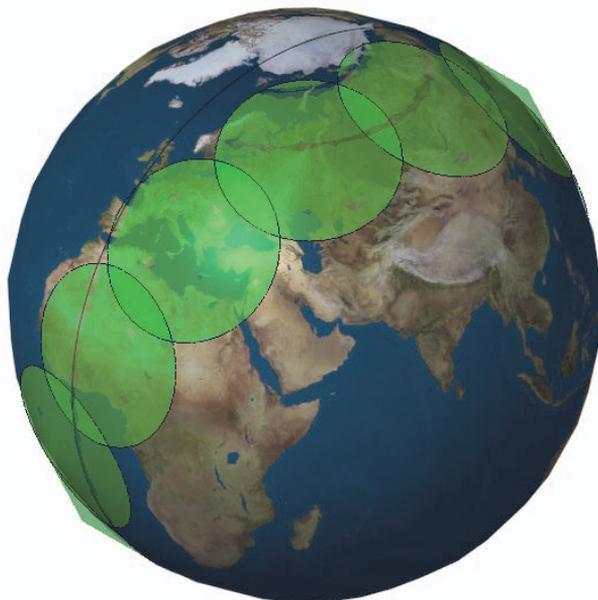
Характеристика	Значение
Стартовая масса РН, т	306..311
Масса ПГ, кг	Байконур: 7,8..8,25 Плесецк: 6,9..7,8 Восточный: 8,25..8,7

Космодром имеет географическое расположение, позволяющее использовать только определенные наклонения орбиты, что обусловлено невозможностью нахождения глухих районов для падения отработанных ступеней РН на прочих наклонениях.

Наиболее востребованные из доступных наклонений:

- 51,6° (на МКС и геостационарную орбиту);
- 64,8° (ГЛОНАСС, некоторые спутники ДЗЗ);
- 98° (на полярную орбиту, спутники ДЗЗ).

Зададимся орбитой выведения, имеющей наклонение  $i = 64,8^\circ$ , так как данное наклонение обеспечивает пересечение орбитальными плоскостями (ОП) МНГС большей части густонаселенной территории планеты и РФ в частности (рис. 1).



**Рисунок 1 – ОП МНГС ( $i = 64, 8^\circ$ ) над территорией РФ**

В связи с тем, что большинство современных КА размещаются на орбитах диапазона 600..800 км, плотность космического мусора и активно функционирующих аппаратов в заданном промежутке высот ставит под сомнение целесообразность размещения проектируемой МНГС на рассматриваемом участке [1, С. 52].

Выбор более высоких или низких орбит является перспективной задачей, так как позволяет существенно снизить требуемую частоту маневров уклонения и, соответственно, риск столкновения с ненаблюдаемыми космическими объектами.

Увеличение высоты орбиты позволит снизить влияние сопротивления атмосферы, что позволит снизить потребную массу рабочего тела и мощность двигательной установки. Однако, с увеличением расстояния от Земли снижается индукция её магнитного поля, что пропорционально увеличивает требования к радиационной защите приборного состава МКА и, как следствие, отрицательно влияет на стоимостные характеристики группировок связи.

Кроме того, значительно меньшее воздействие на спутники, размещённые на малых высотах, будет оказывать космический мусор. На высоте 300 км количество и суммарная масса орбитальных объектов более чем на порядок меньше, чем на обычных для размещения космических аппаратов высотах 400-600 км, так как не имеющие двигателя объекты, попавшие на эти высоты, быстро теряют скорость из-за сопротивления атмосферы и сгорают в её нижних слоях (рис. 2 [1]).

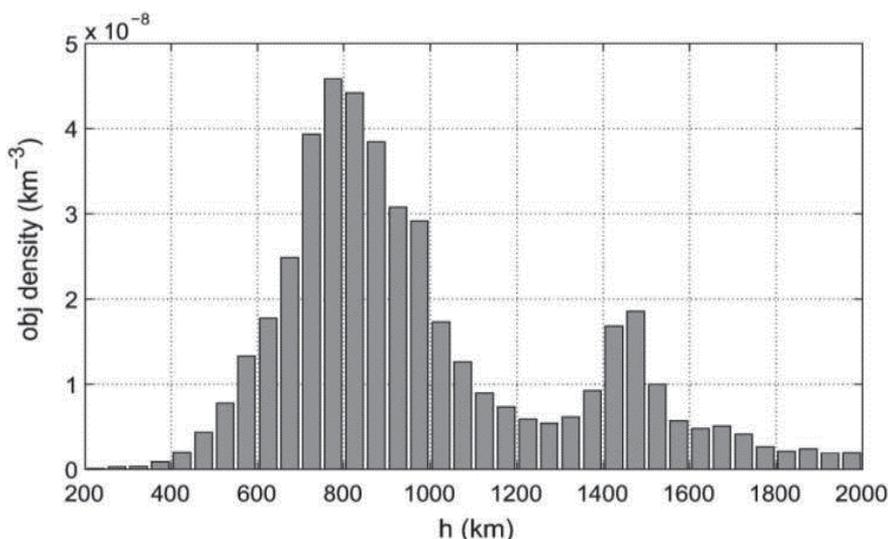


Рисунок 2 – Распределение плотности объектов на орбите

Исходя из представленного графика и особенностей изменения радиационного фона при увеличении высоты орбиты можно сделать выводы о перспективности размещения МКА МНГС на низких околокруговых орбитах диапазона высот 300..340 км.

#### Расчет времени утилизации МКА МНГС

Развёртывание группировки на низких орбитах способно решить задачу по упрощению утилизации МКА, входящих в состав проектируемой МНГС, что позволит снизить потенциальный экологический урон для планеты и околоземного пространства, а также международные законодательные ограничения, которые могут быть в скором времени приняты основными странами участниками космической деятельности.

Для подтверждения данного предположения был осуществлен расчет потребного времени деградации орбиты с 340 км до линии Кармана (100 км). В ходе расчета принимались во внимание: торможение вследствие сопротивления разреженной среды, влияние солнечной активности в расчетный период, а также изменение плотности атмосферы в зависимости от расстояния до поверхности Земли.

Для каждой высоты  $h_i$  была найдена плотность атмосферы в зависимости от фиксированного  $F_0$  и среднесуточного  $\overline{F}_{10,7}$  уровней солнечной активности [2-3]:

$$\rho_i = \rho_n \cdot K_{0i} \cdot (1 + K_{1i} + K_{2i} + K_{3i} + K_{4i}), \quad (1)$$

где  $\rho_n$  – плотность ночной атмосферы;

$K_0..K_4$  – множители, зависящие от уровней солнечной активности  $F_0$ ,  $\overline{F}_{10,7}$  на определенной высоте  $h$ , км ( $K_0$  – изменение плотности атмосферы, связанное с отклонением  $F_{81}$  от  $F_0$ ,  $K_1$  – суточный эффект в распределении плотно-

сти,  $K_2$  – полугодовой эффект,  $K_3$  – изменение плотности, связанное с отклонением  $\overline{F_{10,7}}$  от  $F_{81}$ ,  $K_4$  – зависимость плотности атмосферы от геомагнитной возмущенности, где  $F_{81}$  – средневзвешенный индекс за три оборота солнца – 81 сут.).

$$K_{0i} = 1 + \frac{(l_0 + l_1 h_i + l_2 h_i^2 + l_3 h_i^3 + l_4 h_i^4)(F_{81} - F_0)}{F_0}; \quad (2)$$

$$K_{1i} = (c_0 + c_1 h_i + c_2 h_i^2 + c_3 h_i^3 + c_4 h_i^4) \cos^{n_0 + n_1 h_i + n_2 h_i^2} \frac{\varphi}{2}; \quad (3)$$

$$K_{2i} = (d_0 + d_1 h_i + d_2 h_i^2 + d_3 h_i^3 + d_4 h_i^4) A(d); \quad (4)$$

$$K_{3i} = \frac{(b_0 + b_1 h_i + b_2 h_i^2 + b_3 h_i^3 + b_4 h_i^4)(\overline{F_{10,7}} - F_{81})}{F_{81} + \overline{F_{10,7}} - F_{81} \nu}; \quad (5)$$

$$K_{4i} = (e_0 + e_1 h_i + e_2 h_i^2 + e_3 h_i^3 + e_4 h_i^4) (e_5 + e_6 K_p + e_7 K_p^2 + e_8 K_p^3); \quad (6)$$

$$A(d) = A_0 + A_1 d + A_2 d^2 + A_3 d^3 + A_4 d^4 + A_5 d^5 + A_6 d^6 + A_7 d^7 + A_8 d^8, \quad (7)$$

где  $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, l_i, n_i, \varphi$  – коэффициенты модели, используемые для расчета плотности атмосферы при различных значениях фиксированного уровня солнечной активности  $F_0$ ;

$d$  – число суток от начала года, дней;

$A(d)$  – множитель, характеризующий влияние полугодового эффекта на плотность атмосферы;

$K_p$  – квазилгарифмический планетарный среднесуточный индекс геомагнитной возмущенности, баллы.

Далее, в соответствии с методикой, описанной в [6, С. 384], была задана функция высоты орбиты спутника  $F_h$  и найдено время  $t_i$  перехода с одной орбиты на другую с шагом  $\Delta h$ , равным 1 км:

$$F_{h_i} = \frac{1}{2\sqrt{\mu}} \cdot \int_{h_{i-1}}^{h_i} \frac{1}{\rho_i \cdot \sqrt{R_e + h}} dh, \quad (8)$$

где  $\mu$  – гравитационная постоянная,  $\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$ ;

$R_e$  – радиус Земли, км.

$$t_i = \frac{F_{h_{0,i}} \cdot m_{\text{сп}}}{C_x \cdot S_m}, \quad (9)$$

где  $m_{\text{сп}}$  – масса спутника, кг;

$C_x$  – коэффициент сопротивления атмосферы;

$S_m$  – площадь миделя,  $\text{м}^2$ .

Тогда общее время деградации орбиты:

$$T = \sum_{i=1}^N t_i, \quad (10)$$

где  $N$  – число километров, на которое опустится аппарат за время  $T$ .

В результате расчета с использованием разработанной программы по методике, изложенной выше, удалось найти время деградации орбиты для спутников МНГС.

Режим утилизации МКА предусматривает поворот корпуса таким образом, чтобы достичь наименьшей площади мишеней МКА. При этом предполагается, что СБ повернуты параллельно вектору линейной скорости вращения спутника, что позволяет пренебречь их влиянием на площадь поперечного сечения.

Суммарное время снижения МКА с высоты 340 км до 100 км для площади мишеней  $S_m = 0,5\text{ м}^2$  составило 38 дней, 9 часов, 24 минуты и 51 секунду.

#### **Определение бюджета рабочего тела для МКА МНГС**

Первым делом необходимо определить время снижения высоты орбиты на 10 км, а далее, исходя из срока активного существования МКА, необходимо определить потребное количество включения ДУ и потребный запас характеристической скорости для обеспечения заложенного срока активного существования (САС).

По аналогии с методикой, представленной ранее, был осуществлен расчет деградации орбиты с высоты 340 км до 330 км соответственно. Суммарное время, за которое высота орбиты изменится на 10 км: 7 дней, 12 часов, 8 минут и 40 секунд.

Определим потребный запас характеристической скорости для поднятия орбиты на 10 км:

$$\Delta V_{X1}^h = \sqrt{\mu} \left( \frac{1}{\sqrt{R_3 + h_0}} - \frac{1}{\sqrt{R_3 + h_1}} \right) = 6 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (11)$$

Определим потребное количество коррекций орбиты для обеспечения заявленного САС в  $n$  лет (для расчета примем  $n = 5$ ):

$$N = \frac{n \cdot 365}{\sum t_i} 244 \quad (12)$$

И тогда суммарный запас характеристической скорости для коррекции высоты орбиты за 5 лет:

$$\Delta V_{X \text{ п.о.}}^h = N \cdot \Delta V_{X1}^h = 1464 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (13)$$

Для построения орбитальной плоскости МНГС необходимо развести МКА друг от друга на заданное расстояние в плоскости орбиты. Для этого необходимо опустить высоту орбиты конкретного МКА, подождать, пока он займет требуемое положение и затем обратно поднять высоту орбиты. Высоту орбиты для маневра задают исходя из потребной скорости развертывания группировки. Чем быстрее должна быть развернута группировка, тем больше должна быть разница в скоростях двух аппаратов и, соответственно, тем больше должна быть разница в высоте орбит.

Для расчета примем, что группировку на орбите необходимо развернуть за 7 суток. Для ускорения процесса разведения МКА примем следующее условие.

Количество спутников одной орбитальной плоскости  $N_{\text{МКА}}$ , из которых

один остается на номинальной орбите, а остальные ( $N_{\text{МКА}} - 1$ ) распределяются по  $(N_{\text{МКА}} - 1)/2$  на более высокую орбиту, чтобы занять отстающие положения в плоскости, и более низкую орбиту, чтобы занять опережающие положения.

Тогда нужно найти потребную разницу в скорости на орбитах, чтобы за 7 суток аппарат занял первое место.

Расстояние, на которое крайний МКА должен обогнать средний аппарат, чтобы занять первое место в плоскости [4, С. 34]:

$$l = l_1 = l_2 = \frac{\pi(R_3 + h)}{180} \cdot \frac{N_{\text{МКА}} - 1}{2} \cdot \alpha \quad (14)$$

где  $\alpha = 360/N_{\text{МКА}}$  – угол между двумя соседними аппаратами.

Тогда при любых значениях  $N_{\text{МКА}}$  разница в скорости, которую нужно обеспечить, чтобы за 7 суток аппарат занял первое место, будет приблизительно равна:

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 = \frac{2 \cdot l}{7 \cdot 24 \cdot 3600} = 64 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (15)$$

Тогда суммарный запас характеристической скорости на орбитальные маневры составит:

$$\Delta V_{\text{X}}^{\text{общ}} = \Delta V + \Delta V_{\text{X}}^h_{\text{п.о.}} = 1528 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (16)$$

Далее найдем потребный ресурс двигателя:

$$t_p = m_{\text{КА}} \frac{\Delta V_{\text{X}}^{\text{общ}}}{P_{\text{П}}} \quad (17)$$

где  $P_{\text{П}}$  – пустотная тяга двигателя, Н;

$m_{\text{КА}}$  – масса МКА, кг.

Найдем потребный суммарный импульс тяги:

$$I_{\Sigma} = P_{\text{П}} \cdot t_p \quad (18)$$

И тогда отсюда найдем необходимый запас рабочего тела (на примере электроракетной двигательной установки СПД-50 [7]):

$$m_{\text{РТ}} = \frac{I_{\Sigma}}{I_{\text{уд}}} = 33,38 \text{ кг} \quad (19)$$

Добавив 10% на незабор и погрешности вычисления окончательно получим:

$$m_{\text{РТ}} = 36,6 \text{ кг} \quad (20)$$

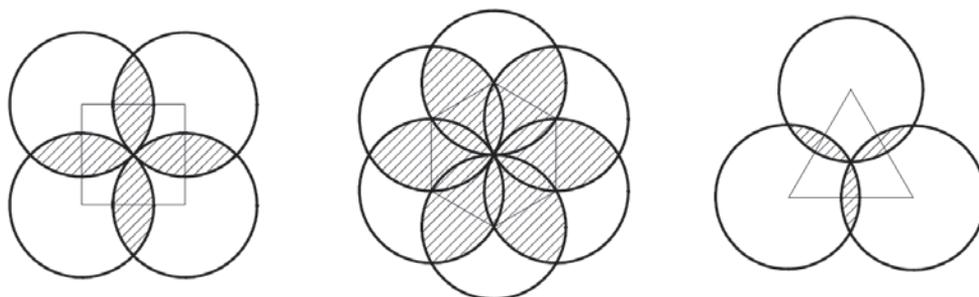
Полученная масса ксенона значительно превышает соответствующую большим высотам, однако не является значительным препятствием к реализации МНГС заданного диапазона орбит.

### **Определение орбитальной структуры МНГС**

Рациональное расположение МКА в спутниковой группировке предусматривает глобальное покрытие всей потребной площади с минимальным перекрытием конусов радиосигнала между собой.

Если развернуть земную поверхность на плоскости, то конусы можно представить в виде окружностей равного радиуса, расположенных в определенном порядке на выбранной площади с учетом полного ее покрытия.

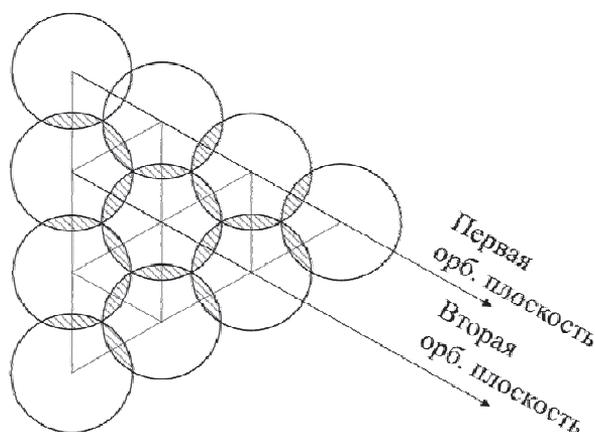
Для центров окружностей необходимо выбрать регулярную сетку, а чтобы такая сетка оставалась регулярной, она должна иметь форму правильного многоугольника. Для начального сравнения были выбраны случаи сеток формы правильных треугольника, прямоугольника (квадрата) и шестиугольника (рис. 3).



**Рисунок 3 – Варианты построения регулярных сеток**

Очевидно, что с уменьшением размерности сетки (количества сторон многоугольника) площадь перекрытия окружностей уменьшается, поэтому в качестве оптимального для построения МНГС с учетом обеспечения глобального покрытия Земли имеет смысл выбрать вариант с применением регулярной треугольной сетки.

Пример заполнения площади окружностями по принципу регулярной сетки выбранной размерности представлен на рисунке 4.



**Рисунок 4 – Заполнение площади окружностями в регулярной треугольной сетке**

Спроецировав треугольную сетку на поверхность Земли (рис. 5) можно увидеть, что наиболее подходящей является орбитальная структура, при которой все плоскости МНГС пересекаются между собой посредством одной оси, что при корректном подборе характеристик приемной и передающей аппаратуры, характеристики которых формируют геометрию конуса радиосвязи, позволяет добиться минимального перекрытия конусов радиосвязи, максимально сократив количество МКА в МНГС.

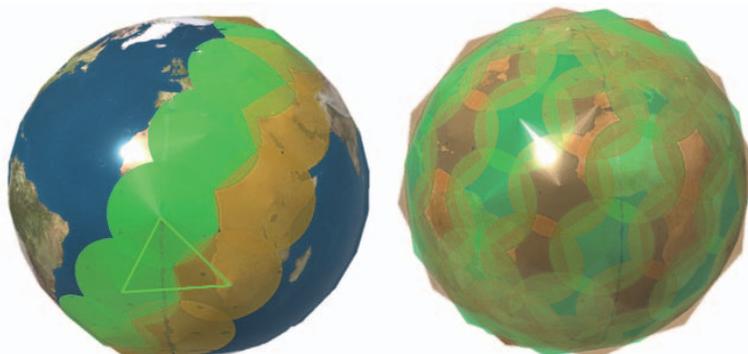


Рисунок 5 – Распределение орбитальных плоскостей МНГС с наименьшим перекрытием

#### **Вывод**

В рамках статьи рассмотрены особенности орбит высоты диапазона 300..340 км при решении задачи построения МНГС, удовлетворяющей условиям минимального перекрытия конусов радиосигнала, снижения вероятности столкновения с прочими космическими объектами и возможностью утилизации посредством выключения двигателя без дополнительных орбитальных маневров.

Получены значения потребной массы рабочего тела и ресурса ЭРДУ в случае выбора данного диапазона орбит.

#### *Литература*

1. Бечаснов П.М. Использование низких орбит как средство снижения стоимости космической техники // XLVI Академические чтения по космонавтике (Королёвские чтения – 2022): сб. тез.: в 4 т. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2022. Т. 1. С. 51-54.
2. ГОСТ 25645.101-83. Атмосфера Земли верхняя. Модель плотности для проектных баллистических расчетов искусственных спутников Земли. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1985. 168 с.
3. ГОСТ 25645.166-2004. Атмосфера Земли верхняя. Модель плотности для баллистического обеспечения полетов искусственных спутников Земли. М.: Госстандарт России, 2004. 23 с.

4. Ельников Р.В. Проектно-баллистический анализ развертывания группировки спутников связи на окололунных орбитах // Космические аппараты и технологии. 2014. № 1. С. 32-37.
5. Ракета-носитель «Союз-2.1б» // Роскосмос [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.roscosmos.ru/36316> (дата обращения 03.08.2023).
6. Эльясберг П.Е. Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. М.: Наука, 1965. 540 с.

УДК 621.793.74:536.521.2

**Метод разделения переменных в одномерной плоскопараллельной нестационарной задаче теплопроводности в неоднородной среде**

**Сергей Сергеевич Кокарев**, кандидат физико-математических наук,  
директор регионального научно-образовательного центра «Логос», г. Ярославль,

**Михаил Евгеньевич Соловьев**, доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры Информационные системы и технологии,  
Институт цифровых систем,

Ярославский государственный технический университет, г. Ярославль,

**Сергей Львович Балдаев**, кандидат технических наук,  
заместитель генерального директора по технологиям,

ООО «Технологические системы защитных покрытий», г. Москва, г. Щербинка,

**Лев Христофорович Балдаев**, доктор технических наук,  
генеральный директор,

ООО «Технологические системы защитных покрытий», г. Москва, г. Щербинка

*Предложена методика расчета распределения температуры в неоднородном слое материала с коэффициентом теплопроводности, заданным в виде непрерывной функции координаты сечения слоя. Проведен анализ динамики распространения теплового импульса в неоднородном слое в процессе установления теплового равновесия. В качестве иллюстрации предложенной методики решена задача о распространении тепла в тонком неоднородном слое оксида алюминия, получаемом при газотермическом нанесении его на металлическую поверхность*

Газотермическое напыление, уравнение теплопроводности, неоднородная среда, метод разделения переменных.

**A method of separation of variables in a one-dimensional plane-parallel non-stationary heat conductivity problem in a non-homogeneous medium**

**Sergey Sergeevich Kokarev**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences,  
Director of the Logos Regional Scientific and Educational Center, Yaroslavl,

**Mikhail Evgenievich Soloviev**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences,  
Professor of the Department of Information Systems and Technologies,  
Institute of Digital Systems, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl,

**Sergey Lvovich Baldaev**, Candidate of Technical Sciences,  
Deputy General Director for Technologies of Technological Systems of Protective  
Coatings LLC, Moscow, Shcherbinka,

**Lev Khristoforovich Baldaev**, Doctor of Technical Sciences,  
General Director of Technological Systems of Protective Coatings LLC,  
Moscow, Shcherbinka

*A method is proposed for calculating the temperature distribution in an inhomogeneous layer of a material with a thermal conductivity coefficient given as a continuous function of the coordinate of the layer section. An analysis was made of the dynamics of the propagation of a thermal pulse in an inhomogeneous layer during the establishment of thermal equilibrium. As an illustration of the proposed technique, the problem of heat propagation in a thin inhomogeneous layer of aluminum oxide obtained by gas-thermal deposition on a metal surface is solved.*

Thermal spraying, heat equation, inhomogeneous medium, method of separation of variables.

### Введение

Восстановление поверхностей изношенных изделий, а также придание им многих специальных свойств может быть достигнуто путем газотермического напыления на их поверхность функциональных покрытий [1,5,10,11]. Одним из важных специальных свойств, придаваемых поверхности деталей за счет нанесения покрытий, является их стойкость к повышенным температурам. Так, например, слои с уменьшенным коэффициентом теплопроводности могут составлять внешнюю часть покрытий лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей [2, 4, 6]. Это позволяет увеличить стойкость лопаток к термоокислению и износу [9,12]. Защитное покрытие лопаток турбин представляет собой сложную структуру, состоящую из нескольких слоев, каждый из которых является композиционным материалом. Для прогнозирования эксплуатационных свойств такой детали необходимо знать параметры теплофизических свойств покрытия.

Ранее в работе [8] были рассмотрены варианты численного моделирования теплофизических свойств многослойного покрытия, каждый слой которого характеризуется своим значением коэффициента теплопроводности. Однако на практике часто возникают ситуации, когда коэффициент теплопроводности не является постоянным, а изменяется в пределах слоя по причине процессов диффузии компонентов, химических реакций и различного типа неоднородностей. В этой связи целью настоящей работы явилось рассмотрение решения уравнения теплопроводности, в котором коэффициент теплопроводности представляет собой непрерывную функцию координаты сечения покрытия.

### 1. Постановка задачи

Рассмотрим плоскопараллельный неограниченный в двух ( $y - z$ ) измерениях слой  $D[0, \ell]$  вещества, свойства которого зависят только от координаты  $0 \leq x \leq \ell$ . Нестационарное уравнение теплопроводности:

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\sigma \text{grad}T) \quad (1)$$

принимает в рассматриваемой задаче более простую форму:

$$c(x) \frac{\partial T(t,x)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \sigma(x) \frac{\partial T(t,x)}{\partial x} \right). \quad (2)$$

Здесь и далее  $c(x) = c_m(x)\rho(x)$  – теплоемкость вещества, отнесенная к единице его объема,  $c_m(x)$  – массовая удельная теплоемкость,  $\rho(x)$  – плотность

вещества,  $\sigma(x)$  – коэффициент теплопроводности. Граница области  $D[0, \ell]$  имеет две компоненты:  $\partial D[0, \ell] = D_0 \cup D_\ell$  (внутренняя и внешняя соответственно). На компоненте  $D_0 = \{x = 0, y, z\}$  задается граничное условие Дирихле:

$$T(t, 0) = T_1 = \text{const}, \quad (3)$$

на компоненте  $D_\ell = \{x = \ell, y, z\}$  задается смешанное граничное условие в форме Ньютона-Рихмана:

$$-\sigma(\ell) \frac{T(t, \ell)}{\partial x} = \beta(T(t, \ell) - T_0), \quad (4)$$

где  $T_1$  – постоянная температура нагревателя,  $T_0$  – постоянная температура окружающей среды,  $\beta$  – постоянный коэффициент теплопередачи на внешней границе раздела слоя и окружающей среды. Кроме (3)-(4), задается также начальное условие:

$$T(0, x) = T_0, x \in [0; \ell]. \quad (5)$$

Задача решается в предположении, что функции  $c(x)$  и  $\sigma(x)$  заданы, причем первая функция является непрерывной, а вторая непрерывно-дифференцируемой при  $x \in [0; \ell]$ .

## 2. Тепловые координаты и разделение переменных

Введем новую более удобную для рассматриваемой задачи тепловую координату  $\xi$ , которая связана с геометрической координатой  $x$  формулой:

$$d\xi = \frac{dx}{\sigma(x)} \Leftrightarrow \xi(x) = \int_0^x \frac{du}{\sigma(u)}. \quad (6)$$

Поскольку  $\sigma(x) > 0$ , то функция  $\xi(x)$  является монотонной и формулы (6) действительно задают координатную биекцию  $[0; \ell] \rightarrow [0; \xi_0 = \xi(\ell)]$  (и даже диффеоморфизм). В новых переменных уравнение (1) после простых преобразований принимает вид:

$$-T''(t, \xi) + \Lambda(\xi)\dot{T}(t, \xi) = 0, \quad (7)$$

где здесь и далее точка означает производную по времени, штрих – производную по тепловой координате  $\xi$ , а функция

$$\Lambda(\xi) \equiv \sigma(x(\xi))c(x(\xi))$$

остаётся единственной существенной зависимостью, отражающей неоднородные свойства среды в тепловых координатах. Будем в дальнейшем называть ее *функцией тепловой инерции* среды: для выполнимости уравнения теплопроводности в тепловых координатах при больших значениях этой функции в точке, производные по времени в ней должны быть малы, и наоборот. Решение уравнения (7) методом разделения переменных предполагает, что функция  $T(t, \xi)$  представляется в виде:  $T(t, \xi) = \Theta(t) \cdot \mathcal{E}(\xi)$ . Подставляя это выражение в (7), после простых преобразований, получаем:

$$-\frac{\mathcal{E}''}{\Lambda\mathcal{E}} + \frac{\dot{\Theta}}{\Theta} = 0, \quad (8)$$

откуда следует, что

$$\frac{\dot{\Theta}}{\Theta} = -\lambda; \quad \frac{\mathcal{E}''}{\Lambda\mathcal{E}} = -\lambda, \quad (9)$$

где  $\lambda$  – некоторая константа разделения. Первое уравнение имеет экспо-

ненциальное общее решение:

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-\lambda t} \quad (10)$$

и его вид никак не зависит от неоднородных свойств слоя. Это отражает общий характер экспоненциальной временной релаксации процесса теплопередачи к его стационарному пределу. При этом параметр  $\lambda$  должен быть положительным и его физический смысл очевиден из (10):  $\lambda \sim 1/\tau$ , где  $\tau$  – характерное время тепловой релаксации слоя. Второе уравнение принимает вид:

$$\mathcal{E}''(\xi) + \lambda \Lambda(\xi) \mathcal{E}(\xi) = 0 \quad (11)$$

– линейного уравнения колебаний с распределенным параметром квадрата частоты  $\omega^2(\xi) = \lambda \Lambda(\xi)$ . Его интегрированию целиком посвящен следующий раздел.

### 3. Интегрирование нелинейного уравнения колебаний

При постоянной функции  $\Lambda$  решением (11) была бы сумма мнимых экспонент с произвольными коэффициентами. Будем искать общее решение (11) в виде:

$$\mathcal{E} = A e^{B\xi}, \quad (12)$$

где  $A$  и  $B$  – некоторые подлежащие определению функции тепловой координаты  $\xi$ . Непосредственные вычисления дают:

$$\mathcal{E}' = A' e^{B\xi} + A e^{B\xi} (B'\xi + B); \quad (13)$$

$$\mathcal{E}'' = e^{B\xi} (A'' + 2A'(B'\xi + B) + A((B'\xi + B)^2 + B''\xi + 2B')).$$

Подставляя вторую строчку в (11) после сокращения на  $e^{B\xi}$  получаем:

$$A'' + 2A'(B'\xi + B) + A((B'\xi + B)^2 + B''\xi + 2B') + \lambda \Lambda = 0. \quad (14)$$

Наша ближайшая задача – найти такую функцию  $B$ , для которой коэффициент при  $A$  в (14) обращается в нуль и уравнение полностью интегрируется разделением переменных. Вводя обозначение:

$$\varphi \equiv B'\xi + B, \quad (15)$$

приходим к нелинейному уравнению первого порядка:

$$\varphi' + \varphi^2 + \lambda \Lambda = 0. \quad (16)$$

Уравнение (16) при произвольной функции  $\Lambda$  является общим уравнением Риккати, записанным в специальной системе координат. Как известно [3], такое общее уравнение не интегрируется в квадратурах, а случаи его интегрируемости являются предметом обширных математических исследований, имеющих 200-летнюю историю. Обычно, интегрируемый случай характеризуют каким-то частным решением  $\varphi_0(\xi)$ , поскольку общее решение (16) выражается через частное по формуле:

$$\varphi(\xi) = \varphi_0(\xi) + \frac{\Phi(\xi)}{c + \int \Phi(\xi) d\xi}, \quad \Phi(\xi) = \exp\left(-2 \int_0^\xi \varphi_0(u) du\right), \quad (17)$$

причем частному решению  $\varphi_0$  соответствует значение  $C \rightarrow \infty$ . Для целей решаемой задачи достаточно ограничиться частным решением  $\varphi_0$  и в дальнейшем мы будем предполагать, что оно каким-либо способом найдено. Общих методов отыскания частных решений уравнения Риккати не существует, но для многих конкретных семейств функций  $\Lambda(\xi)$  частные решения известны [7]. Общие теоремы существования и единственности гарантируют существование частного решения  $\varphi_0(\xi)$  для любой непрерывной функции  $\Lambda$ . Если частное решение  $\varphi_0$

найденно, то уравнение (14) сводится к интегрированию одного уравнения второго порядка относительно функции  $A$  вида:

$$A'' + 2A'\varphi_0 = 0. \quad (18)$$

Последовательное интегрирование приводит к решению в квадратурах вида:

$$A = C_1 \int_0^\xi \Phi(u) du + C_2. \quad (19)$$

Для записи полного решения (12) необходимо найти функцию  $B$  – она является решением дифференциального уравнения (15) относительно  $B$  при известной  $\varphi_0$ . Решение методом вариации постоянной дает:

$$B = \frac{1}{\xi} \int_0^\xi \varphi_0(u) du. \quad (20)$$

Собирая все в (12), получаем:

$$\Xi(\xi) = \frac{C_1}{\sqrt{\Phi(\xi)}} \int_0^\xi \Phi(u) du + \frac{C_2}{\sqrt{\Phi(\xi)}} \quad (21)$$

– общее решение уравнения, зависящее от двух произвольных констант.

Таким образом, резюмируя, можно сказать, что метод разделения переменных в рассматриваемой задаче приводит к отысканию частного решения уравнения Риккати (16). При этом произвольное решение уравнения теплопроводности с разделенными переменными принимает в тепловых координатах вид:

$$T_\lambda(t, \xi) = e^{-\lambda t} \left( \frac{C_1}{\sqrt{\Phi_\lambda(\xi)}} \int_0^\xi \Phi_\lambda(u) du + \frac{C_2}{\sqrt{\Phi_\lambda(\xi)}} \right), \quad (22)$$

где коэффициенты  $C_1, C_2$  – произвольны, решение зависит от произвольного параметра  $\lambda$  (что для удобства отражено в обозначениях), функция  $\Phi_\lambda$  определяется уравнением:

$$\Phi_\lambda(\xi) = \exp \left( -2 \int_0^\xi \varphi_{0\lambda}(u) du \right), \quad (23)$$

а функция  $\varphi_{0\lambda}$  является частным решением уравнения (16) для некоторой заданной функции  $\Lambda(\xi)$  и некотором значении  $\lambda$ . В силу принципа суперпозиции, справедливого для любого линейного уравнения, общее решение уравнения (2), которое можно получить методом разделения переменных, является суперпозицией решений (23), которую можно представить интегралом вида:

$$T_g(t, \xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} T_\lambda(t, \xi) d\lambda = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\lambda t} \left( \frac{C_1(\lambda)}{\sqrt{\Phi_\lambda(\xi)}} \int_0^\xi \Phi_\lambda(u) du + \frac{C_2(\lambda)}{\sqrt{\Phi_\lambda(\xi)}} \right) d\lambda, \quad (24)$$

с произвольными функциями  $C_i(\lambda)$  ( $i = 1, 2$ ), обеспечивающие сходимость несобственного интеграла.

#### 4. Граничные условия и дискретный спектр

В тепловой системе координат начально-краевые условия (3)-(5) принимают немного более простой вид. Фактически, производная температуры по тепловой координате сразу определяет локальный тепловой поток

$$T_\lambda(t, 0) = T_1; \quad -T'_\lambda(t, \xi_l) = \beta(T(t, \xi_l) - T_0); \quad T_\lambda(0, \xi) = T_0. \quad (25)$$

Отметим, что записанные условия не удовлетворяют условию согласования «на углу»: из первого граничного условия по непрерывности следует, что

$T_\lambda(0,0) = T_1$ , а из последнего начального  $T_\lambda(0,0) = T_0$ . Это означает, что начально-краевые условия задают разрывное начальное распределение температуры: последнее начальное условие в (25) следует считать заданным при  $\xi \in (0, \ell]$ , а  $T_\lambda(0,0) = T_1$ .

Как и в работе [8] выделим из зависимости  $T_\lambda(t, \xi)$  ее асимптотическую стационарную часть  $T_\infty$ , которая не зависит от времени. В тепловых координатах  $T_\infty$  является решением уравнения  $T''_\infty = 0$ , которое имеет вид линейной функции:

$$T_\infty = a\xi + b, \quad a, b = \text{const.} \quad (26)$$

Граничное условие на  $D_0$  приводит к выражению:  $b = T_1$ . Граничное условие на  $D_\ell$  приводит к уравнению на  $a$ :

$$-a = \beta(a\xi_\ell + T_1 - T_0). \quad (27)$$

Решая его, находим:

$$T_\infty(\xi) = -\frac{\beta(T_1 - T_0)}{1 + \beta\xi_\ell} \xi + T_1. \quad (28)$$

Теперь представляя произвольное решение в виде:

$$T_\lambda(t, \xi) = T_\infty(\xi) + \bar{T}_\lambda(t, \xi), \quad (29)$$

приходим к выводу, что переходная часть  $\bar{T}_\lambda(t, \xi)$  удовлетворяет уравнению (2) (и поэтому для нее справедливо представление (22)) и начально-краевым условиями:

$$T_\lambda(t, 0) = 0; \quad -T'_\lambda(t, \xi_l) = \beta(T(t, \xi_l)); \quad T_\lambda(0, \xi) = T_0 - T_\infty(\xi). \quad (30)$$

Для выполнения первого граничного условия полагаем в (22)  $\xi = 0$  и приходим к уравнению:  $C_2 = 0$ . Для вывода второго граничного условия на  $D_\ell$  вычисляем производную  $\bar{T}'_\lambda$  в точке  $\xi_\ell$ :

$$T'_\lambda(t, \xi_l) = C_1 \left( -\frac{\bar{\Phi}'_\lambda(\xi_l)}{2\bar{\Phi}_\lambda^2(\xi_l)} \int_0^{\xi_l} \Phi_\lambda(u) du + \sqrt{\Phi_\lambda(\xi_l)} \right) \quad (31)$$

Составляя второе граничное условие в (30) на  $D_\ell$  после сокращения на  $C_1$  и экспоненциальный временной множитель после некоторых простых преобразований приходим к интегро-дифференциальному соотношению, относящемуся к точке  $\xi = \xi_\ell$ :

$$\Phi_\lambda(\xi_l) = \left( \frac{d \ln \sqrt{\Phi_\lambda}}{d \xi} \Big|_{\xi=\xi_l} - \beta \right) \int_0^{\xi_l} \Phi_\lambda(u) du, \quad (32)$$

которое нетривиальным образом связывает среднее значение  $\Phi_\lambda$  на слое с его значением на внешней границе  $\xi = \xi_\ell$ . Для конкретной функции  $\Lambda(\xi)$  это (вообще говоря, трансцендентное) уравнение определяет допустимые значения  $\lambda$ . В типичном случае такое уравнение будет иметь конечный или счетный набор корней  $\{\lambda_n\}$ . Таким образом, общее решение задачи методом разделения переменных, удовлетворяющее граничным условиям, представляется не интегралом (24), что не умаляет общности формулы (24), так как она переходит в требуемую сумму при

$$C_2 = 0, \quad C_1(\lambda) = \sum_n C_n \delta(\lambda - \lambda_n),$$

а суммой вида:

$$T_g(t, \xi) = T_\infty(\xi) + \sum_{n=N_1}^{N_2} e^{-\lambda_n t} \frac{C_n}{\sqrt{\Phi_n(\xi)}} \int_0^\xi \Phi_n(u) du, \quad (33)$$

где  $\Phi_n \equiv \Phi_{\lambda_n}$ ,  $N_1, N_2$  – пределы нумерации корней уравнения (32) (в типичном случае  $N_1 = 0, N_2 = \infty$ ).

Выполнение начального условия подразумевает выполнения уравнения:

$$\sum_{n=N_1}^{N_2} \frac{C_n}{\sqrt{\Phi_n(\xi)}} \int_0^\xi \Phi_n(u) du \equiv \sum_{n=N_1}^{N_2} C_n F_n(\xi) = T_0 - T_\infty(\xi), \quad (34)$$

которое следует рассматривать как уравнение на коэффициенты  $C_n$ . В отличие от частного случая, рассмотренного в [8], в рассматриваемой задаче нет простой возможности установить ортогональность и даже полноту системы функций

$$F_n(\xi) = \frac{1}{\sqrt{\Phi_n(\xi)}} \int_0^\xi \Phi_n(u) du \quad (35)$$

на отрезке  $[0; \xi_\ell]$  в общем случае. Для решения поставленной задачи достаточна *относительная полнота*: линейная (а не произвольная!) функция должна быть разложима по системе  $F_n$ . При этом для системы коэффициентов  $C_n$  получается конечная или бесконечная система линейных уравнений:

$$G \cdot C = P, \quad (36)$$

где  $C$  – столбец коэффициентов,  $P$  – столбец правой части, элемент которого вычисляется по формуле:

$$P_m \equiv \int_0^{\xi_\ell} \rho(\xi) F_m(\xi) (T_0 - T_\infty(\xi)) d\xi, \quad (37)$$

$\rho(\xi)$  – некоторая весовая функция,  $G$  – симметричная матрица Грама, элементы которой вычисляются по формулам:

$$G_{nm} \equiv \int_0^{\xi_\ell} \rho(\xi) F_n(\xi) F_m(\xi) d\xi. \quad (38)$$

Весовая функция  $\rho$  нужна для правильного определения ортогональности функций  $F_n$ , если таковая вообще имеет место. В случае отсутствия относительной полноты, метод разделения переменных неприменим для решения рассматриваемой задачи.

### 5.Пример: универсальный линейно- неоднородный слой

Рассмотрим модель линейно-неоднородной среды, в которой неоднородные свойства всех физических характеристик слоя обусловлены общим фактором, приводящим к их универсальной линейной зависимости:

$$\sigma = \sigma_0 L(x); \quad \rho = \rho_0 L(x); \quad c_m = c_0 L(x), \quad (39)$$

где  $\sigma_0, \rho_0, c_0$  – константы, определяющие значения этих величин при  $x = 0$ ,

$$L(x) = 1 + k \frac{x}{\ell} \quad (40)$$

– универсальная безразмерная линейная зависимость, содержащая параметр  $k$ , определяющий во сколько раз значение величины на внешнем крае отличается от ее начального значения на внутреннем – для все трех величин в рассматриваемом случае универсального слоя в одно и тоже число раз  $1 + k$ . В этом случае для тепловой координаты получаем:

$$\xi(x) = \frac{1}{\sigma_0} \int_0^x \frac{du}{L(u)} = \frac{\ell}{k\sigma_0} \ln L(x), \quad (41)$$

а для обратной функции и зависимости  $L(x)$ :

$$x = \frac{\ell}{k} (e^{k\sigma_0\xi/\ell} - 1); \quad L(x) = e^{k\sigma_0\xi/\ell}. \quad (42)$$

Мастер-уравнение Риккати (16) принимает вид:

$$\varphi' + \varphi^2 + \Lambda_0 e^{K\xi} = 0, \quad (43)$$

где

$$\Lambda_0 = \lambda\sigma_0\rho_0c_0; \quad K = 3k\sigma_0/\ell. \quad (44)$$

Полагая  $\varphi = u'/u$  и переходя к новой переменной

$$s = 2\sqrt{\Lambda_0}e^{K\xi/2}/K, \quad (45)$$

уравнение (42) приводится к виду:

$$s^2 \frac{d^2u}{ds^2} + s \frac{du}{ds} + s^2u = 0 \quad (46)$$

– уравнения Бесселя для цилиндрических функций нулевого порядка. В качестве частного решения возьмем функцию Бесселя  $J_0(s)$ . С учетом рекуррентной формулы:

$$J'_n(x) = \frac{n}{x}J_n - J_{n+1} \quad (47)$$

тогда получаем:

$$\varphi = -\sqrt{\Lambda_0}e^{K\xi/2} \frac{J_1(s)}{J_0(s)}, \quad (48)$$

а для функции  $\Phi$  по (23):

$$\Phi(\xi) = \exp\left(-2 \int_0^\xi \varphi(u) du\right) = \exp\left(-2 \int_0^\xi \frac{d \ln J_0}{d\xi}\right) = \frac{J_0^2(s(0))}{J_0^2(s(\xi))}. \quad (49)$$

С учетом того, что  $\xi_\ell = \ell \ln(1+k)/k\sigma_0$ , уравнение на спектр  $\{\lambda_n\}$  принимает вид:

$$\frac{1}{J_0^2(\eta)} = \left(\frac{K\eta}{2} \cdot \frac{J_1(\eta)}{J_0(\eta)} - \beta\right) \int_0^{\xi_\ell} \frac{du}{J_0^2(s(u))}, \quad (50)$$

где здесь и далее

$$\eta = \frac{2\sqrt{\Lambda_0}}{K} e^{K\xi_\ell/2} = (1+k)^{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{\Lambda_0}}{K}; \quad \eta_0 = \frac{2\sqrt{\Lambda_0}}{K}, \quad (51)$$

при этом искомый параметр  $\lambda$  входит в  $\eta$  и  $\eta_0$  через  $\Lambda_0$  по формуле (44). Переходя к новой переменной  $s$  в интеграле в правой части (50) приходим к определенному интегралу, который вычисляется через функции Бесселя:

$$\int_0^{\xi_\ell} \frac{du}{J_0^2(s(u))} = \frac{2}{K} \int_{\eta_0}^{\eta} \frac{ds}{s J_0^2(s)} = \frac{\pi}{K} \frac{Y_0(s)}{J_0(s)} \Big|_{\eta_0}^{\eta}, \quad (52)$$

где  $Y_0$  – функция Бесселя второго рода нулевого порядка. С учетом (52) уравнение на спектр  $\{\lambda_n\}$  после некоторых элементарных преобразований приводится к виду:

$$\frac{2}{\pi} = \left(\eta J_1(\eta) - \frac{2\beta}{K} J_0(\eta)\right) \left(Y_0(\eta) - \frac{Y_0(\eta_0)}{J_0(\eta_0)} J_0(\eta)\right). \quad (53)$$

Рассмотрим теперь конкретную ситуацию с характерными параметрами (в системе СИ, единицы не указываются):

$$\rho_0 = 3 \cdot 10^3; c_0 = 10^3; \sigma_0 = 1; \ell = 10^{-2}; \beta = 3; k = 0.5.$$

$$T_0 = 300; \quad T_1 = 1500.$$

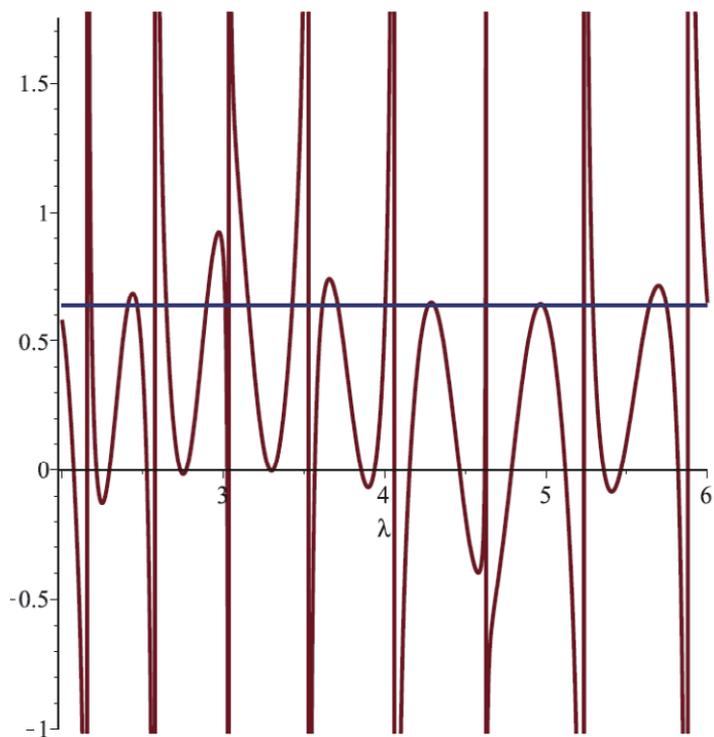
Таким образом, на внешней границе все параметры в полтора раза боль-

ше их значений на внутренней границе. Для этих значений получаем следующие значения вспомогательных параметров задачи:

$$K = 150; L_0 = 3 \cdot 10^6 \cdot \lambda; \eta_0 \approx 23\sqrt{\lambda}; \eta \approx 42\sqrt{\lambda}$$

$$\frac{2\beta}{K} \approx 0.04; \xi_\ell \approx 0.0081$$

Подставляя эти параметры в уравнение (53), получаем конкретное трансцендентное уравнение, зависящее только от  $\lambda$ . Характерное (довольно нерегулярное!) чередование его корней представлено на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Красная кривая (кроме вертикальных асимптот) – график правой части уравнения (50) при выбранных значениях параметров, горизонтальная прямая – график постоянной левой части. Корнями (50) являются точки пересечения этих линий. Их последовательность бесконечна, но нерегулярна**

На промежутке  $\lambda \in (0,10]$  численно (с точностью до 1%) находится следующий массив из 60 решений:  $\{\lambda_n\} =$

0.0033,	0.00545,	0.0175,	0.043,	0.060,	0.080,	0.127,	0.170,	0.186,	0.256,
0.335,	0.337,	0.429,	0.53,	0.56,	0.65,	0.78,	0.83,	0.91,	1.06,
1.16,	1.23,	1.39,	1.54,	1.58,	1.76,	1.97,	1.98,	2.19,	2.41,
2.48,	2.65,	2.90,	3.0,	3.2,	3.4,	3.62,	3.73,	4.0,	4.27,
4.31,	4.62,	4.95,	4.99,	5.29,	5.65,	5.75,	6.00,	6.40,	6.57,
6.77,	7.15,	7.44,	7.57,	7.98,	8.37,	8.42,	8.84,	9.30,	9.38.

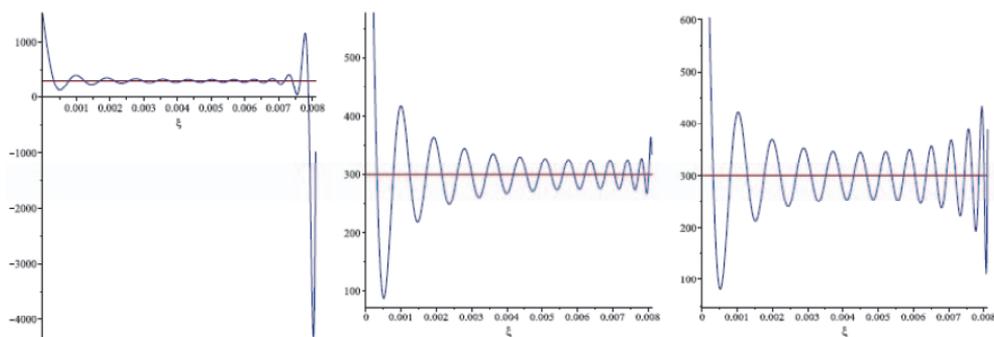
С учетом квадратуры (52) отрезок общего решения (33) можно переписать в более простом виде без явных квадратур:

$$T_g(t, \xi) = 1500 - 3514\xi + \sum_{n=1}^{60} C_n e^{-\lambda_n t} \left( Y_0(23\sqrt{\lambda_n} e^{75\xi}) - \frac{Y_0(23\sqrt{\lambda_n})}{J_0(23\sqrt{\lambda_n})} J_0(23\sqrt{\lambda_n} e^{75\xi}) \right). \quad (54)$$

Ввиду того, что вопрос об ортогональности системы координатных функций при различных  $\lambda_n$  в рассматриваемом примере остается открытым (вывод условия ортогональности в этом случае, вероятно, потребует весьма тонких свойств функций Бесселя.), коэффициенты  $C_n$  намного проще найти, минимизируя квадратичную метрику в пространстве функций:

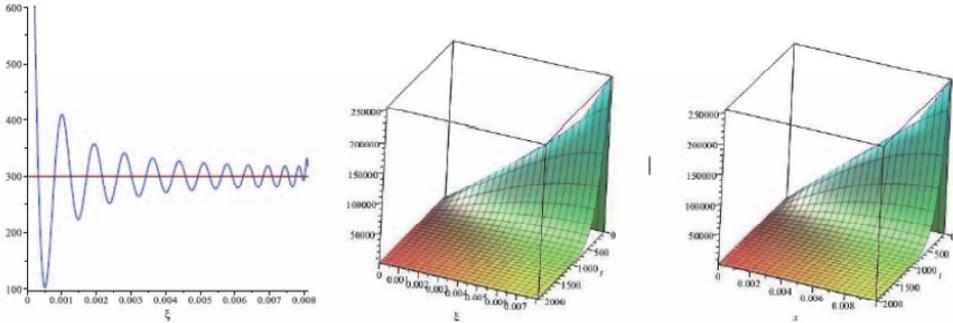
$$d^2(T_g(0, \xi), T_0) \equiv \sum_{i=1}^N (T_g(0, \xi_i) - T_0)^2, \quad (55)$$

по параметрам  $C_i$  при некотором достаточно большом числе  $N$  точек сравнения. Система уравнений  $\partial d^2 / \partial C_i = 0$  является линейной и процедура ее решения успешно реализуется в любом пакете вычислений (значения коэффициентов не приводим – они все порядка  $10^5$  и имеют разные знаки). Для контроля точности приведем графики  $T_g(0, \xi)$  в сравнении с истинным начальным распределением температуры при различных  $N$ .



**Рисунок 2 – Начальное условие  $T_g(0, \xi) = 300$  при  $0 < \xi \leq \xi_\rho \approx 0.008$  и  $T_g(0, 0) = 1500$ , разложенное по функциям Бесселя с коэффициентами, минимизирующими метрику (25): слева – при  $N = 35$ , посередине – при  $N = 100$ , справа – при  $N = 500$**

Из приведенных графиков видно, что при выбранном способе расчета коэффициентов  $C_i$  и их выбранном количестве начальное условие выполняется лишь «в среднем», при этом наибольшая амплитуда отклонений приходится на края интервала – внутреннюю и внешнюю границу слоя. Зависимость качества аппроксимации от числа  $N$  точек сравнения оказывается не монотонной: при больших  $N$  амплитуда отклонений не уменьшается, а растет. Экспериментальным методом была найдена самая удовлетворительная аппроксимация для 60 коэффициентов при  $N = 50$  – она представлена на левом рисунке 3. В результате, общий характер решения  $T_g(t, \xi)$  и  $T_g(t, x)$  (после перехода к более наглядной физической координате) иллюстрируется парой графиков справа на рисунке 3.

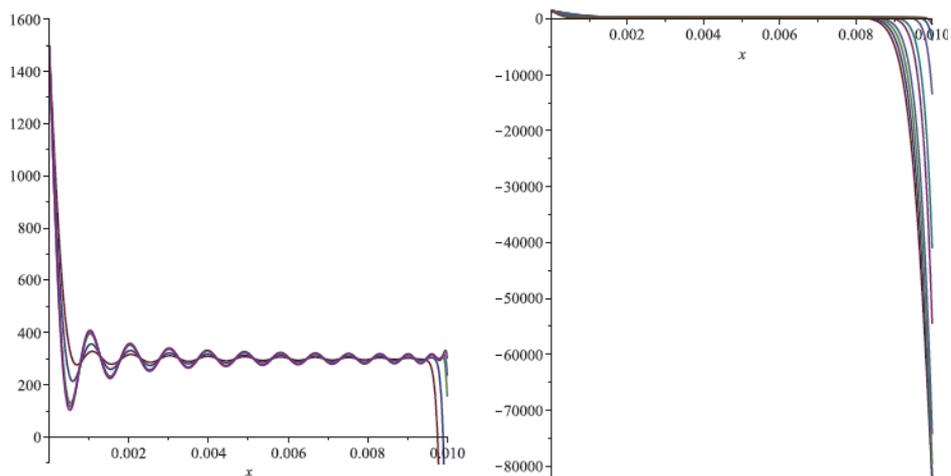


**Рисунок 3 – Слева – аппроксимация начального условия при  $N = 50$ ; посередине зависимость  $T_g(t, \xi)$ , справа – зависимость  $T_g(t, x)$**

В точной постановке картина тепловых потоков в рассматриваемой задаче выглядела бы примерно так. Тепло от более нагретой границы в виде импульса с расплывающимся передним фронтом распространяется в сторону наружной границы, на которой некоторое время вообще ничего не происходит. В какой-то момент тепловой импульс достигает наружной границы и на ней начинается нестационарный теплообмен с окружающей средой. Задняя часть фронта теплового импульса будет перестраиваться, приспособливаясь под этот теплообмен до тех пор, пока в каждой точке слоя не установится стационарное распределение температуры и теплового потока. В рассматриваемой приближенной по начальным условиям постановке мы будем иметь дело с эволюцией температурных возмущений, обусловленных приближенным характером аппроксимации начальных условий. В некотором смысле в методе разделения переменных это обстоятельство является неизбежным, поскольку любой реальный расчет будет иметь дело лишь с конечным числом членов разложения по функциям Бесселя, что всегда будет приводить к возмущенному решению. Любопытной особенностью неоднородной задачи в возмущенной постановке является наличие пары тепловых импульсов – отрицательного и положительного, максимально проявляющих себя на границах, где имеются скачки тепловых характеристик системы (на приведенных рисунках хорошо виден только один положительный).

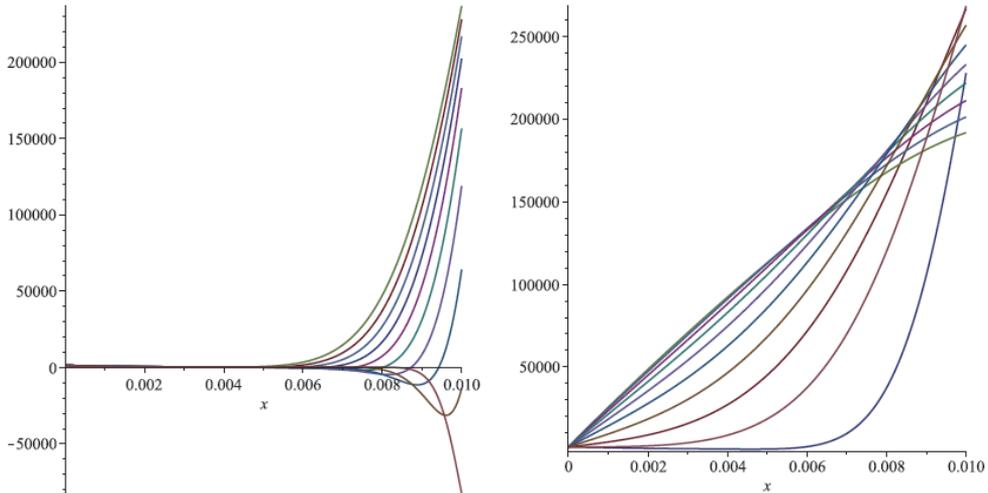
Для их лучшей визуализации рассмотрим подходящие сечения 2-мерных зависимостей. Временная эволюция температуры в рассматриваемой неоднородной возмущенной системе условно делится на 6 этапов. В течение первого этапа ( $t \in [0; 0.1]$ , рис. 4 слева) происходит релаксация температурных колебаний (это – артефакт погрешности аппроксимации начальных условий) и формирование отрицательного температурного импульса на внешней границе: температура там начинает довольно стремительно уменьшаться за счет начальной возмущенной разности температур и лучшего оттока тепла со стороны внешней границы в окружающее пространство. Второй этап характеризуется развитием отрицательного импульса ( $t \in [0.1; 1]$ , рис. 4 справа): внешняя область слоя сильно охлаждается, в то время как его внутренняя часть остается практически в начальном со-

стоянии, поскольку тепло от источника на внутренней границе не успевает за столь малое время поступить туда из-за малой теплопроводности внутренних слоев.



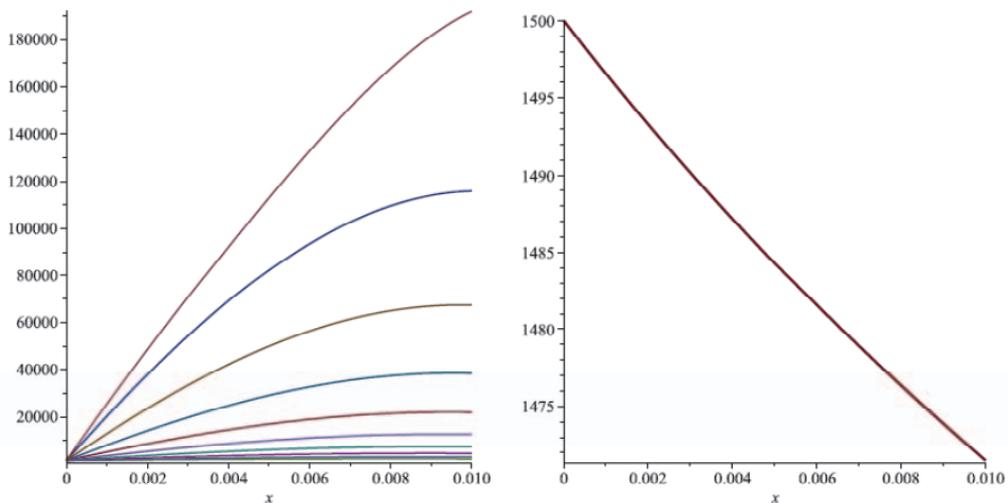
**Рисунок 4 – Слева – профили температуры вдоль координаты слоя при временах  $t = 0, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1$  (с течением времени амплитуды колебаний температуры уменьшаются, а на правой (внешней) границе слоя формируется отрицательный температурный импульс – импульс охлаждения); справа – профили температуры при временах  $t = 0.1, 0.2, 0.4, 0.5, 0.7, 0.8, 0.9, 1$  (с течением времени импульс охлаждения на внешней границе увеличивается по абсолютной величине и проникает глубже внутрь)**

Через некоторое время источник тепла «накачивает» тепловой энергией объем слоя и за счет неоднородности в нем формируется положительный тепловой импульс, который снова концентрируется на внешней границе, но уже в форме ее сильного локального разогрева в течение небольшого промежутка времени. Переход от отрицательного импульса к положительному и развитие положительного импульса в течение промежутка [1; 10] показано на рисунке 5 слева. Далее, в промежутке  $t \in [10; 100]$  тепловой импульс распространяется вглубь слоя, «размазывается» по нему и начинает спадать по амплитуде, поскольку сильное повышение температуры на внешней границе усиливает теплообмен с окружающей средой и температура внешней границы начинает падать (рис. 5 справа).



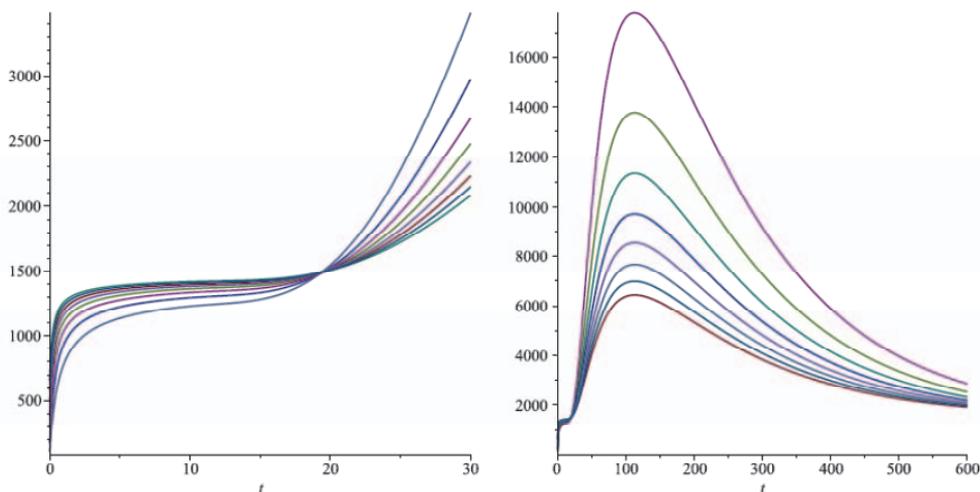
**Рисунок 5 – Слева – профили температуры вдоль координаты слоя при временах  $t = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$  (с течением времени отрицательный температурный импульс переходит в положительный, который проникает вглубь слоя влево; справа – профили температуры при временах  $t = 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100$  (с течением времени импульс разогрева на внешней границе проникает глубже внутрь и релаксирует по объему в распределение с почти постоянным градиентом )**

Далее, тепловой поток начинает приближаться к своему стационарному распределению (см. рис. 6).



**Рисунок 6 – Слева – выход на стационарный режим при временах  $t = 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000$  (с течением времени слой остывает и переходит в стационарный тепловой режим, который изображается графиком, прижатым к горизонтальной оси); справа – стационарный тепловой режим (в рассматриваемом неоднородном случае в физических координатах это слабо выраженная логарифмическая кривая)**

Положительный тепловой импульс на внутреннем крае удобно наблюдать на сечениях  $x = \text{const}$  в виде временных зависимостей температуры в фиксированных точках слоя вблизи внутренней границы (см. рис. 7).



**Рисунок 7** – Слева – временная эволюция температуры в диапазоне  $t \in [0; 30]$  в точках, отстоящих от границы на  $1/50, 1/45, 1/40, 1/30, 1/25, 1/20, 1/15$  от толщины слоя (у кривых, характеризующих более близкие к внутренней границе точки, левые части выше, а правые ниже); справа – то же, но на промежутке  $t \in [0; 600]$

Из рисунков 7 следует, что сначала прогреваются близлежащие к источнику слои, причем за 20с температуры в прилежащих точках выравниваются за счет более быстрого оттока тепла со стороны удаленных точек, а затем наблюдается четко выраженный положительный импульс, который нарастает по мере удаления от источника тепла.

Оба импульса (положительный и отрицательный) частично являются откликом на возмущения начальных условий, а их значительная величина говорит о том, что задача обладает плохой устойчивостью к возмущениям начальных условий, что связано с относительной медленностью сходимости ряда из функций Бесселя, особенно на концах интервала области определения решения. Пренебрежение членами ряда с большими  $\lambda$  влияет как раз на начальную фазу динамики процесса, так как таким  $\lambda$  соответствует малые времена релаксации  $\tau \sim 1/\lambda$ , в которые и формируется начальная фаза вместе с начальными условиями. Разумеется, значительные величины импульсов (порядка  $10^5$  в одну и другую сторону знака температур) не имеют физического смысла, поскольку уже при гораздо более меньших амплитудах колебания температуры условие применимости линейной модели теплопроводности нарушается и нелинейные члены, (например, кубичные по градиенту температуры) неизбежно включающиеся в тепловую динамику, будут оказывать демпфирующую роль для тепловых колебаний. Величины импульсов говорят лишь о неустойчивости модели (или, правильнее ска-

зать, асимптотической устойчивости, при которой асимптотический стационарный режим неизбежно достигается, но характер эволюции в его направлении кардинально зависит от малых начальных возмущений) и необходимости учета нелинейных членов в уравнении теплопроводности.

### 6. Расчет для $Al_2O_3$

Рассмотрим более детально задачу о неоднородном слое при следующих реалистичных начальных и граничных параметрах (в единицах СИ, если не указаны):

$$\beta = 10; \quad \ell = 0.001; \quad T_1 = 1400^\circ C; \quad T_0 = 30^\circ C \quad (56)$$

для оксида алюминия  $Al_2O_3$

$$\rho = 4000; \quad c = 750; \quad \sigma = 20. \quad (57)$$

Будем считать, что параметры плотности, теплоемкости и теплопроводности меняются по схеме универсального слоя на 20% на толщине слоя. В этом случае приведенные табличные параметры надо считать значениями в середине слоя, а на границах они будут отличаться на 10% в одну и в другую сторону. Таким образом, теоретические начальные параметры  $(\rho_0, c_0, \sigma_0)$  получаются из приведенных делением на универсальный коэффициент 1.1. Вычисления по формулам (44),(51) приводит к следующим теоретическим величинам:

$$A_0 \approx 4.5 \cdot 10^7 \lambda; \quad K \approx 10909.1; \quad \eta \approx 1.62\sqrt{\lambda}; \quad \eta_0 \approx 1.24\sqrt{\lambda}. \quad (58)$$

Уравнение (53) на  $\lambda_n$  решается с помощью специальной оптимизированной процедуры. Его первые 100 корней представлены ниже:

2.210000000	11.64775000	14.72335375	28.57868453	53.22563028
85.28424301	124.6752870	146.0670415	172.4660675	226.0625443
289.6280379	359.4565950	410.1296618	434.9908067	522.1132744
611.3081427	715.6765008	802.0795226	938.8650561	1183.653907
1468.954788	1778.861800	1958.297515	2135.441469	2307.162508
2492.594114	2692.928800	2774.718337	2913.863200	3118.529348
3337.849730	3572.595811	3680.947415	3791.917595	4057.906678
4546.185427	4775.936091	5111.400371	5675.331737	6245.684564
6873.104788	7219.897129	7438.228004	8257.524738	8591.922210
8937.271085	10100.84308	10510.69466	10828.06476	11262.77421
11715.45872	12186.34050	12554.28512	13434.92480	13842.37574
14259.68428	15259.94870	16180.54696	17317.78824	18189.36385
20012.65813	22223.16698	24678.76789	25678.19662	26967.10361
28052.23231	30021.31419	33033.29100	34369.68252	36094.84863
38991.06238	42124.82841	43404.24208	48619.14819	50103.79716
51614.33432	53170.31702	56900.01913	60332.66878	62159.81209
65898.53653	69212.15700	73381.45452	77805.18831	84051.72202
86604.50635	97009.81099	$1.019123281 \cdot 10^5$	$1.070324571 \cdot 10^5$	$1.124096808 \cdot 10^5$
$1.281739221 \cdot 10^5$	$1.359431785 \cdot 10^5$	$1.414197520 \cdot 10^5$	$1.471039249 \cdot 10^5$	$1.530165025 \cdot 10^5$
$1.606968904 \cdot 10^5$	$1.735910436 \cdot 10^5$	$1.892787079 \cdot 10^5$	$1.950355075 \cdot 10^5$	$2.028657119 \cdot 10^5$

(59)

Далее, по образцу предыдущего примера коэффициенты разложения в (33) отыскиваются минимизацией метрического функционала (25) (оптимальное число  $N = 200$ ). При этом для стационарного режима:

$$T_{\infty} \approx 1400 - 13693\xi; \quad \xi_{\ell} \approx 0.00005. \quad (60)$$

Как и в рассмотренном выше общем примере, тепловая динамика неоднородного слоя  $Al_2O_3$  характеризуется несколькими температурными импульсами различного знака, часть которых обусловлена погрешностью аппроксимации начального условия. Рассмотрим их последовательно с помощью надлежащих временных сечений.

На рисунке 8 приведено распределение температуры вдоль слоя при  $t = 0$  и при  $t_1 = 20$  мкс.

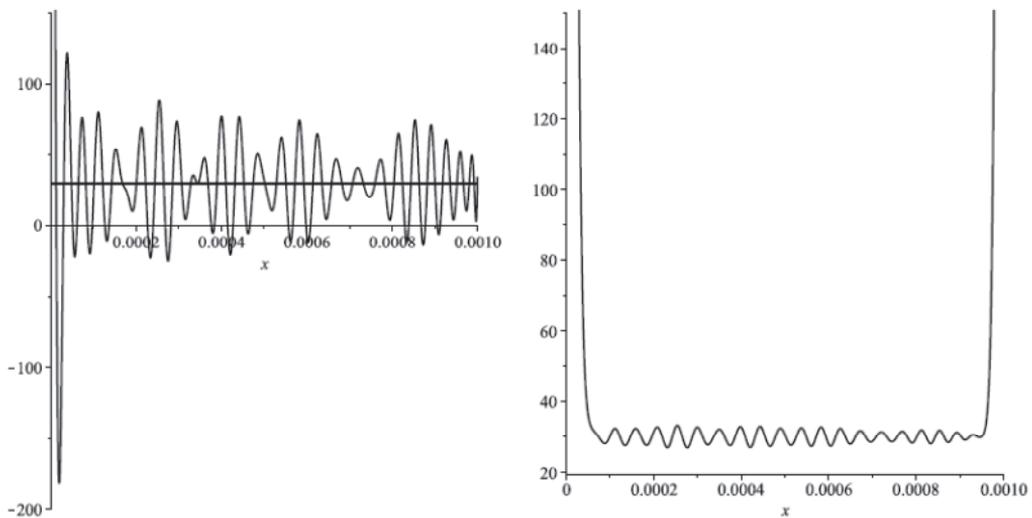
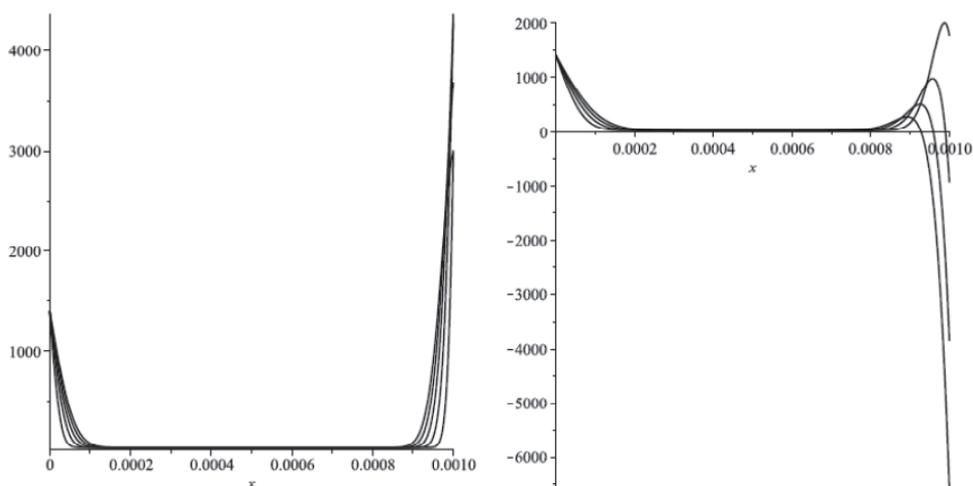


Рисунок 8 – Слева:  $T(0, x)$  и  $T_0 = 30$ ; справа:  $T(2 \cdot 10^{-5}, x)$

Как и ранее, начальное условие реализуется сотней членов ряда из функций Бесселя лишь в среднем (хотя и лучше, чем шестидестью членами). На рассматриваемом интервале  $[0, t_1]$  происходит сглаживание температурных флуктуаций внутри слоя и формирование двух положительных тепловых импульсов на его краях. При этом тепловой импульс на внутренней границе релевантен задаче, но пока еще слабо выражен, а на наружной границе он выражен отчетливо, но при этом является артефактом аппроксимации начального условия. С учетом того, что начальные условия на практике точно не реализуются, динамика их флуктуаций также представляет интерес. Таким образом, можно сделать первое полезное наблюдение: температурные флуктуации в внутри неоднородного слоя демпфируются, а на его внешнем крае в начальный момент усиливаются. Время  $t_1$  по порядку величины определяет характерное время затухания начальных флуктуаций и одновременно время формирования положительного температурного импульса на внешней границе.

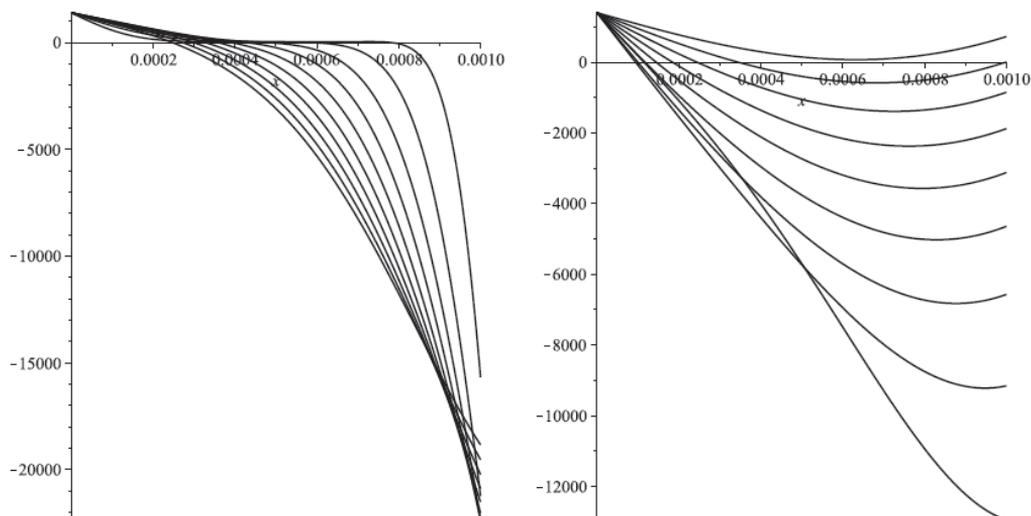
На рисунке 9 приведено распределение температуры вдоль слоя при на

интервалах [30,150] мкс и [200; 500] мкс.



**Рисунок 9 – Слева:  $T(t, x)$  при  $t = 30, 60, 90, 120, 150$  мкс (поздние кривые внутри ранних); справа:  $T(t, x)$  при  $t = 200, 300, 400, 500$  мкс. (более поздние кривые слева правее более ранних, а справа – ниже)**

На рисунке 10 приведено распределение температуры вдоль слоя на интервалах [1,10] мс и [20; 100] мс.



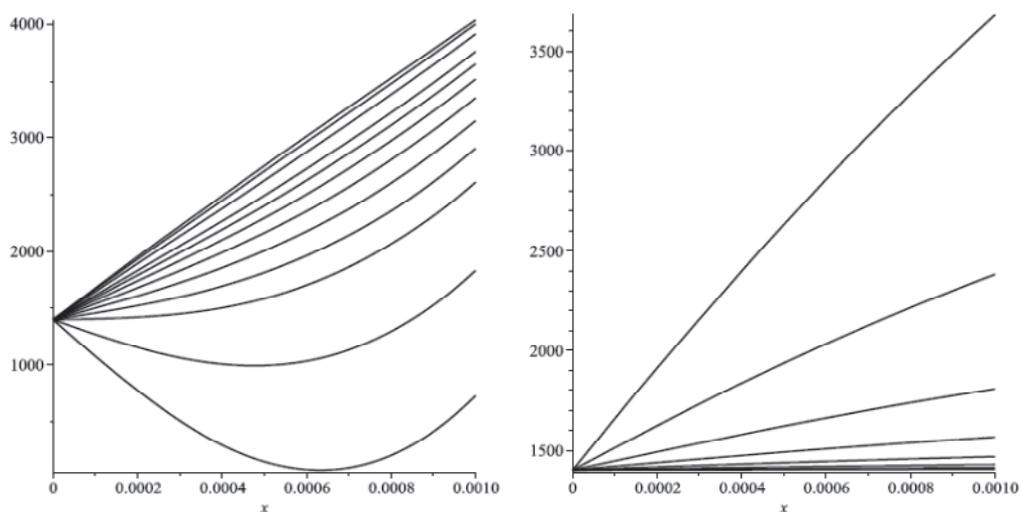
**Рисунок 10 – Слева:  $T(t, x)$  при  $t = 1 – 10$  мс (через 1 мс, поздние кривые круче ранних); справа:  $T(t, x)$  при  $t = 20 – 100$  мс (через 10 мс, более поздние кривые выше ранних)**

На первом интервале фронты внутреннего и внешнего тепловых импуль-

сов распространяются внутрь слоя примерно на 1/10 его часть, при этом амплитуда внешнего импульса нарастает за счет концентрации тепловой энергии флуктуаций на внешней границе слоя. На втором интервале внешний положительный импульс постепенно переходит в противоположную фазу отрицательного – эффект усиления температурной волны на внешней границе. При этом релаксация конкурирует с усилением, поэтому усилиться успеет (как мы увидим далее) лишь одно полное колебание. Таким образом, время  $t_2 = 500$  мкс по порядку величины характеризует начало распространения вглубь слоя отрицательного температурного импульса: в этот момент внутренняя часть слоя разогрета, а наружная сильно переохлаждена и эти области будут далее сближаться.

Первый интервал описывает сближение холодного и теплого фронтов внутри слоя что происходит где-то в окрестности границы внутренней трети слоя, при этом распределение температуры становится более плавным, с правильным знаком градиента (отрицательным), но сильно неравновесным, так как внешняя граница сильно переохлаждена. Время  $t_3 = 10$  мс примерно соответствует времени самого сильного переохлаждения слоя. Эта ситуация выравнивается на втором интервале, причем внешний край с большей теплопроводностью нагревается за счет тепла, поступающего из окружающей среды, быстрее, а средние части отстают, из за чего в средней части слоя образуется характерная «температурная яма», которая к концу второго интервала практически полностью релаксирует. Время  $t_4 = 100$  мс характеризует окончание «холодной фазы» слоя.

На рисунке 11 приведено распределение температуры вдоль слоя при на интервалах  $[0.1, 0.26]$  с и  $[0.4; 3.2]$  с.

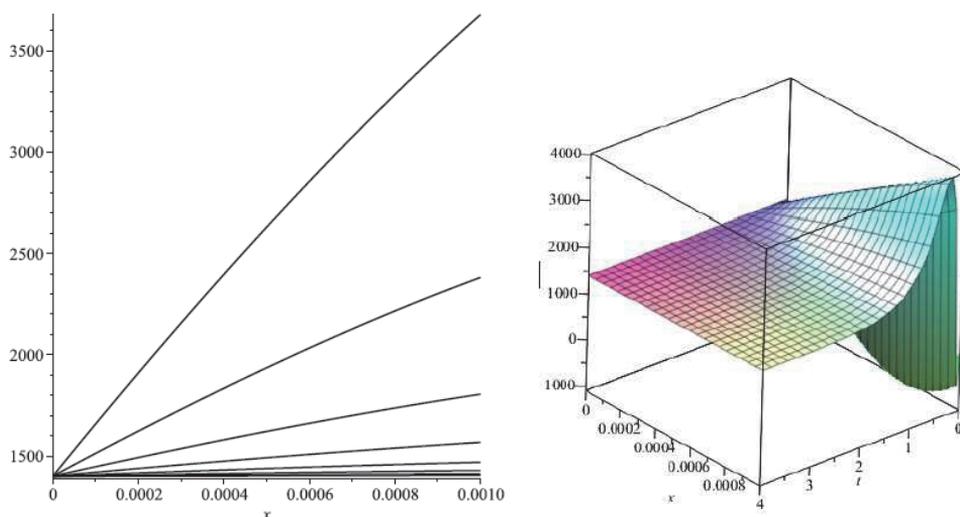


**Рисунок 11 – Слева:  $T(t, x)$  при  $t = 0.1, 0.12, 0.14, 0.15, 0.16, 0.17, 0.18, 0.19, 0.20, 0.22, 0.24, 0.26$  с (снизу вверх); справа:  $T(t, x)$  при  $t = 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0, 2.4, 2.8, 3.2$  с (сверху вниз)**

На первом интервале мы наблюдаем положительную фазу следующей

тепловой волны, в которой слой снова прогревается, но уже не столь интенсивно, как от предыдущего теплового импульса. В конечной стадии этой фазы устанавливается инверсный градиент температуры (положительный), который является неустойчивым. Время  $t_5 = 0.26$  определяет завершение стадии колебаний и начало перехода в стационарный режим. На втором интервале происходит перестройка температурного профиля: инверсный градиент уменьшается по модулю почти однородно по всей толщине слоя.

Конечные стадии перестройки и выход на стационарный режим показаны на рисунке 12.



**Рисунок 12 – Слева:  $T(t, x)$  при  $t = 3.9, 4.0, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 5.0$  с (сверху вниз); справа: полная зависимость  $T(t, x)$**

Любопытно, что около момента  $t_6 = 4.1$  профиль температуры почти постоянный (средний градиент близок к нулю). При  $t = t_7 = 5$  слой практически переходит в стационарный режим. На том же рис. 12 представлена 2-мерная зависимость в физических координатах  $(t, x)$ , из которой все приведенные выше графики получают как надлежащие сечения при различных  $t$ .

### Заключение

В настоящей работе предложен метод расчета нестационарного профиля распределения температуры по сечению покрытия, наносимого на металл газотермическим способом, при неоднородном распределении коэффициента теплопроводности по сечению. Проанализирована динамика тепловых импульсов при установлении равновесного распределения температуры. В качестве примера рассмотрено нестационарное решение для кремнического покрытия на основе оксида алюминия с линейной зависимостью коэффициента теплопроводности по координате сечения. Показано, что тепловая динамика неоднородного слоя  $Al_2O_3$  характеризуется несколькими температурными импульсами различного знака.

Предлагаемая методика может быть полезной при моделировании процессов теплообмена изделий со специальными видами покрытий.

*Литература*

1. Газотермическое напыление / под общей ред. Л.Х. Балдаева. М.: Маркет ДС, 2007. 344 с.
2. Гецов Л.Б. Детали газовых турбин. Л.: Машиностроение, 1982. 296 с.
3. Егоров А.И. Уравнения Риккати. М.: Физматлит, 2001. 448 с.
4. Коломыцев П.Т. Высокотемпературные защитные покрытия для никелевых сплавов. М.: Металлургия, 1991. 239 с.
5. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. М.: Металлургия, 1992. 432 с.
6. Панков В.П., Бабаян А.Л., Куликов М.В., Коссой В.А., Варламов Б.С. Теплозащитные покрытия лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей // Ползуновский вестник. 2021. № 1. С. 161-172. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.023.
7. Полянин А.Д., Зайцев В.Ф. Справочник по нелинейным уравнениям математической физики. М.: Физматлит, 2002. 432 с.
8. Соловьев М.Е., Раухваргер А.Б., Балдаев С.Л., Балдаев Л.Х., Мищенко В.И. Численное моделирование теплофизических свойств порошковых покрытий металлов // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. 2023. Т. 25. № 1. С. 5-15. doi: 10.15593/2224-9877/2023.1.01.
9. Chen H.F., Zhang C., Liu, Y.C. Song P., Li W.-X., Yang G., Liu B. Recent progress in thermal/environmental barrier coatings and their corrosion resistance. Rare Met. 2020. V. 39. P. 498-512. doi: 10.1007/s12598-019-01307-1.
10. Davis J.R. Handbook of thermal spray technology. ASM International, 2004. 338 p.
11. Jhavar S., Jain N.K., Paul C.P. Development of micro-plasma transferred arc ( $\mu$ -PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications // Journal of Materials Processing Technology. 2014. V. 214. P. 1102-1110. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.12.016.
12. Yedida VV S., Mehta A., Vasudev H., Singh S. Role of numerical modeling in predicting the oxidation behavior of thermal barrier coatings // International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). 2023. 10 p. doi: 10.1007/s12008-023-01306-8.

УДК 620.178: 678.5

**Обоснование состава новых композиционных материалов для подшипников скольжения и уплотнительных элементов технологического оборудования**

**Татьяна Ивановна Пашковская**, доктор педагогических наук, профессор кафедры «Техника и технология», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

*В статье приведены результаты аналитических исследований влияния различных компонентов на структурирование и конечные характеристики композиционного материала. В качестве наполнителя для композиционного полимерного материала предложено химическое соединение на основе меди, способствующее улучшению физико-механических характеристик и эксплуатационных свойств.*

Композиционный материал, структурирование, физико-механические характеристики, эксплуатационные свойства.

**Rationale for the use of a composite material to increase the service life of plain bearings and sealing elements of process equipment**

**Tatyana Ivanovna Pashkovskaya**, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor Department of Engineering and Technology, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

*The article presents the results of analytical studies of the influence of various components on the structuring and final characteristics of a composite material. As a filler for a composite polymer material, a chemical compound based on copper is proposed, which improves the physical and mechanical characteristics and operational properties.*

Composite material, structuring, physical and mechanical characteristics, operational properties.

Изнашивание полимерных материалов при трении является одним из наиболее сложных многофакторных физико-химических процессов. Срок службы деталей из полимерных композиционных материалов зависит, прежде всего, от их химического строения и физической структуры связующего, физического со-

стояния полимера в зоне фрикционного контакта, вида и количества наполнителей, материала сопряженной детали и рельефа контактирующих поверхностей [6].

Энергетические и внешние условия эксплуатации (давление, скорость, температура, присутствие химически активной среды и др.) влияют на изнашивание полимерного материала как непосредственно, так и опосредованно, через изменение его физико-механических характеристик [2].

На срок службы и характеристики композиционного полимерного материала для подшипников скольжения и уплотнительных элементов машин и технологического оборудования оказывают влияние следующие факторы: тип и количество инициатора, ускорителя, наполнителя и температура отверждения.

Нами установлено, что для композиционного материала на основе ненасыщенной полиэфирной смолы ПН-1 в качестве инициатора целесообразно использовать гипериз  $G$  в количестве 1-10 мас. ч., в качестве ускорителя – нафтенат кобальта  $HK$  в количестве 1-8 мас. ч., в качестве наполнителя  $H$  – закись меди в количестве 0-200 мас. ч. (с точки зрения улучшения триботехнических параметров – 10-60 мас. ч.). Температуру отверждения полимерных композиций целесообразно использовать в пределах от 20 до 90 °С; наиболее предпочтительными температурами являются более низкие, так как не требуют дополнительного оборудования в условиях изготовления деталей или проведения ремонтных работ на предприятиях машиностроения.

Композиционные материалы на основе ненасыщенной полиэфирной смолы ПН-1 именно такого состава могут проявить наилучшее сочетание технологических свойств и физико-механических характеристик.

Для исследования кинетики структурирования полимерных композиций удобно использовать метод замера твердости по Бринеллю  $HB$  и модуля упругости при статическом изгибе  $E_u$  и анализа их изменения. Существенным фактором является и то обстоятельство, что показатель твердости может быть прямым образом связан с показателями других физико-механических характеристик, например, напряжением:  $\sigma = K(HB)$  [1, 3].

Ряд авторов [6], исследуя кинетику отверждения различных полиэфирных композиций по изменению твердости, получил кинетические графики, состоящие из двух прямолинейных участков, что говорит о непостоянстве скорости структурирования и о первом порядке реакции. Учитывая, что испытания проводились только при 20 °С, можно предположить, что при проведении исследований при повышенных температурах прямолинейных участков на кинетическом графике окажется несколько.

При планировании исследований была поставлена задача определения времени структурирования композиций по участкам и полное время отверждения по изменению твердости  $HB$  в зависимости от содержания инициатора, ускорителя и температуры. На следующем этапе необходимо провести эксперимент с целью получения представления о связи  $E \leftrightarrow HB$  при температурах отверждения в диапазоне от 20° до 90 °С.

Константа скорости на каждом участке кинетического графика пропор-

циональна времени структурирования этого участка, время полного отверждения –  $\tau_{i.i.}$  представляет собой сумму времени отверждения по всем участкам:  
 $\tau_{i.i.} = \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n$ .

По теории радикальной полимеризации, при отверждении композиции, состоящей из смолы и инициатора, с увеличением последнего увеличивается количество активных групп, и процесс структурирования протекает с большей скоростью. Время отверждения на отдельных участках кинетических зависимостей, а следовательно, и полное время отверждения будут уменьшаться. Исходя из вышесказанного, предполагаем, что изменение времени отверждения в этом случае будет линейно связано с количеством введенного инициатора. Эту зависимость можно выразить соотношениями:

$$\frac{1}{\tau_1} = A_1(\Gamma + a_1); \frac{1}{\tau_2} = A_2(\Gamma + a_2); \frac{1}{\tau_{n.o.}} = A_n(\Gamma + a_n) \quad (1)$$

где:  $A_1, A_2, A_n$  – коэффициенты, зависящие от температуры отверждения и природы полимера;  $\Gamma$  – содержание инициатора в мас.ч. от массы смолы;  $a_1, a_2, a_n$  – константы, характеризующие термическое иницирование.

С увеличением температуры отверждения ускоряется термический распад инициатора, количество свободных радикалов значительно возрастает. По кинетическим данным определяется время отверждения по участкам и полное время отверждения композиции. По результатам строим графики в координатах  $\lg \frac{1}{\tau_{n.o.}} \longleftrightarrow \frac{1}{T}$  для различных концентраций инициатора, в результате чего получаем семейство прямых, каждой из которых соответствует уравнение вида:

$$\lg \frac{1}{\tau_{n.o.}} = \frac{A_4}{T} + B_1 \quad (2)$$

где  $A_4, B_1$  – константы, зависящие от свойств отверждаемых композиций.

Используя уравнение (2) для  $\tau_{n.o.}$  определяем  $\tau_{x.n.o.}$  для заданной температуры  $T_2$ , при известном значении  $\tau_{n.o.1}$  при  $T_1$ :

$$\lg \frac{\tau_{n.o.1}}{\tau_{n.o.x}} = \frac{E}{4,57} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (3)$$

Введение ускорителя *НК* вызывает химический распад инициатора, что приводит к резкому увеличению образования свободных радикалов. Скорость структурирования растет, что приводит к уменьшению времени отверждения. Уменьшение времени отверждения будет пропорционально количеству введенного ускорителя.

Совместное влияние инициатора и ускорителя на время отверждения полимерных систем выразится соотношением:

$$\frac{1}{\tau_1^l} = A_1^l(\Gamma + a_1^l)(HK + b_1^l); \quad \frac{1}{\tau_2^l} = A_2^l(\Gamma + a_2^l)(HK + b_2^l);$$

$$\frac{1}{\tau_{n.o.}^l} = A_n^l(\Gamma + a_n^l)(HK + b_n^l)$$
(4)

где  $HK$  – содержание ускорителя в мас.ч. от массы смолы;  $A_1^l, A_2^l, A_n^l$  – коэффициенты, зависящие от температуры отверждения и природы полимера;  $a_1^l, a_2^l, a_n^l$  и  $b_1^l, b_2^l, b_n^l$  – константы, определяемые графически по экспериментальным данным.

Величина констант зависит от эффективности иницирующей системы и представляет собой минимально допустимые количества инициатора и ускорителя.

Температурная зависимость времени полного отверждения при различном содержании инициатора и ускорителя также будет соответствовать закономерности Аррениуса. Поэтому, зная время отверждения какой-либо композиции  $\tau_{n.o.1}$ , задавая значения  $T_2, HK_2$  и  $\Gamma$ , можно определить время полного отверждения  $\tau_{n.o.2}$  по обобщенному уравнению:

$$\lg \frac{\tau_{n.o.1}(\Gamma_2 + a_2^l)(HK_2 + b_2^l)}{\tau_{n.o.2}(\Gamma_1 + a_1^l)(HK_1 + b_1^l)} = \frac{E}{4,57} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$
(5)

На следующем этапе исследований определяется количественное изменение твердости в процессе отверждения композиций в зависимости от различных факторов. Изменение твердости от температуры отверждения композиции при постоянных количествах инициатора и ускорителя представлено зависимостью:

$$d(HB) = -a_4 dt$$
(6)

где  $\frac{d(HB)}{dt}$  – изменение твердости от температуры представляется величиной постоянной.

Интегрируя уравнение (6), получим:

$$\int_{(HB)_0}^{(HB)} d(HB) = a_4 \int_0^t dt; \quad HB + a_4 t = b_4$$
(7)

где  $b_4$  – коэффициент, величина которого зависит от количества НК, природы полимера и т.д.

Анализ работ [6] дает возможность предположить, что зависимость твердости от  $HK$  при постоянном содержании инициатора, с учетом температуры, подчиняется уравнению:

$$(HB + a_4 t) = C_1 + A_5 e^{b_5(HK)}$$
(8)

При проведении экспериментальных исследований рассматривалось содержание  $HK$  в композициях от 1 до 6 мас. ч.

В этом случае уравнение (8) после логарифмирования принимает вид:

$$\lg(HB + a_4 t - C_1) = 0,43b_5(HK - 6) + \lg A_5.$$
(9)

Уравнение (9) в полулогарифмических координатах  $\lg(HB + a_4t - C_1) \leftrightarrow (HK - b)$  выражается прямой линией. Это уравнение позволяет расчетным путем установить зависимость твердости от температуры отверждения и количества  $HK$  в процессе структурирования полиэфирных композиций. Для подтверждения соответствия обобщенного уравнения экспериментально определяются численные значения коэффициентов  $A_5, a_4, b_5, C_1$ .

Проведя анализ зависимости  $E_u$  от  $HB$ , представленной в работе [3], устанавливаем, что она соответствует уравнению вида:

$$E_u = C_2 + a_5(HB)^{b_6}. \quad (10)$$

После преобразования и логарифмирования уравнения (2.15) получим:

$$\lg(E_u - C_2) = b_6 \lg(HB) + \lg a_5. \quad (11)$$

По характеру уравнения (11) видно, что в координатах  $\lg(E_u - C_2) \leftrightarrow \lg(HB)$  оно выражается прямой линией. Для установления справедливости уравнения (11) экспериментально определяются числовые значения коэффициентов  $a_5, b_6, C_2$ .

Установлено, что в композиции с порошкообразным наполнителем величина  $E_u$  лежит в определенных пределах: верхний предел –  $E = (1-C)E_{CB} + CE_u$ ; нижний предел  $E = \frac{E_{CB}E_u}{(1-C)E_u + CE_{CB}}$ , где  $C$  – объемная концентрация наполнителя;  $E_u$  – модуль наполнителя;  $E_{CB}$  – модуль связующего.

Верхние предельные значения модуля соответствуют случаю одинаковой деформации обоих компонентов при наличии адгезии между ними по всей поверхности контакта; нижние – отвечают случаю одинаковых напряжений в компонентах при отсутствии адгезионного взаимодействия между ними.

Твердость  $HB$  с увеличением количества наполнителя может как уменьшаться, так и увеличиваться. Упрочнение композиций происходит тогда, когда наполнитель имеет показатели прочности более высокие, чем у полимера. Уравнения зависимости  $E_u$  от  $HB$  будут, предположительно, аналогичными с уравнениями (10) и (11). Различие будет состоять только в значениях коэффициентов  $a_5$  и  $b_6$ . После графической и математической обработки экспериментальных результатов из уравнения (11) получаем обобщенную зависимость с учетом наполнителя. Соотношение будет иметь вид:

$$\frac{\lg(E_u - C_2) - \lg a_5}{\lg(HB - n^1)} = m^1 H + Z \quad (12)$$

Уравнение (12) описывает зависимость модуля  $E_u$  от твердости  $HB$  и содержания наполнителя  $H$ .

При эксплуатации, как правило, свойства материала ухудшаются, происходит старение. По отношению к скорости старения температура является наиболее влиятельным фактором; в этом случае происходит термоокислительное старение.

Одной из основных задач исследования является установление закономерности изменения физико-механических показателей отвержденных композиций при длительном воздействии повышенных температур. Следует также

выяснить количественное влияние наполнителя на процесс термоокислительного старения.

Кинетику старения изучали по изменению твердости  $HB$ , модуля упругости  $E_u$  и напряжению при статическом изгибе  $\sigma_u$  в зависимости от времени  $\tau$ , температуры  $t$  и содержания наполнителя  $H$ .

При постоянной температуре старения поведение материала описывается функциями:  $\varphi(HB; H; \tau)_{t=const} = 0$ ;  $\varphi(E_u; H; \tau)_{t=const} = 0$ . Эти функции соответствуют семейству кинетических кривых. Каждая кривая будет соответствовать определенному значению  $H$ . Значения параметров будут изменяться со скоростью  $\frac{d(HB)}{d\tau}$ ;  $\frac{d(E_u)}{d\tau}$ . Изменение  $HB$  и  $E_u$  при указанных условиях проходит по следующим закономерностям:

$$HB = B_2 \tau^n ; \quad (13)$$

$$E_u = A_6 \tau^m , \quad (14)$$

где  $A_6, B_2, m, n$  – коэффициенты, зависящие от температуры старения, свойств и состава композиционного материала.

В рассматриваемом случае эти коэффициенты зависят только от наполнителя  $H$ . После логарифмирования уравнений (13) и (14) получим:

$$\lg(HB) = n \lg \tau + \lg B_2 \quad (15)$$

$$\lg E_u = m \lg \tau + \lg A_6 \quad (16)$$

Выражения (15) и (16) представляют собой (в логарифмических координатах) линейную зависимость  $HB$  и  $E_u$  от времени для каждого значения  $H$ . Зависимость коэффициентов  $A_6, B_2, m, n$  от количества  $H$  выразится соотношениями:

$$A_6 = A_6^1(H)^{a_6} , \quad (17)$$

$$B_2 = B_2^1(H)^{b_7} , \quad (18)$$

$$m = m^1(H) , \quad (19)$$

$$n = n^1(H) \quad (20)$$

Тогда обобщенные выражения зависимости  $HB$  и  $E_u$  от  $\tau$  и  $H$  при постоянной температуре старения будут иметь вид:

$$HB = B_2^1(H)^{b_7} \tau^{n_1(H)} , \quad (21)$$

$$E_u = A_6^1(H)^{a_6} \tau^{m_1(H)} \quad (22)$$

Для подтверждения справедливости уравнений (21) и (22) определяются коэффициенты  $A_6, A_6^1, B_2, B_2^1, n, n_1, m, m_1, a_6, b_7$ .

Изменение  $HB$  и  $E_u$  от температуры старения при постоянном количестве  $H$  в композиции представлено зависимостью:

$$d(HB) = -C_3 dt , \quad (23)$$

$$dE_u = -z dt , \quad (24)$$

где  $\frac{d(HB)}{dt}$ ;  $\frac{d(E_u)}{dt}$  изменение твердости и модуля упругости от температуры представляется величиной постоянной. Интегрируя уравнения (23) и (24) получим:

$$\int_{(HB)_0}^{HB} d(HB) = -C_3 \int_0^t dt; \quad HB + C_3 t = C^1, \quad (25)$$

$$\int_{(E_u)_0}^{E_u} d(E_u) = -Z \int_0^t dt; \quad E_u + Zt = Z^1, \quad (26)$$

где  $C^1$  и  $Z^1$  – коэффициенты, величина которых зависит от количества  $H$ , природы полимера и т.д.

Из выражений (25) и (26) видно, что твердость и модуль упругости линейно зависят от температуры старения. Увеличение в композиции наполнителя будет снижать твердость и увеличивать величину модуля упругости. Это влияние выражается графически в координатах  $(HB - at) \longleftrightarrow H$ ;  $(E_u - at) \longleftrightarrow H$ . После математической обработки зависимость  $HB$  и  $E_u$  от  $H$  с учетом температуры представлена выражениями:

$$HB = A \cdot H + C_3 \cdot t + B, \quad (27)$$

$$E_u = A^1 \cdot H + Z \cdot t + B^1. \quad (28)$$

Для подтверждения адекватности уравнений (27) и (28) экспериментально определены коэффициенты  $A, A^1, B, B^1, C_3, Z$ . Изучение кинетики температурного старения композиций по изменению  $\sigma_u$  представляет некоторые трудности, поэтому предполагают, что  $\sigma_u$  при старении будет изменяться по закону:

$$\sigma_u = D \tau^q. \quad (29)$$

При введении в композицию наполнителя выражение (29) примет вид:

$$\sigma_u = (D \tau^q)H. \quad (30)$$

В качестве активных антифрикционных наполнителей полимерных материалов используются мелкодисперсные порошки металлов. В работах [5, 7] показано, что химические элементы, обеспечивающие наилучшие противоизносные свойства материалов, работающих в паре со сталью, расположены, в основном, правее железа в электрохимическом ряду напряжений металлов: медь, серебро, золото и т.д. С целью повышения износостойкости при относительно невысоких экономических затратах, необходимо использовать в качестве наполнителя для композиции на основе ненасыщенной полиэфирной смолы ПН-1 соединения меди, например, закись, которая легко может восстанавливаться до чистого металла. Для улучшения противоизносных свойств полимерных композиционных материалов требуется наполнение не менее 20% мас. и не более 100% мас. [6, 7]. Возможности использования закиси меди в качестве наполнителя для композиций на основе ненасыщенных полиэфиров до сих пор изучены не были, поэтому ее влияние на эксплуатационные характеристики материалов рассмотрены в более широком диапазоне концентраций – от 0 до 200 мас. ч.

Основное влияние условий эксплуатации на характеристики полимер-

ных композиционных материалов связано с повышенными температурами. Большинство подшипников скольжения и уплотнительных элементов работают в условиях нагрева. Это связано с теплотой, образуемой при трении деталей, а также с технологическими процессами, осуществляемыми оборудованием. Температура в зоне контакта деталей оборудования, работающего в тяжелом режиме, составляет 130-150 °С. Воздействие таких температур может привести к оплавлению рабочих поверхностей и появлению пленок переноса, что благоприятно сказывается на противозносных характеристиках узла. Однако длительное воздействие повышенных температур может привести к протеканию термоокислительных процессов и термической деструкции полимерной композиции. С целью улучшения характеристик материала целесообразно применение материалов, улучшающих теплофизические свойства и способных к образованию дополнительных металлических пленок в зоне контакта деталей. Таким материалом может служить закись меди.

#### *Литература*

1. Аскадский А.А., Матвеев Ю.И. Химическое строение и физические свойства полимеров. М: Химия, 1983. 248 с.
2. Белоусов В.Я. Долговечность деталей машин с композиционными материалами. Львов: Вища школа, 1984. 191 с.
3. Коляго Г.Г., Струк В.А. Материалы на основе ненасыщенных полиэфиров. Минск: Навука і тэхтка, 1990. 143 с.
4. Крыжановский В.К. Износостойкие реактопласты. Л.: Химия, 1984. 120 с.
5. Пашковский И.Э. Технологические методы защиты деталей бытовых машин и оборудования сервиса от водородного изнашивания: Монография. М.: МГУС, 2004. 228 с.
6. Пашковский И.Э., Пашковская Т.И. Теоретические и прикладные основы разработки металлоплакирующих композиционных материалов: Монография, М.: МГУС, 2003. 160 с.
7. Принципы создания композиционных полимерных материалов / А.А. Берлин и др. М.: Химия, 1990. 238 с.

УДК 661.665

**Влияние пористой структуры углерод-углеродного композиционного материала на формирование высокоплотной высокотемпературной керамической матрицы методом RMI**

**Анна Николаевна Яговкина**, ведущий инженер-технолог,  
Акционерное общество «Композит», г. Королев, Московская область

*В данной статье приведены сведения о различных структурах углерод-углеродного композиционного материала, представлены составы порошковых смесей, используемые при проведении процессов реакционной пропитки расплавами. Установлены закономерности между структурой исходных материалов и глубиной пропитки, остаточной открытой пористостью и содержанием керамических фаз, которые значительно влияют на окислительную стойкость углерод-керамического композиционного материала.*

Керамическая матрица, пористая структура, пропитка расплавом тугоплавких металлов.

**The influence of pore structure of carbon-carbon composite material on high-density and high-temperature ceramic matrix formation**

**Anna Nikolaevna Yagovkina**, leading industrial engineer,  
Joint-Stock Company «Composite», Korolev, Moscow region

*This article provides information about the various carbon-carbon composite material structures and the powder mixtures compositions used in the reactive melt infiltration processes. The regularities between the structure of the initial materials and the impregnation depth, the residual open porosity, the content of ceramic phases that influence on ablation of ultra-high-temperature ceramic composite material have been established.*

Ceramic matrix, pore structure, oxidation resistance.

Существующие теплонагруженные материалы, такие как металлические сплавы и многокомпонентная керамика не соответствуют в полной мере современным конструкционным требованиям из-за недостаточно высоких рабочих температур (до 1200 °С) и повышенной трещиностойкости соответственно [2, С. 120]. Применение углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ), обладающих высокими физико-механическими характеристиками при повышенных температурах, низким ТКЛР, высокой теплопроводностью, устойчивостью к тепловому удару, ограничено из-за интенсивного окисления при температурах выше 500 °С [5, С. 551]. Использование композиционного материала с SiC-матрицей ограничено температурой 1800 °С из-за достаточно быстрого окисле-

ния и испарения, поэтому необходимым является создание в УУКМ-заготовках керамической матрицы, способной противостоять температурам выше 1800 °С [3, С. 16115, 12, С. 11913].

При подборе компонентов матрицы необходимо учитывать температуру плавления оксидов, образованных в ходе воздействия агрессивной среды.  $V_2O_5$  плавится при 1970 °С, а  $TiO_2$  при 1830 °С. При этом скорость испарения  $TiO_2$  в разы ниже, чем у  $SiO_2$ , но выше текучесть. Относительно небольшое количество оксидов являются стабильными при температурах выше 2000 °С, среди таких соединений можно отметить диоксид циркония ( $ZrO_2$ ) и гафния ( $HfO_2$ ), гафнон ( $HfSiO_4$ ),  $Hf(Zr)-Ta-Si-O$  [13, С. 5480].

Оксиды тугоплавких металлов могут образовываться при взаимодействии карбидных, нитридных или боридных матриц с окислительной средой. Анализ составов, используемых для проведения различных исследований в статьях, показал, что в качестве исходных компонентов для формирования матриц используют сплавы, а именно  $Zr-Cu$ ,  $Zr-Al$ ,  $Zr-B$ ,  $Si-Zr_{10}$ ,  $Zr_{0,912}Si_{0,088}$ ,  $50Hf_{10}Zr_{40}Si$ ,  $HfSi_2$ ,  $TiZrHfNbTa$  порошки циркония,  $ZrSi_2$ ,  $HfSi_2$  и смеси порошков [4, С. 2297, 6, С. 336, 9, С. 210, 10, С. 20373, 13, С. 5480, 14, С. 11798, 15, С. 205]. Добавление меди в состав исходной смеси снижает температуру плавления тугоплавких компонентов, тем самым влияя на интенсивность пропитки преформы.

По результатам газодинамических испытаний было установлено, что линейные и массовые уносы УККМ отличаются существенно, что связано не только с составом матрицы, но и с условиями испытаний. Например, линейная скорость уноса  $C/C-ZrC$  варьируется от  $0,002 \pm 0,001$  мм/с [11, С.1279] до 0,012 мм/с [4, С. 2298]. Введение в матрицу значительного количества гафнийсодержащих компонентов, а также смеси различных тугоплавких соединений благоприятно сказывается на окислительной стойкости УККМ.

Для формирования керамической матрицы применяют газофазные и жидкофазные методы. Наиболее распространенными являются метод химического осаждения из газовой фазы в пористые заготовки (CVI), реакционной пропитки расплавами (RMI), пропитки и пиролиза полимерных прекурсоров (PIP). Газофазным методом получают преимущественно карбиды, но также возможно осаждение при относительно низких температурах силицидов, боридов, карбидов, нитридов и оксидов с высокими температурами плавления в печи [8, С. 161]. Метод CVI является длительным и, как следствие, дорогостоящим, при этом позволяет формировать матрицу высокого качества. Однако газофазным методом сложно получить УККМ с низкой открытой пористостью. В процессе PIP заготовка многократно пропитывается прекурсором с последующим отверждением и пиролизом для достижения заданной плотности. Данным методом также достаточно трудно сформировать беспористую матрицу; из-за усадки полимера при пиролизе возможно образование трещин. Положительной особенностью метода RMI является то, что они сравнительно простые, быстрые и экономически эффективные, также подходят для формирования керамической матрицы в заготовках сложной геометрии. Методом RMI можно формировать преимущественно карбидную, силицидную и нитридную матрицы различного

состава. При этом возможна частичная деградация волокна в ходе высокотемпературной обработки (ВТО), что может быть устранено предварительным осаждением интерфазы пироуглерода, SiC или BN [1, С. 365]. После пропитки, в зависимости от полноты протекания процесса, количество и размер пор варьируется существенно, однако при повторении процесса ВТО открытая пористость находится на уровне 3-5%. Таким образом, с точки зрения получения высокотемпературной керамической матрицы разного состава рационально использование метода RMI.

Структура углерод-углеродного материала, размер пор оказывают влияние на кинетику процесса RMI и, как следствие, на качество сформированной матрицы [7, С. 3650]. Предполагается, что снижение остаточной открытой пористости в материале способствует повышению окислительной стойкости материала посредством уменьшения каналов для диффузии кислорода, что способствует увеличению времени эксплуатации изделий.

### **УУКМ-заготовки и методы их исследования**

В качестве исходных материалов были выбраны УУКМ, армированные матрицами различного типа: пироуглеродной и коксовой на основе терморезистивных и термопластичных (каменноугольный пек) смол. При этом использовались три типа углеродных преформ: трехмерно-армированная иглопробивная, нетканая иглопробивная и двунаправленно-армированная ткановыкладочная.

Иглопробивные карбонизованные преформы, состоящие из непрерывных углеродных волокон, получали при последовательной укладке ткани или лент. Пробивание иглами производилось перпендикулярно уложенным слоям для уплотнения и скрепления слоев в преформе. Для формирования углеродной матрицы жидкофазным методом иглопробивная преформа пропитывалась каменноугольным пеком с последующими отверждением, карбонизацией и ВТО. Для получения достаточной плотности, необходимого содержания углеродной матрицы и приемлемых физико-механических и теплофизических характеристик цикл пропитки, карбонизации и ВТО проводили многократно. После проведения всех технологических операций был получен материал 1. При замене углеродной матрицы на основе кокса пека на пироуглеродную, сформированную методом газофазного изотермического осаждения, получали материал 2. При осаждении пироуглерода происходило постепенное заполнение части объема межфиламентного пространства, межпучковой и межслоевой пористости. Преформа на основе каркаса Ипресскон<sup>®</sup> – нетканая иглопробивная прессованная карбонизованная проходила несколько циклов пропитки каменноугольным пеком, карбонизации и ВТО (материал 3). Известно, что такая преформа имеет однородную пористую структуру с узким распределением пор. Ткановыкладочный материал получали при выкладке препрега на основе ткани последовательно друг на друга с их последующим отверждением, карбонизацией и ВТО (материал 4).

В качестве исходных компонентов порошковых смесей были выбраны гафнийсодержащие и кремнийсодержащие порошки. Легкоплавкая фаза, переходящая при нагреве в расплав с низкой вязкостью, способствует проникновению тугоплавких компонентов на всю толщину материала.

Открытую пористость и кажущуюся плотность материалов определяли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 15139-69.

Исследование пористой структуры, определение размера и объемного содержания пор, открытой пористости и плотности исследуемых материалов проводили на эталонном поромере «Porosimeter 3.2».

Для изучения порового пространства и микроструктуры исходных УУКМ и материалов с керамической матрицей, определения элементного состава, глубины пропитки расплавами был проведен микроструктурный анализ на подготовленных шлифах на сканирующем электронном микроскопе с энергодисперсионным рентгеновским спектрометром.

### Результаты и их обсуждение

#### Исследование пористой структуры различных УУКМ

Интенсивность и глубина пропитки в значительной мере обусловлены характером пористой структуры и распределением пор в УУКМ (величиной объема пор, размерами и конфигурацией пор, их распределением по всему объему материала, доступностью для проникновения расплава). Исследование структуры необходимо для подбора оптимального режима при формировании высокоплотной керамической матрицы и полного заполнения пор. Результаты порометрического анализа представлены на рисунках 1,2.

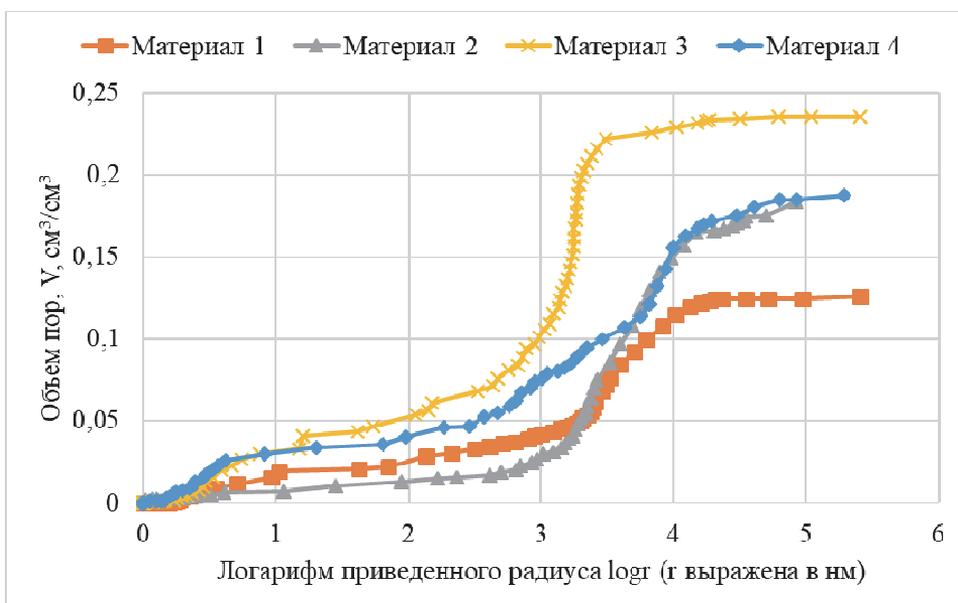
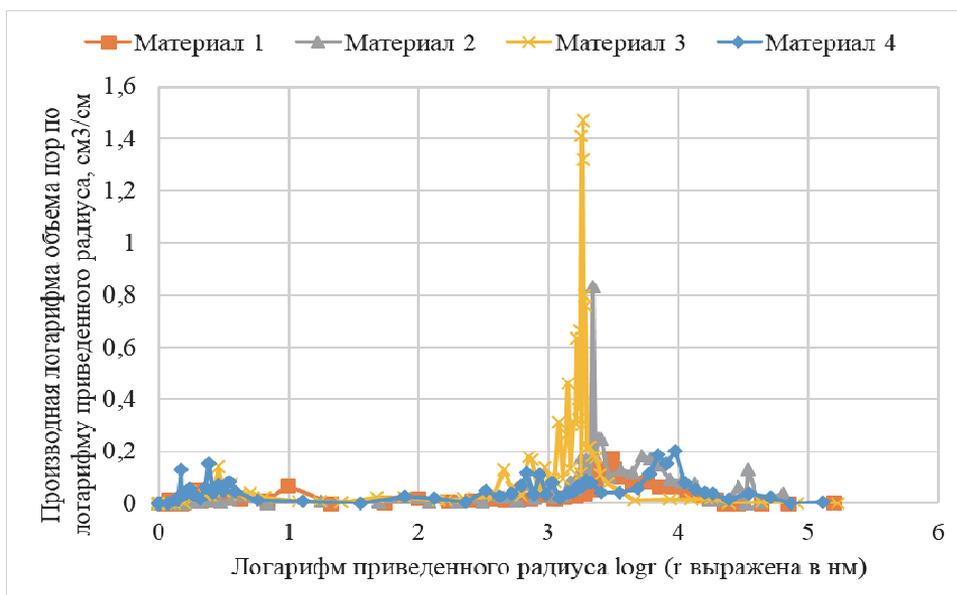


Рисунок 1 – Интегральное распределение пор в зависимости от логарифма их радиуса в различных материалах



**Рисунок 2 – Дифференциальное распределение пор в зависимости от логарифма их радиуса в различных материалах**

Результаты количественного анализа пор в исследуемых образцах УУКМ представлены в таблице 1.

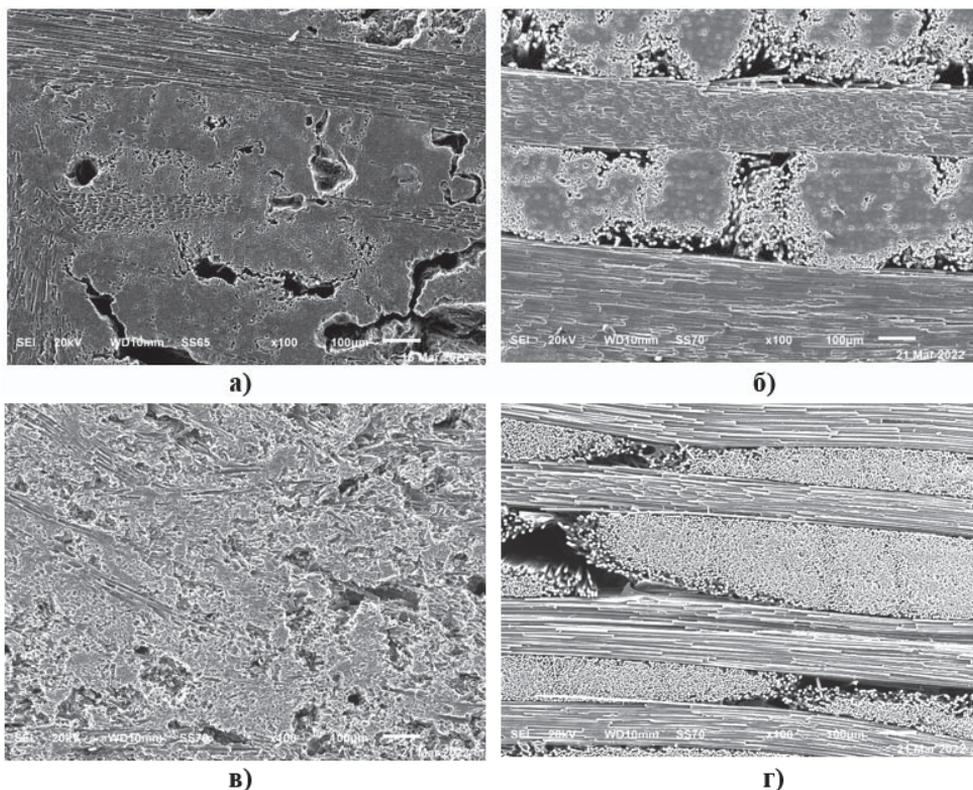
**Таблица 1 – Исходные характеристики различных УУКМ-заготовок**

Тип УУКМ	Диапазон приведенного радиуса пор					Кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup>	Открытая пористость, %
	1 нм – 1 мкм	1 мкм – 10 мкм	10 мкм – 40 мкм	40 мкм – 100 мкм	> 100 мкм		
Материал 1	6,3%	5,0%	40,6%	39,0%	1,1%	1,54±0,03	15,6±0,3
Материал 2	15,0%	69,5%	9,8%	4,6%	1,1%	1,34±0,03	19,7±0,3
Материал 3	50,5%	45,7%	3,8%	0,0%	0,0%	1,37±0,02	30,8±0,3
Материал 4	39,9%	42,7%	13,4%	2,7%	1,3%	1,35±0,03	15,4±0,5

По результатам исследований выявлено, что несмотря на отсутствие иглопробивания в материале 4 замечено существенное количество мелких пор размером до 10 мкм, что связано с проведением процесса пропитки смолами под давлением. Материал 1 и 2 отличаются типом углеродной матрицы, что сказывается значительно на распределении пор. В материале 2 пироуглерод осаждается по стенкам пор в виде тонкого слоя с постепенным их заполнением, а пек преимущественно формируется внутри поры, поэтому количество пор до 1 мкм в

материале 2 больше, чем в материале 1. Также в материалы 1 замечено значительное количество пор размером свыше 40 мкм. Диапазон радиуса пор варьируется от 1 нм до 40 мкм у материала 3. Таким образом, открытая пористость образцов из материала 3 значительная, а структура является достаточно однородной и мелкоячеистой, что может способствовать равномерному распределению керамической матрицы в объеме материала. При отличающейся плотности образцов материалов 1, 2 и 4 их открытая пористость сравнима.

Различные структуры УУКМ представлены на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Микроструктура УУКМ при 100-кратном увеличении:  
а) материал 1; б) материал 2; в) материал 3; г) материал 4**

При сравнении полученных микроструктур замечено, что в материале 1 и 4 присутствуют узкие вытянутые поры в межслоевых пространствах, а также в первом случае в направлении иглопробивания. Материал 2 отличается наличием крупных пор между пучками волокон, а материал 3 – однородностью структуры. Можно предположить, что расплаву при ВТО проще проникать вглубь заготовки по крупным поровым каналам, а также по направлению иглопробивания. Однако из-за недостатка углеродной матрицы в поре может присутствовать свободный непрореагировавший расплав, что повлияет на окислительную стойкость и физико-механические характеристики УККМ.

Для формирования керамической матрицы методом пропитки расплавами на поверхность образцов УУКМ наносили шликер, состоящий из гафнийсодержащих и кремнийсодержащих порошков и связующего. Количество шликера рассчитывалось индивидуально для каждого образца в зависимости от их исходных характеристик для полного заполнения поровых каналов. В ходе пропитки расплав вступал в реакцию с углеродной матрицей с образованием карбидов гафния и кремния. При нагреве материала 4 происходило его расслоение, что связано с отсутствием третьего направления армирования (z координата).

Исследование структуры УККМ после пропитки расплавами показало, что соотношение фаз, образованных в различных углеродных материалах, соизмеримо (рис. 4). Матрица состоит из SiC (темные участки) и HfC (светлые участки). Крупных пор в структурах различных УККМ не замечено. В материале 3 наблюдается достаточно равномерная пропитка в разных направлениях (как в плоскости X (Y), так и в плоскости Z), по сравнению с другими материалами. Однако, наибольшая глубина пропитки замечена в материале 1 (табл. 2), что оценивалось при съемке структур при малом увеличении.

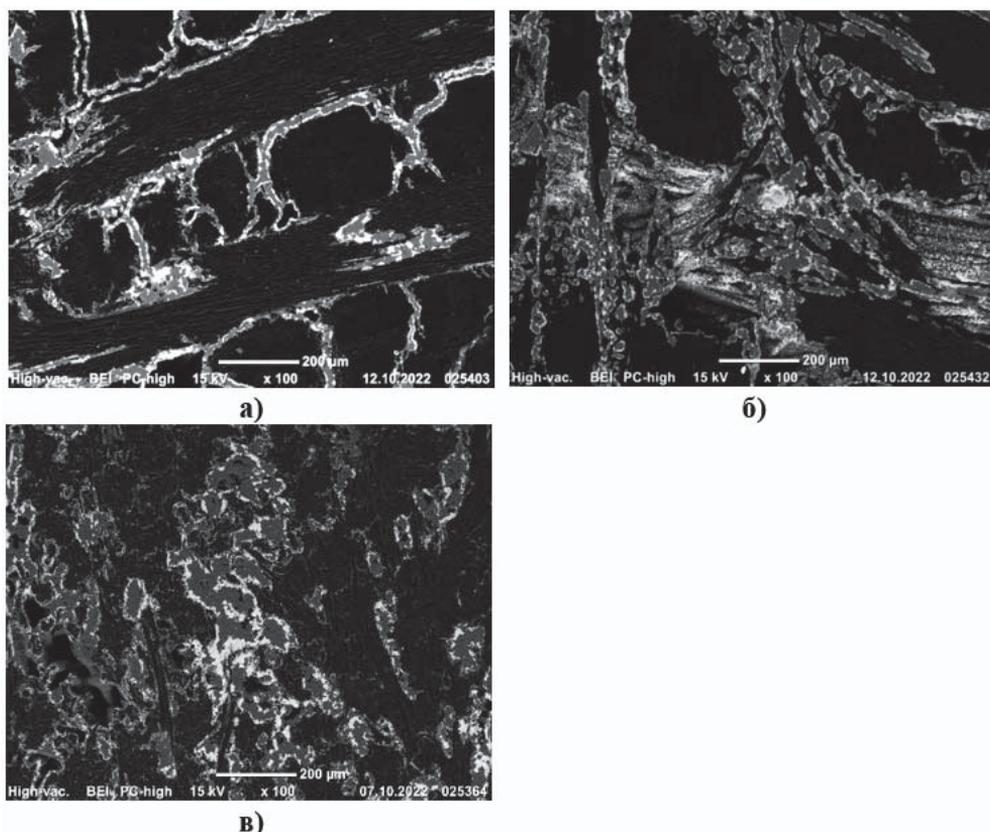


Рисунок 4 – Микроструктура УККМ при 100-кратном увеличении:  
а) материал 1; б) материал 2; в) материал 3

Таблица 2 – Результаты пропитки расплавами различных УУКМ

	Материал 1	Материал 2	Материал 3
Глубина пропитки, мм	5,0	3,5	3,5

Необходимо учитывать не только глубину пропитки материала и равномерность распределения матрицы в его объеме, но и остаточную открытую пористость и содержание керамических фаз. На рисунке 5 представлены средние значения после однократной пропитки различных УУКМ, полученные на трех образцах.

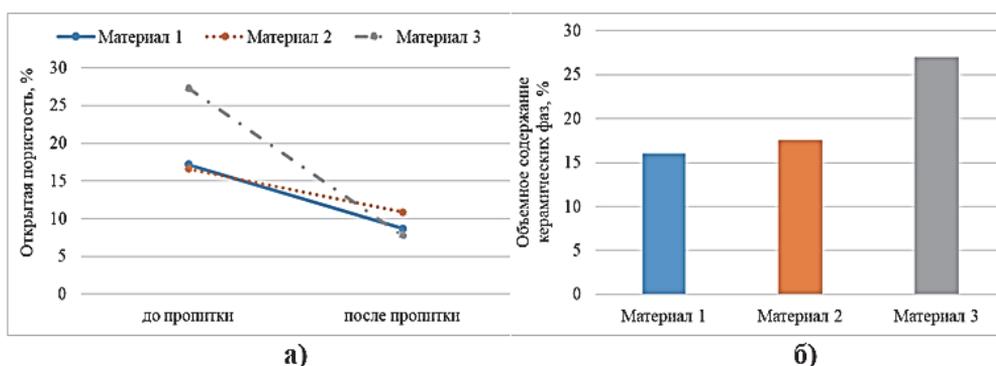


Рисунок 5 – Результаты формирования керамической матрицы в различных УУКМ: а) – изменение открытой пористости различных материалов в ходе пропитки; б) – объемное содержание керамической матрицы в различных материалах

Замечено, что значения остаточной открытой пористости после пропитки различных материалов близки, при этом наибольшее объемное содержание керамических фаз наблюдается в материале 3, что предполагает его повышенную окислительную стойкость.

### Выводы

Структура исходного материала влияет на формирование керамической матрицы. Наибольшая глубина пропитки была достигнута в материале 1, содержание керамических фаз в материале 3, что связано с узкими вытянутыми порами и однородной мелкой структурой пор соответственно. Предполагается, что содержание керамических фаз свыше 25% об. в материале 3 будет способствовать низким скоростям массового уноса материала с мелкоячеистой структурой при длительных временах в окислительном потоке.

### Литература

1. Bansal N.P. Voccaccini A.R. *Ceramics and composites processing methods*. 2012. P. 351-390.
2. Baroumes L., Bouillon E., Christin F. An improved long life duration ceramic matrix composite material for jet aircraft engine applications // 24<sup>th</sup> international congress of the aeronautical sciences. 2009. P. 119-125.

3. Duan L., Zhao X., Wang Y. Comparative ablation behaviors of C/SiC-HfC composites prepared by reactive melt infiltration and precursor infiltration and pyrolysis routes // *Ceramics International*. 2017. Vol. 43. P. 16114-16120.
4. Guo W., Hu J., Fang W. et al. A novel strategy for rapid fabrication of continuous carbon fiber reinforced (TiZrHfNbTa)C high-entropy ceramic composites: High-entropy alloy in-situ reactive melt infiltration // *Journal of the European Ceramic Society*. 2023. Vol. 43. P. 2295-2305.
5. Huang D., Zhang M., Huang Q. et al. Ablation mechanism of C/C–ZrB<sub>2</sub>–ZrC–SiC composite fabricated by polymer and pyrolysis with preform of C<sub>f</sub>/ZrB<sub>2</sub> // *Corrosion Science*. 2015. Vol. 98. P. 551-559.
6. Jiang J., Wang S., Li W. et al. Preparation of 3D Cf/ZrC–SiC composites by joint processes of PIP and RMI // *Materials Science and Engineering A*. 2014. Vol. 607. P. 334-340.
7. Kutemeyer M., Schomer L., Helmreich T. Fabrication of ultra-high temperature ceramic matrix composites using a reactive melt infiltration process // *Journal of the European Ceramic Society*. 2016. P. 3647-3655.
8. Naslain R. Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: an overview // *Composites Science and Technology*. 2004. Vol. 64. P. 155-170.
9. Tong Y., Bai S., Ye Y. et al. Reactive melt infiltration of a ZrB<sub>2</sub> modified C/ZrC composite by a eutectic Zr–B alloy // *Materials Letters*. 2015. Vol. 138. P. 208-211.
10. Tong Y., Zhang H., Hu Y. RMI – C/C–SiC–ZrSi<sub>2</sub> composite serving in inert atmosphere up to 2100 °C: Thermal shock resistance, microstructure and damage mechanism // *Ceramics International*. 2021. Vol. 47. P. 20371-20378.
11. Wang Y., Zhu X., Zhang L., Cheng L. Reaction kinetics and ablation properties of C/C–ZrC composites fabricated by reactive melt infiltration // *Ceramics International*. 2011. Vol. 37. P. 1277-1283.
12. Xie J., Li K., Sun G. et al. Effects of surface structure unit of 2D needled carbon fiber preform on the microstructure and ablation properties of C/C–ZrC–SiC composites // *Ceramics International*. 2019. Vol. 45. P. 11912-11919.
13. Ye Y., Zhang H., Tong Y., Bai S. HfC-based coating prepared by reactive melt infiltration on C/C composite substrate // *Ceramics International*. 2013. Vol. 39. P. 5477-5483.
14. Zhang L., Dong S., Zhou H. et al. 3D C<sub>f</sub>/ZrC–SiC composites fabricated with ZrC nanoparticles and ZrSi<sub>2</sub> alloy // *Ceramics International*. 2014. Vol. 40. P. 11795-11801.
15. Zhu Y., Wang S., Chen H. et al. Fabrication of C<sub>f</sub>/ZrC composites by infiltrating C<sub>f</sub>/C preforms with Zr–Cu alloys // *Materials Letters*. 2013. Vol. 108. P. 204-207.

Адрес редакции:  
141070, Королев,  
Ул. Октябрьская, 10а  
Тел. (495)543-34-31 (доб.138),  
E-mail : rio-kimes@mail.ru,  
Site:www. unitech-mo.ru

Подписано в печать 23.09.2023  
Формат В5  
Печать офсетная. Усл.печ.л. 10,4  
Тираж 500 экз.  
Заказ № 95-03  
Отпечатано  
в типографии  
ООО «Научный консультант»  
г. Москва  
Хорошевское шоссе, 35, корп.2  
Тел.: +7 (926) 609-32-93,  
+7 (499) 195-60-77  
E-mail :keyneslab@gmail.com  
Site:www.n-ko.ru