

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, статистика; 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей]. 2.5. Машиностроение [2.5.13. Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов], 2.6. Химические технологии, науки о материалах, металлургия; [2.6.17. Материаловедение]

Подписной индекс в каталоге «Почта России» ПП997

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)543-34-30 (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, предоставленных авторами для публикации

Материалы приводятся в авторской редакции.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ, СТАТИСТИКА

Романенков А.А.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ КОМПЛЕКСНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ.....3

Стрельцова Г.А.

О КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ.....11

Стрелюх Ю.В.

ОБЗОР МЕТОДОВ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АНАЛИЗА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ.....18

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Аббасова Т.С.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОБИЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ.....28

Самаров Е.К.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ ЧИСЛЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ СИГНАЛА НА ВЫХОДЕ РАДИОКАНАЛА С РАССЕЯНИЕМ ПО ЗАПАЗДЫВАНИЮ.....41

Семенов А.Б., Артюшенко В.М.

АНАЛИЗ ПУТЕЙ РЕАЛИЗАЦИИ СХЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ СКС «ПО ПОТРЕБНОСТИ».....49

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Азаренко Л.Г., Вокин Г.Г.

О КОНЦЕПЦИИ СОЗДАНИЯ ПОДВИЖНЫХ АВТОНОМНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДИСТАНЦИОННОГО АЭРОМОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ НА КОНТРОЛИРУЕМЫХ ТЕРРИТОРИЯХ БОЛЬШОЙ ПЛОЩАДИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАКЕТ ЛЕГКОГО КЛАССА.....60

Ионченкова Я.Ю., Самаров Е.К.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАКОНОВ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ СИГНАЛА В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С ВЫСОКОЙ ЧАСТОТОЙ ПОВТОРЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ.....69

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. **Стренянюк 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 17.03.2025

Формат В5

Печать офсетная. Усл.печ.л. 8,5

Тираж 500 экз.

Заказ №101-01

Отпечатано в типографии
ООО «Научный консультант»
г. Москва

Хорошевское шоссе, 35, корп. 2

Лобанов И.Е.

**ТОЧНЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ
ДВУМЕРНОЙ СТАЦИОНАРНОЙ ЛИНЕЙНОЙ
ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ
ПОЛОГО ЦИЛИНДРА С ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ
НА ОДНОЙ ИЗ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ПОЛУЧЕННЫЕ В
ЗАМКНУТОЙ РЕКУРРЕНТНОЙ ФОРМЕ.....80**

Чернов А.К.

**КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ
ПЛАТФОРМ НА БАЗЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО
УПРАВЛЯЮЩЕГО ЯДРА.....92**

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Курбанов Б.Х., Шахназаров К.Ю.

**ОБОСНОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ
В ЖЕЛЕЗЕ НИЖЕ А₁ НА ОСНОВАНИИ
КОРРОЗИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ СТАЛЕЙ.....100**

Фролов С.В., Абразумов В.В., Токарева О.В.

**ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ
МНОГОСЛОЙНЫХ ЭЛАСТИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ
ДЛЯ ВОЗМОЖНОГО ПРИМЕНЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ
ПРОТИВОПОЖАРНЫХ ПОЛОТЕН.....109**

Шахназаров К.Ю., Рафиков А.Р.

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТПУСКА
НА ПАРАМЕТРЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ
СТРУКТУРЫ И КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ
КРЕПЕЖА ИЗ СТАЛИ 03Х11Н8М2Ф (ДИ 52)
И А-ЖЕЛЕЗА (0,008% С).....127**

УДК 004.05

Системный анализ взаимодействия компонентов комплексной информационной системы строительной организации

Александр Александрович Романенков, заместитель начальника
управления 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

Статья посвящена системному анализу взаимодействия компонентов комплексных информационных систем. Раскрыто понятие комплексной информационной системы, описаны методы и этапы системного анализа, а также важность такого подхода для обеспечения эффективной работы информационных систем и повышения их производительности.

Системный анализ, комплексная информационная система, оптимизация, эффективность, взаимодействие компонентов.

System analysis of the interaction of components of complex information systems

Alexander Alexandrovich Romanenkov, Deputy Head of the Information
Technology Department,

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 is devoted to the system analysis of the interaction of components of complex information systems. The author reveals the concept of an integrated information system, describes the methods and stages of system analysis applicable to it, and emphasizes the importance of this approach to ensure the effective operation of information systems and increase their productivity.

System analysis, complex information system, optimization, efficiency, interaction of components.

Введение

Управление и обработка данных в современном мире стала наиболее важным инструментом информационных систем, позволяющим повысить удобство, качество и скорость работы персонала, повышая тем самым производительность труда и конкурентоспособность за счет повышения качества предоставляемых услуг. В связи с необходимостью повышения производительности и

качества обслуживания, возникает необходимость в улучшении уже функционирующих комплексных информационных систем (КИС) или внедрении все более производительных и безопасных КИС. В связи с этим возникает необходимость в проведении системного анализа взаимодействия КИС, что позволяет выявить и понять взаимосвязи между компонентами систем, определить их влияние на эффективность работы и разработать рекомендации по её оптимизации.

Общая постановка задачи

Целью данного исследования является проведение системного анализа взаимодействия компонентов КИС для выявления проблем и недостатков в работе систем, разработки рекомендаций по их устранению и повышению производительности. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Изучить понятие комплексной информационной системы, принципы взаимодействия ее компонентов и методы ее системного анализа.
2. Рассмотреть основные этапы системного анализа КИС.
3. Проанализировать взаимодействие компонентов КИС и выявить проблемы и недостатки в работе систем.
4. Разработать рекомендации по оптимизации работы систем на основе проведённого анализа.

Методы анализа взаимодействия компонентов КИС

На сегодняшний день существует ряд подходов к анализу взаимодействия компонентов КИС, среди которых моделирование, анализ требований, экспертные оценки и тестирование, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения, связанные с особенностями каждой конкретной системы. Отсюда следует, что необходимо учитывать особенности каждого подхода [5, С. 40]. В данной статье будут рассмотрены основные подходы к анализу взаимодействия компонентов КИС, предложены рекомендации по их применению в зависимости от целей и задач, а также проведен анализ КИС на примере строительной организации.

Комплексная информационная система представляет собой совокупность программно-аппаратных средств, основной задачей которых является автоматизация процесса сбора, хранения, обработки и передачи информации, необходимой для ведения деятельности организации. Она включает в себя различные компоненты, такие как *базы данных, серверы, рабочие станции, сетевые устройства* и т.д., которые взаимодействуют друг с другом для обеспечения эффективного функционирования системы [5, С. 42].

КИС широко применяется в различных областях, таких как образование, бизнес, государственное управление, здравоохранение, наука, промышленность, логистика, энергетика и иные сферы, затрагивающие различные стороны жизни общества. КИС позволяет автоматизировать рутинные операции, ускорить процессы принятия решений, повысить эффективность работы организации и улучшить качество предоставляемых услуг, что влечет за собой снижение издержек и повышение конкурентоспособности.

КИС включает в себя следующие основные компоненты [2, С. 54]:

1. *Аппаратное обеспечение*: компьютеры, серверы, активное и пассивное сетевое оборудование, и другие технические средства, необходимые для функционирования системы.

2. *Программное обеспечение*: серверный и десктопный программных комплекс, обеспечивающий работу системы и выполнение необходимых функций.

3. *Базы данных*: структурированные наборы данных, хранящиеся в системе и используемые для обработки и анализа информации, применяемой при выполнении рабочих задач.

4. *Сетевые технологии*: протоколы и стандарты, за счет которых обеспечивается передача данных между компонентами информационной системы.

5. *Пользовательский интерфейс*: средства взаимодействия пользователей с системой, такие как веб-сайты, мобильные приложения, рабочие станции, устройства ввода-вывода информации и т.д.

Каждый из этих компонентов играет важную роль в обеспечении эффективной работы системы и требует тщательного анализа и оптимизации.

Взаимодействие между компонентами КИС осуществляется на основе определённых принципов, таких как [1, С. 310]:

1. *Интеграция*: объединение различных компонентов системы для обеспечения их совместной работы и обмена данными.

2. *Масштабируемость*: возможность расширения и модернизации системы в соответствии с растущими потребностями организации.

3. *Надёжность*: обеспечение бесперебойной работы системы и минимизация рисков сбоев и отказов.

4. *Безопасность*: защита системы от несанкционированного доступа, атак и других угроз безопасности.

5. *Эффективность*: оптимизация работы системы необходима для достижения максимальной производительности и снижения затрат.

Анализ приведенных выше принципов позволяет определить проблемы и недостатки в работе информационной системы, а также разработать рекомендации по их устранению и повышению эффективности взаимодействия между компонентами.

Для проведения системного анализа взаимодействия компонентов КИС существуют следующие методы:

1. *Моделирование*: создание моделей системы позволяет наглядно представить её структуру и взаимодействие компонентов. Модели могут быть математическими, графическими или компьютерными.

2. *Анализ данных*: сбор и анализ данных о работе модели системы помогают выявить проблемы и недостатки в её функционировании. Это включает анализ журналов событий, метрик производительности, анализ работы сети и других источников данных.

3. *Тестирование*: проведение тестирования системы позволяет проверить работу компонентов и выявить ошибки и недочёты. Тестирование может быть функциональным, нагружочным, интеграционным и другим.

4. *Экспертные оценки*: привлечение экспертов в области информационных технологий позволяет получить квалифицированные оценки и рекомендации по оптимизации системы.

Выбор методов исследования определяется их способностью обеспечить проведение глубокого и всестороннего анализа, который позволит выявить особенности взаимодействия различных компонентов комплексной информационной системы (КИС). Это необходимо для того, чтобы точно оценить эффективность функционирования всей системы [4, С. 13].

Моделирование позволяет визуализировать структуру системы и понять, как компоненты взаимодействуют друг с другом.

Анализ данных предоставляет фактические данные о работе системы, что помогает выявить проблемы и определить пути их решения.

Тестирование обеспечивает проверку работоспособности системы и выявление ошибок, а экспертные оценки предоставляют ценные рекомендации от специалистов в данной области.

Таким образом, использование этих методов в совокупности позволяет провести системный анализ взаимодействия компонентов КИС, выявить проблемы и разработать эффективные рекомендации по оптимизации работы системы [6, С. 50].

Проведем системного анализа КИС на примере одной из строительных организаций среднего бизнеса г. Москвы, с целью выявления основных информационных потоков посредством отслеживания хода выполнения задач, изучение регламентов, должностных инструкций и отчетов предприятия и дальнейшее определения ключевых компонентов КИС.

Системный анализ КИС строительной организации

Современные строительные компании работают в условиях стремительно меняющейся внешней обстановки, что требует грамотного управления ресурсами, процессами и информацией. Качественная и удовлетворяющая всем требованиям информационная система является важнейшим инструментом поддержания конкурентоспособности и стабильности этих организаций [8, С. 70]. Тем не менее, действующие информационные комплексы нередко испытывают трудности, связанные с низкой производительностью, переизбытком данных, отсутствием чёткого взаимодействия между разными компонентами и слабостями в плане безопасности.

Для осуществления системного анализа, необходимо создать адекватную модель анализируемой системы, включающую в себя следующие компоненты [3, С. 101]:

1. Базы данных (информация о проектах, материалах, сотрудниках и финансовых операциях, контрагентах, заказах на строительные и ремонтные работы);
2. Программное обеспечение (программы для управления проектами, складским учётом, бухгалтерией и кадровым документооборотом);
3. Сетевая инфраструктура (аппаратное обеспечение, протоколы и стандарты, обеспечивающие передачу данных между компонентами системы,

автоматизированными рабочими местами в пределах локальной сети и удалёнными рабочими местами);

4. Пользовательский интерфейс (автоматизированные рабочие места для взаимодействия с системой, МФУ, плоттеры, почтовый сервис).

Спроектированная модель, представленная на рисунке 1, позволяет наглядно представить структуру системы и взаимодействие её компонентов, а также выявить дублирование функций и узкие места.

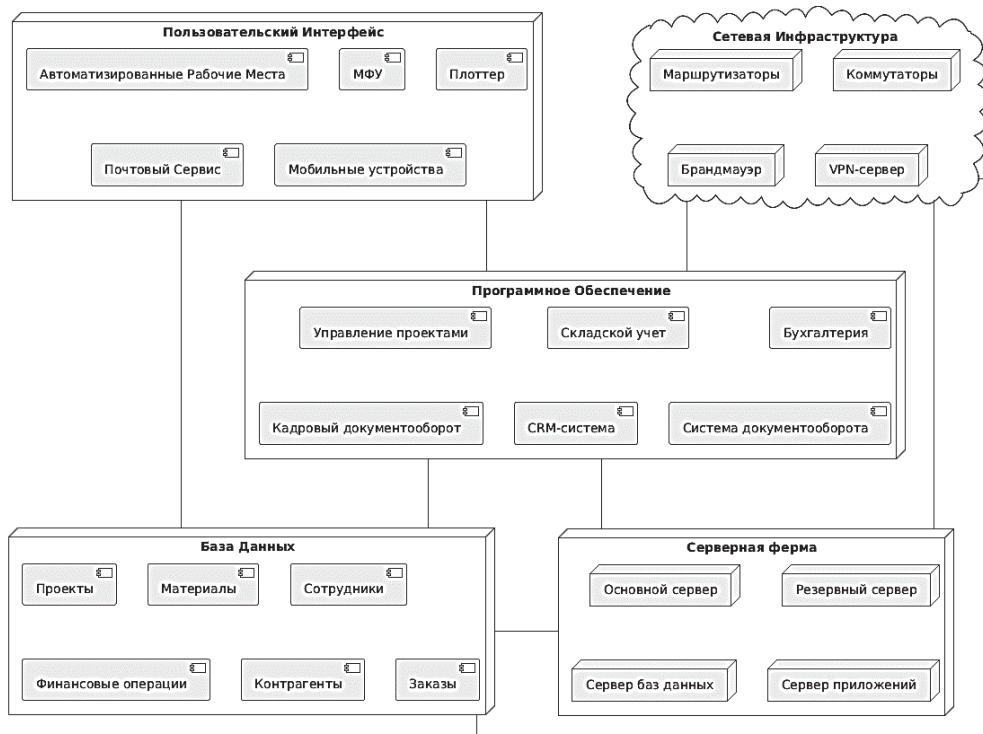


Рисунок 1 – Модель комплексной информационной системы

Далее проводится сбор и анализ данных о работе системы. Изучаются журналы событий модели, метрики производительности и другие источники информации, такие как анкетирование сотрудников, в ходе которого получаются конкретные предложения по реализации системы.

Для проверки работы компонентов системы и выявления ошибок было проведено тестирование. Оно включало в себя функциональное тестирование, нагружочное тестирование и тестирование безопасности.

В ходе проведённого анализа было выявлено:

1. Отсутствие антивирусной защиты на ПК сотрудников и серверном оборудовании;
2. Низкий уровень оптимизации базы данных, избыточность;

3. Ошибки в функционировании сетевых модулей исследуемой комплексной информационной системы;

4. Низкий уровень отказоустойчивости.

В контексте рассматриваемой предметной области интерпретация полученных результатов позволила предложить конкретные меры по улучшению работы данной информационной системы:

1. Оптимизация структуры баз данных:

1.1. Переход от денормализованных структур к нормализованным для уменьшения избыточности данных и повышения целостности информации.

1.2. Разделение больших таблиц на более мелкие для улучшения производительности при выполнении сложных запросов.

2. Усовершенствование алгоритмов обработки запросов:

2.1. Внедрение индексов на часто используемых полях для ускорения поиска данных.

2.2. Оптимизация SQL-запросов путем использования более эффективных методов соединения таблиц и фильтрации данных, что возможно за счет ранее разделенных крупных таблиц на более маленькие.

3. Внедрение дополнительных механизмов защиты:

3.1. Реализация многоуровневой аутентификации для обеспечения безопасного доступа к системе.

3.2. Использование шифрования данных как при передаче, так и при хранении для предотвращения утечек конфиденциальной информации.

4. Проведение обучающих мероприятий для персонала:

4.1. Организация тренингов по новым функциональным возможностям системы для повышения уровня знаний сотрудников.

4.2. Создание подробной документации и инструкций по использованию новой версии системы.

5. Модернизация интерфейса пользователя:

5.1. Добавление функций автоматического сохранения и восстановления данных для минимизации потерь информации.

6. Автоматизация рутинных процессов:

6.1. Введение автоматизированных систем отчетности для сокращения времени на подготовку отчетов.

6.2. Автоматизация процесса резервного копирования данных для обеспечения надежности и безопасности.

7. В целях обеспечения безопасности выбрано надёжное антивирусное ПО Kaspersky Endpoint Security 12, установлены обновления, настроены параметры сканирования и правила исключения, а также уведомления о новых угрозах и подозрительной активности. Помимо высокого качества антивируса данный выбор обоснован требованием одного из государственных заказчиков.

8. Реализованы принципы наименьших привилегий и разграничения прав доступа для разных пользователей и групп пользователей, использовали встроенные функции управления доступом и специализированные инструменты управления идентификацией и доступом посредством встроенных средств ис-

пользуемой на предприятии операционной системы РЕД ОС, а именно useradd, groupadd, chmod, chown, установленным ПО для реализации файлового сервера SAMBA и специализированная система управления пользователями, группами, хостами и политиками безопасности FreeIPA [7, С. 40].

Выводы

В результате проведённого исследования были изучены, проанализированы и внедрены в практику методы системного анализа взаимодействия компонентов комплексных информационных систем, а также выявлены проблемы и предложены рекомендации по оптимизации работы конкретной КИС строительного предприятия среднего бизнеса.

Моделирование позволило визуализировать структуру системы и взаимодействие её компонентов, анализ данных – выявить проблемы с производительностью и ошибки в учёте материалов и финансовых операций, тестирование – обнаружить уязвимости в системе безопасности и ошибки в работе некоторых модулей, экспертные оценки – предоставить квалифицированные рекомендации по повышению надёжности и эффективности системы.

На основе полученных результатов были разработаны конкретные рекомендации для улучшения работы КИС, включая оптимизацию баз данных, улучшение алгоритмов обработки запросов, внедрение дополнительных мер безопасности, автоматизацию рутинных операций и обучение сотрудников.

Анализ и внедрение разработанных рекомендаций были достигнуты следующие результаты:

1. Производительность базы данных и скорость выполнения запросов выросла на **15%** за счёт оптимизации баз данных и улучшения алгоритмов обработки запросов.

2. Количество ошибок в учёте материальных ценностей и расходных строительных материалов снизилось на **80%** благодаря автоматизации операций и снижению человеческого фактора при учете.

3. Уязвимости в системе безопасности были устраниены, что повысило уровень защиты данных.

4. Сотрудники прошли обучение работе с обновлённой системой, что позволило им эффективнее использовать новые функции.

Внедрение предложенных рекомендаций позволило решить поставленные задачи, в том числе повысить производительность системы, снизить количество ошибок в учёте, устранить уязвимости в безопасности и улучшить работу персонала.

Таким образом, системный анализ как инструмент исследования взаимодействия компонентов КИС является эффективным для обеспечения надёжной и эффективной работы информационных систем в бизнесе.

Литература

1. Артеменко Е.С. Системный анализ построения комплекса сбалансированных показателей для корпоративной информационной системы // Системный ана-

- лиз в проектировании и управлении: сборник научных трудов XXVII Международной научно-практической конференции. 2024. С. 306-312.
2. Артюшенко В.М., Аббасова Т.С., Стреналюк Ю.В., и др. Системный анализ в области управления и обработки информации. М.: Научный консультант, 2015. 168 с.
 3. Артюшенко В.М., Аббасова Т.С., Стреналюк Ю.В. и др. Информационные технологии и управляющие системы. М.: Изд-во Научный консультант, 2015. 184 с.
 4. Богданова Е.М. Исследование организационного обеспечения информационной системы прогнозирования рисков чрезвычайных ситуаций с позиций системного анализа // Credo New. 2019. № 3(99). С. 13.
 5. Бубнова Т.А. Применение системного анализа для оценки эффективности информационных систем в бизнесе // Актуальные исследования. 2024. № 3-3(185). С. 40-49.
 6. Воронин В.А. Анализ существующих информационных систем для повышения квалификации системных аналитиков // Новая наука: новые вызовы: Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции. 2019. С. 49-53.
 7. Ефимова Ю.В. Моделирование системы информационной безопасности на основе анализа системных журналов // Инженерный вестник Дона. 2019. № 6(57). С. 40.
 8. Половникова Е.С. Информационные и «сквозные» цифровые технологии в преподавании теории систем и системного анализа // Современная школа России. Вопросы модернизации. 2021. № 3-1(36). С. 70-71.

УДК 530.145.82

**О квантовых вычислительных сетях:
теоретические исследования и практические решения**

Галина Альбертовна Стрельцова, кандидат технических наук,
доцент кафедры информационных технологий и управляющих систем,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

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

В статье рассматриваются современные теоретические и практические решения применительно к разработкам квантовых вычислительных сетей.

Сетевые технологии, квантовый компьютер, безопасность, оптический сигнал.

**About quantum computing networks:
theoretical research and practical solutions**

Galina Albertovna Streletsova, Ph. D., docent of information technologies
and control systems department,

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 paper considers modern theoretical and practical solutions at relation to development of quantum computing networks.

Network technologies, quantum computer, security, optical signal.

В своей предыдущей статье [4] автор пытался выяснить, в каком состоянии находятся разработки по созданию квантовых компьютеров. Очевидно, что в последние десять лет наблюдается прорыв по практическим решениям в области квантовой схемотехники, которой предшествовали длительные теоретические исследования, начиная с прошлого века. По существу, квантовый компьютер уже создан, и основные усилия разработчиков направлены на увеличение его кубитовой «памяти». Так как любой компьютер представляет собой конечный узел сети, то ставится вопрос о создании сетевой квантовой технологии. Каким образом квантовые компьютеры будут объединяться в сеть, какова будет архитектура, топология и характеристики данной сети? Как квантовая сеть будет взаимодействовать с существующими сетями? Эти основные вопросы необходимо решить в самое ближайшее время.

Главное отличие квантовой сети: ее функционирование подчиняется законам квантовой механики. Поэтому квантовая сеть имеет свои специфические

преимущества и недостатки. Первое преимущество: высокая скорость передачи информации в этой сети. Достигается использованием высокоскоростных квантов в вычислениях с помощью соответствующих алгоритмов. Второе преимущество: сверхвысокая защищенность передачи данных. В этом случае говорят, что сеть является практической реализацией так называемой квантовой криптографии. Передаваемые данные по квантовому каналу находятся в состоянии квантовой запутанности. Квантовая запутанность (спутанность): специфическое квантовомеханическое явление. Определяется зависимостью состояний квантов друг от друга, невзирая на расстояние между ними. Означает, что становится практически невозможным сделать точную копию передаваемых данных. И поэтому квантовая сеть полностью защищена от постороннего вмешательства. На рисунке 1 показаны процессы передачи ключа шифрования от источника к приемнику при вмешательстве нарушителя по классическому каналу связи и квантовому каналу [3]. Если нарушитель извлекает совершенную копию ключа шифрования в канале, то он получает открытый доступ к данным в сети. Такой процесс возможен в случае классической передачи информации. Квантовые процессы очень трудно поддаются получению точной копии ключей шифрования из-за свойств запутанности, и потому квантовый канал связи полностью защищен.

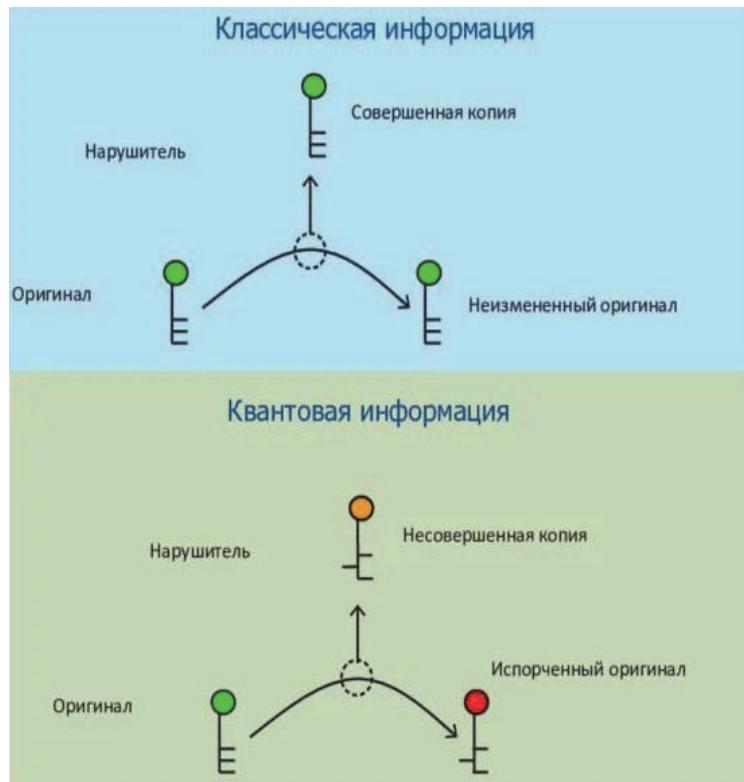


Рисунок 1 – Процессы передачи ключа шифрования по классическому и квантовому каналам связи

Первоначальная концепция сетевых вычислительных технологий в качестве линий связи применяла существующие аналоговые телефонные линии, которые были построены еще в конце девятнадцатого века [1, С. 53-65.]. До сих пор в некоторых областях земного шара, где основным источником связи является телефонная линия, через телефон осуществляется доступ к глобальной сети Интернет. Аналогично при построении квантовых сетей было принято решение использовать оптоволоконные линии связи. Прежде всего, потому что носителем передачи информации по таким сетям является световой (оптический) сигнал.

Для примера, в источнике [2], было приведено описание такой квантовой сети (рисунок 2). Имеются две лаборатории 1 и 2, в которых у пользователей имеются квантовые устройства с коммуникационными (синий шарик) кубитами и кубитами памяти (красный шарик). В лаборатории 1 пользователи Боб и Чарли создали локальную квантовую сеть размером в 2 м. В этой сети фотоны передаются по каналу (голубая цепочка) и устанавливают через какое-то устройство (обозначенное окружностями) свои свойства запутанности. Также построена квантовая сеть со свойствами запутанности с пользователем Алиса в лаборатории 2 размером в 20 м. При этом Боб хранит свою запутанность с Алисой в кубите памяти до тех пор, пока его коммуникационный кубит устанавливает свою запутанность с коммуникационным кубитом Чарли по квантовой сети в 2 м.

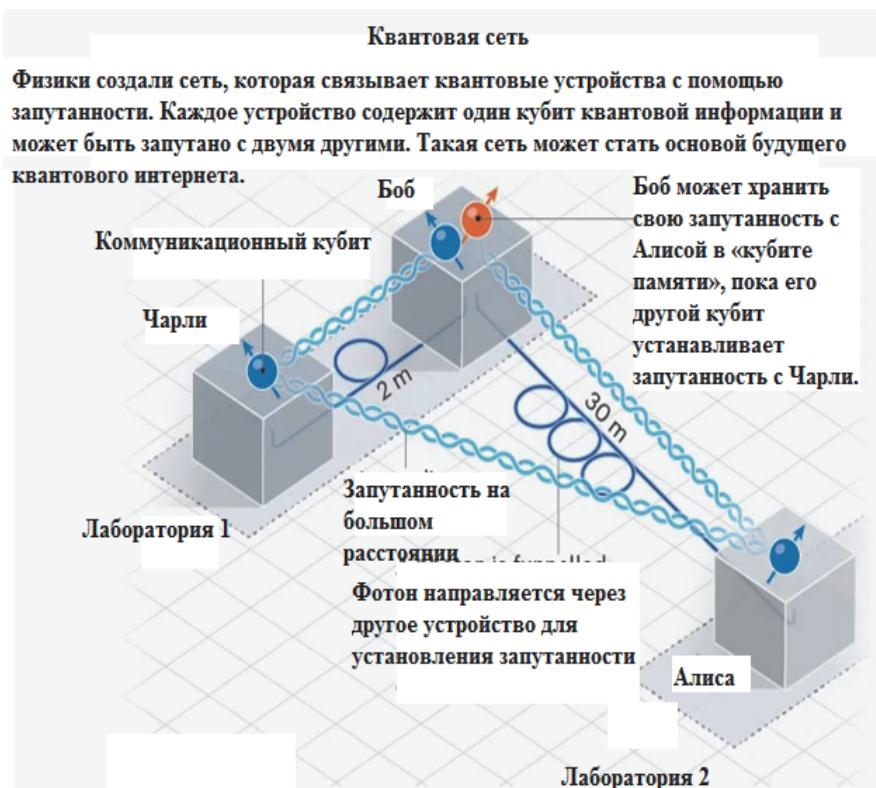


Рисунок 2 – Пример простой квантовой сети

Свойство защищенного квантового канала связи уже используется на практике. Обычно такие каналы встраиваются в общую сеть, когда необходимо обеспечить повышенную безопасность обмена данными. На рисунке 3 представлена структурная схема передачи информации между двумя пользователями (традиционными Алисой и Бобом) [3].

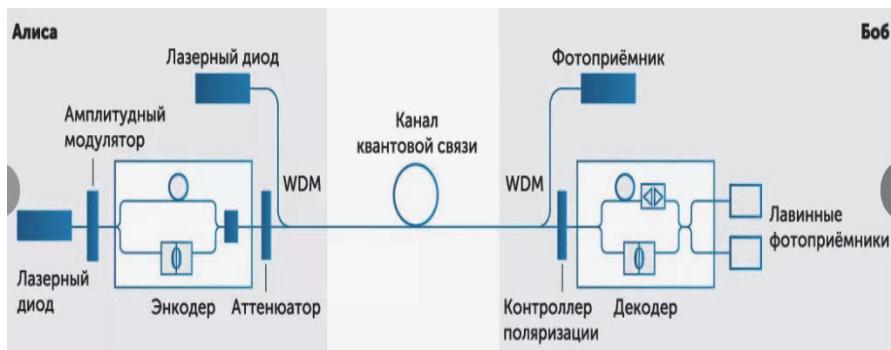


Рисунок 3 – Структурная схема передачи информации по квантовому каналу данных

В передатчике (пользователя Алиса) ключ шифрования и данные формируются с помощью лазерного диода. Лазерный диод представляет собой полупроводниковый лазер на основе диода, который имеет следующие особенности: формирует когерентные фотоны и имеет положительную обратную оптическую связь. Амплитудный фотонный модулятор в схеме повышает эффективность выходного потока когерентных фотонов от диода. Он в режиме отражения модулирует амплитуду падающих на его поверхность фотонов практически без изменений их оптической фазы. Устройство Энкодер (преобразователь механических перемещений) представляет собой стеклянный диск, прочно зафиксированный на валу. Оптический датчик поворота Энкодера преобразует момент вращения в интенсивный поток фотонов, принимаемый фоточувствительным датчиком. Для снижения уровня мощности оптического сигнала в оптическом канале связи используют оптический аттенюатор. Далее поток фотонов (в виде оптических сигналов) поступает в оптический канал связи через систему устройств WDM (Wavelength Division Multiplexing – спектральное уплотнение каналов), которые обеспечивают увеличение пропускной способности телекоммуникационной квантовой сети. В данном случае сформированный фотонный поток от аттенюатора смешивается с когерентным потоком фотонов от промежуточного лазерного диода и передается по одному оптическому волокну в канале квантовой связи. На выходе канала WDM-система разделяет оптический сигнал на две составляющие. Одна составляющая поступает на фотоприемник, который измеряет оптический сигнал с преобразованием его в электрический. Вторая составляющая потока поступает на Контроллер поляризации, который управляет состояниями поляризации оптического потока в оптоволоконном канале квантовой связи. Преобразованный поток поступает на вход оптического Декодера. Он преобразу-

ет поток фотонов в несколько составляющих, которые регистрируется лавинными фотоприемниками. Таким образом, сообщение от пользователя Алиса безошибочно прочитывается пользователем Боб. Так как описанные в схеме устройства входят в состав внутренних систем пользователей на концах сетевого квантового канала, то безопасность передачи полностью обеспечивается надежным каналом квантовой связи.

На рисунке 4 показана структура некоторой гибридной сети, в которой используются квантовые каналы связи.

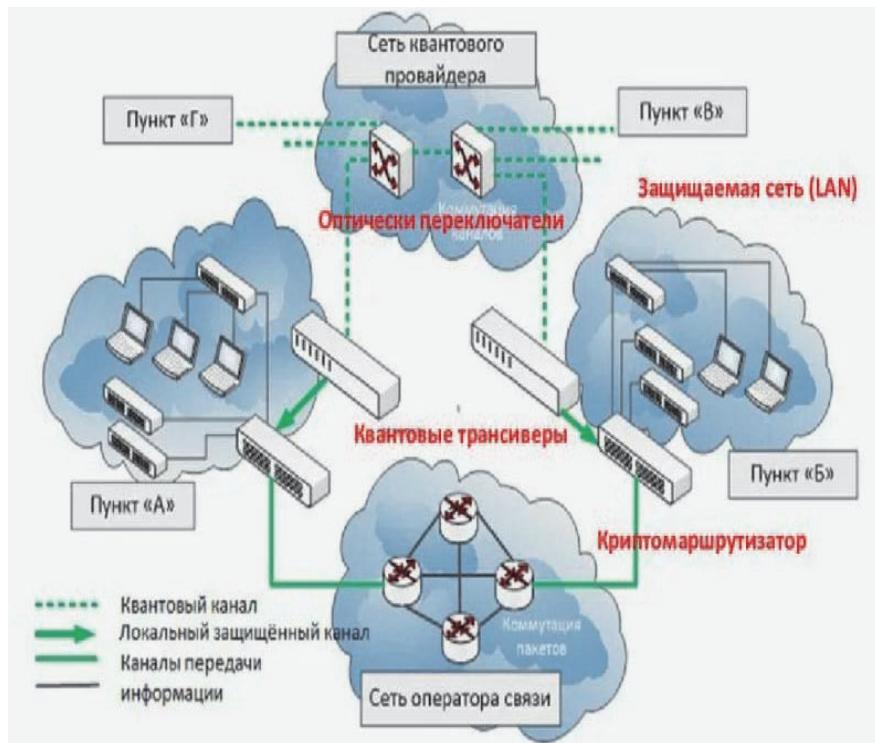


Рисунок 4 – Структура сети с квантовыми каналами связи

Сеть организована следующим образом. Она объединяет несколько пользователей, находящихся в пунктах А, Б, В, Г. При этом пользователи в пунктах А и Б находятся в локальных защищаемых сетях (LAN) с обычной классической структурой. Имеется также сеть оператора связи с обычными каналами передачи. Пункты В и Г связаны с сетью квантового провайдера через оптические переключатели квантовыми каналами. Также квантовая линия связи поступает на оптический трансивер, который в свою очередь связан с криптомаршрутизатором через локальный защищенный канал. Очевидно, что применение в структуре квантовой сети квантового провайдера должно обеспечить повышенную эффективность и безопасность всей сети. Квантовая структура сети квантового провайдера предоставляет для пользователей высокоскоростные и удобные услуги дос-

тупа к глобальным сетям с высоким уровнем безопасности.

На сегодняшний момент в области квантовых сетей решаются следующие задачи [5]:

- Создание квантового Интернета
- Адаптация существующих оптоволоконных линий связи для обмена информации в квантовом «формате»
- Увеличение протяженности квантовой сети: от локальной сети до муниципальной сети.

Данными проблемами занимаются те страны, которые имеют достаточный задел в теоретических и экспериментальных исследованиях в области квантовой механики. К ним относятся США, Китай, Германия, Япония и многие другие.

Американские исследователи из Чикагского университета предлагают создать глобальную сеть квантового Интернета на базе особых каналов связи. Их аналог: трёхкилометровые тоннели с высоким вакуумом (порядка 10^{-11} атмосфер). Тоннели являются датчиками, которые применяются в гравитационно-волновых обсерваториях. Системы фокусирующих зеркал в тоннелях позволяют преодолевать фотонам колоссальные расстояния, откликаясь на гравитационные волны. Исследователи теоретически обосновали возможность создать квантовый Интернет со связью из вакуумных труб диаметром 20 см с фокусирующими линзами через каждые несколько километров. При этом можно применить средний уровень вакуума (10^{-4} атмосфер).

В сентябре 2023 года на территории китайского города Хэфэй, (площадью около 7048 кв. км) была построена городская квантовая сеть. Сеть состоит из трех квантовых узлов (Алиса, Боб и Чарли), расположенных в виде треугольника, длина каждой стороны которого составляет от 7,9 до 12,5 км. Квантовые узлы представляют собой квантовые компьютеры с процессором и квантовой памятью. Узлы располагаются в каждой вершине треугольника и работают независимо друг от друга. Каждый узел связан с сервером, расположенным в центре треугольника, по оптоволоконной линии связи. Эта связь обеспечивает и классический, и квантовый формат передачи информации. Квантовая память использует холодный рубидий, управляемый лазером. Атомы рубидия генерируют состояние атомно-фотонной запутанности. Фотоны передаются на сервер, атомные кубиты сохраняются до последующего использования. Это означает, что пользователь (Алиса, Боб и Чарли) кодирует информацию в виде фотона и передает ее на сервер, а если фотон будет потерян или испорчен, то атомные кубиты пользователей сохраняются и могут восстановить переданную информацию.

В России первая многоузловая квантовая сеть между двумя отделениями Газпромбанка была построена в 2016 году [5]. В ней применена технология цифрового шифрования и хранения данных: квантово-защищенный блокчейн. В 2017 году между четырьмя точками была построена аналогичная сеть в Казани. В 2024 году на первом этапе предполагают объединить локальные квантовые сети университетов Москвы и Санкт-Петербурга. Эта сеть станет единой

средой для развития магистральных линий квантовой связи. Последующие этапы предусматривают объединение в единую квантовую сеть университетов и научных центров в Нижнем Новгороде, Казани, Самаре, Челябинске.

Заключение

Дальнейшее развитие квантовых систем связи осуществляется совместными усилиями ведущих стран мира параллельно теоретическими, экспериментальными и практическими исследованиями. Это, прежде всего, разработки в области шифрования данных, передачи ключей шифрования, организации сетевой архитектуры. Квантовые сети должны полностью реализовать физические принципы полной процедуры защищенной связи, повышенной надежностью ее компонент и устойчивостью работы. На сегодняшний день лидером по масштабам внедрения технологий квантовых сетей связи является Китайская Народная Республика. В Российской Федерации в реализации национальных стратегических программ и проектов разработок квантовых сетей связи расширяется разработчиками (научными организациями), потребителями (заказчиками, компаниями) и поддерживающих госорганами, развивается международное сотрудничество международных организаций.

Литература

1. Гольдштейн Б.С., Соколов Н.А., Яновский Г.Г. Сети связи: Учебник для ВУЗов // СПб: БХВ Санкт-Петербург. 2010. 400 с.
2. Квантовый интернет: ученые нашли способ поддерживать квантовую запутанность в сети. Крупнейший информационный сайт России. Новости 18 мая 2024 года [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://overclockers.ru> (дата обращения: 03.09.2024).
3. Семенов Ю.А. (ИТЭФ-МФТИ). Квантовая криптография [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://libcats.org/book/638084> (дата обращения: 03.09.2024).
4. Стрельцова Г.А. Квантовые компьютеры: настоящее, теория и прогнозы // Информационно-технологический вестник. 2022. Выпуск 1. С. 27-37.
5. Сухоручкина И.Н. Квантовые коммуникационные сети в инфраструктуре связи // Материалы конференции «Научно-технологическое развитие России: приоритеты, проблемы, решения», посвященной 155-летию Русского технического общества, 15 июня 2021 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.viniti.ru> (дата обращения: 03.09.2024).

УДК 004.04

Обзор методов и программного обеспечения анализа пропускной способности телекоммуникационных сетей

Юрий Вениаминович Странялюк, доктор технических наук, профессор, профессор 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

Проведен аналитический обзор отечественных и зарубежных методов и программного обеспечения определения пропускной способности телекоммуникационных сетей

Телекоммуникационные сети, методы, программное обеспечение, пропускная способность.

Overview of methods and software for analyzing the bandwidth of telecommunication networks

Yuri Veniaminovich Strenalyuk, Doctor of Technical Sciences, Professor, 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

An analytical review of domestic and foreign methods and software for the allocation of bandwidth of telecommunication networks has been carried out

Telecommunication networks, methods, software, bandwidth.

Введение

С каждым годом трафик, передаваемый по телекоммуникационным сетям различных типов – от волоконно-оптических магистральных до сотовых 5G, стремительно растет. По прогнозам аналитиков, к 2026 году глобальный IP-трафик увеличится до 7,2 зеттабайт в год. Основная причина – повсеместное распространение видеосервисов, технологий VR и распространение интернет-торговли.

В этой связи стоит крайне важная задача прогноза роста нагрузки и оценки реальной пропускной способности используемых каналов и инфраструктуры мультисервисных сетей.

Использование разнообразных методов анализа пропускной способности, к которым относятся аналитическое моделирование, имитационное моделирова-

ние и натурные испытания, позволяет решать эту задачу с достаточной точностью как на этапе как планирования, так и эксплуатации телекоммуникационных сетей.

Задачей статьи является анализ показателей пропускной способностей информационных сетей, а также обзор методик и ПО их оценки.

Важность ПО моделирования сетей

В современном мире телекоммуникации и связь играют ключевую роль во всех сферах жизни общества, будь то экономика и производство, наука, правительственный сектор, финансы или социальная сфера. Информация и данные стала особой ценностью, стратегическим ресурсом и двигателем ускоренного развития.

В этой связи исключительно важно обеспечить стабильно высокую пропускную способность сетей связи на фоне тенденции резкого роста объемов передаваемого трафика – голосового, IP-телефонии, видео трафика и данных.

Для решения такой масштабной задачи операторам связи, корпоративным ИТ-подразделениям и научным организациям требуется проводить регулярный комплексный анализ загруженности и пропускной способности в ТКС.

К основному техническому показателю ТКС относится *пропускная способность* – т.е. максимальный объем информации (трафика), который может быть передан по каналам и трактам сети в единицу времени.

Контроль этого и других параметров позволяет оценить реальную способность и качество функционирования сети.

Основные методы анализа сетей

Аналитические модели

Это математические модели на основе теории массового обслуживания, теории графов, теории вероятностей и математической статистики, позволяющие оценить пропускную способность сети исходя из её топологии, характеристик оборудования и параметров трафика. Наиболее известные модели:

- Модель Клейнрока – для пакетных сетей;
- Модель Эрланга – для телефонии;
- Модель Линдли – для систем массового обслуживания и др.

Модель Клейнрока является одной из наиболее известных аналитических моделей для расчета пропускной способности пакетных сетей. Была предложена Леонардом Клейнроком в 1964 г.

Основные допущения модели:

- Трафик носит статистический характер и может быть описан с помощью показателей интенсивности входящего и обслуженного потоков.
- Буфер принимающего устройства имеет неограниченную длину.
- Система работает в установившемся режиме.
- Времена обслуживания пакетов подчинены показательному закону распределения.

Модель позволяет получить зависимость между интенсивностью входящего трафика, вероятностью потери пакетов и пропускной способностью канала. На основе модели можно рассчитать необходимую полосу пропускания канала,

чтобы гарантировать заданное качество обслуживания (допустимый уровень потерь). Модель Клейнрока до сих пор актуальна и используется инженерами-проектировщиками сетей для расчетов при планировании емкости сети.

Модель Эрланга является классической математической моделью теории телетрафика, описывающей процессы обслуживания вызовов в телефонных се-тях. Она была разработана в 1917 году датским инженером А.К. Эрлангом.

Основные допущения модели:

- поток вызовов носит случайный пуссоновский характер и описывается параметром интенсивности λ ;
- длительность разговоров подчиняется показательному закону распределения с параметром μ ;
- есть конечное число каналов обслуживания n ;
- запросы на соединения, заставшие все каналы занятыми, становятся в очередь;
- дисциплина очереди – FIFO.

Модель Эрланга позволяет рассчитать такие важные показатели как вероятность блокировки, среднюю задержку в очереди, необходимое количество каналов. Это дает возможность на стадии проектирования и планирования емкости телефонной сети гарантировать заданный уровень качества обслуживания абонентов с учетом прогнозируемой нагрузки. Модель Эрланга актуальна при анализе сетей IP-телефонии.

Модель Линдли предназначена для описания различных систем массового обслуживания, таких как колл-центры, сервисные центры, банковские офисы и др.

Основные допущения:

- Поток заявок носит случайный пуссоновский характер и описывается параметром λ .
- Время обслуживания заявки распределено экспоненциально с параметром μ .
- Есть одно или несколько обслуживающих устройств (операторов).
- Неограниченная длина очереди.
- Дисциплина – FIFO.

Модель позволяет определить:

- Среднее время пребывания заявки в системе ожидания.
- Среднее число занятых приборов.
- Вероятность того, что заявку обслужат без ожидания.
- Среднее число заявок в очереди.

По результатам анализа можно обоснованно подобрать количество каналов/операторов, чтобы гарантировать приемлемое качество обслуживания клиентов компании с учётом прогнозной нагрузки. Модель Линдли широко используется при анализе различных систем массового обслуживания уже более 50 лет.

Имитационное моделирование представляет собой разработку программной имитационной модели сети и проведения серий статистических испытаний с целью оценки её пропускной способности в различных условиях. Суть метода

заключается в разработке программной модели анализируемой сети, всех ее элементов и воспроизведении в виртуальном пространстве процессов функционирования этой сети.

Для этого в специализированном ПО выполняется детальное моделирование топологии сети, ее узлов коммутации, линий связи, каналаобразующего оборудования, протоколов маршрутизации данных.

Задаются сценарии нагрузки с имитацией реальных потоков голосового трафика, IP-телефонии, видео, данных. Модель сети запускается на исполнение в виртуальном режиме времени.

По результатам прогона анализируются различные целевые показатели – загрузка и пропускная способность каналов и портов коммутаторов, потери пакетов, времена задержек, джиттер и др. Такой подход позволяет детально исследовать поведение сети в разных режимах и условиях нагрузки, найти узкие места и определить реальную пропускную способность всей инфраструктуры и отдельных ее элементов.

Натурные испытания заключаются в непосредственных замерах загрузки каналов и трафика в реальной инфраструктуре телекоммуникационной сети с помощью специализированных приборов (анализаторы трафика, пробники и др.). Это наиболее достоверный, но и дорогостоящий подход к определению пропускной способности действующей сети.

Проведение натурных испытаний является наиболее достоверным методом определения пропускной способности действующей телекоммуникационной сети.

Для точного и надежного тестирования пропускной способности сети рекомендуется использовать профессиональные инструменты. Они предоставляют богатый набор функций и возможностей для управления тестированием, а также позволяют более детально анализировать результаты.

Зарубежное программное обеспечение моделирования сетей

Одним из таких инструментов является комплексное программное обеспечение (ПО) **Iperf**. Оно позволяет проводить измерения пропускной способности сети как в локальных, так и в удаленных сетях. С его помощью можно выполнять как одиночные измерения, так и непрерывные тесты пропускной способности.

Другим популярным инструментом для тестирования пропускной способности сети является ПО **iPerf3**. Он является современной версией iPerf и включает в себя множество дополнительных функций – поддержку многопоточности и возможность изменять размер пакетов данных.

Еще одним полезным инструментом является **JPerf**, который представляет собой графический интерфейс для iPerf. JPerf обладает простым и интуитивно понятным интерфейсом, позволяющим удобно настраивать и запускать тесты пропускной способности.

Также можно упомянуть **NePerf** – сетевой инструмент, разработанный Cisco Systems для тестирования и оценки производительности сети. NePerf позволяет измерять пропускную способность и задержку в сетевых узлах, и может

использоваться для определения узких мест и проблем с производительностью в сети.

Для мониторинга пропускной способности сети можно также использовать инструмент **NetFlow Analyzer**. Он позволяет собирать и анализировать данные о сетевом трафике, предоставляя детальную информацию о пропускной способности сети, использовании полосы пропускания, а также о причинах возможных проблем. Эта программа предоставляет возможность моделировать работу сетевых протоколов и анализировать их пропускную способность. Также она обладает функциональностью по управлению трафиком, определению оптимальных маршрутов и оценке задержки. Основными достоинствами NetAnalyser являются простота использования и гибкость в работе с различными типами сетевых протоколов. Важно отметить, что, несмотря на эти преимущества, программа может не всегда обеспечивать высокую точность результатов, особенно в сложных задачах.

Telecom Capacity Analyzer используется для анализа пропускной способности каналов телекоммуникаций и определения оптимального их количества для пропуска трафика. Это ПО дает возможность оценки потерь пакетов, задержку и влияние различных причин на пропускную способность. Программа имеет высокую точность, гибкость и имеет множество настроек и функций. Однако интерфейс программы сложен для начинающих пользователей, а стоимость лицензии высока. Telecom Capacity Analyzer также предоставляет возможность оценки потерь пакетов, задержку и воздействие различных причин на пропускную способность ТКС.

NetCraeker Technologies – это программный комплекс для моделирования, оптимизации и анализа ТКС. Он содержит инструменты для создания моделей, анализа производительности и оптимизации параметров.

Преимуществами этого ПО включают обширный функционал, гибкость настроек и возможность исследования сложных моделей сетей. При этом освоение его сложно, а для эффективного использования требуется мощное аппаратное обеспечение. Эта программа позволяет формировать модели и анализировать производительность сложных ТКС. Однако для успешного использования требуются хорошие навыки в области программирования.

Cisco Systems также имеет ПО для проектирования и моделирования сетей и оптимизации их работы. Это ПО позволяет создавать модели, оценивать производительность и выбирать оптимальные решения. Среди его достоинств можно отметить гибкость, широкий функционал и интеграция с другими продуктами Cisco. При этом ПО имеет высокую стоимость и сложно к освоению. ПО Cisco Systems дает возможность создания моделей ТКС и оценивать их производительность. Используются и методы теории очередей, и математические модели для определения оптимальной пропускной способности, но их использование потребует большого объема исходных данных.

iWebsim использует методику моделирования динамических систем, основанную на комплексном использовании различных методов и подходов к моделированию дискретных, непрерывных и гибридных систем. Пользователям

iWebsim предоставляет значительный выбор инструментальных средств, реализующих указанный подход к комплексному моделированию динамических систем. Кроме того, пользователю предоставляются широкие возможности ПО использованию дополнительных скриптов и функций на JavaScript, позволяющих существенно расширить функциональные возможности iWebsim.

NFWare спец по сетевым решениям, включая виртуальные функции сетевых устройств (VNF), такие как виртуальные маршрутизаторы и брандмауэры и могут использоваться для анализа и оптимизации пропускной способности сетей.

X-Net и **Netris** формируют решения для анализа сетевых данных, включая мониторинг и оптимизацию сетевой пропускной способности ТКС.

Проведенный сравнительный анализ показал, что применение отечественного ПО упрощает процесс анализа пропускной способности и позволяет получить более точные результаты.

Отечественное программное обеспечение моделирования сетей

Arena Simulation – ПО для моделирования и анализа различных процессов и систем. Arena дает возможность пользователям проводить широкий анализ, моделируя различные сценарии и оценивая влияние различных факторов на производительность сетей. Это помогает выявлять недостатки, оптимизировать распределение ресурсов и повышать производительность системы. Arena предлагает такие инструменты оптимизации, которые дают возможность определить наилучшие реализуемые конфигурации или стратегии сетей. Для конкретных задач, таких как минимизация затрат или максимизация пропускной способности, можно использовать Arena для определения оптимальных решений и принятия решений на основе данных.

AnyLogic – ПО имитационного моделирования различных систем и процессов. Оно позволяет анализировать пропускную способность сетей, а также оптимизировать их сетевые конфигурации, чтобы улучшить производительность и стабильность сети. Моделирование пропускной способности сетей с использованием AnyLogic включает в себя следующие этапы:

- Моделирование формирования и прохождения сетевого трафика и определение его влияния на пропускную способность сети.
- Анализ задержки и потери пакетов, оценка и анализ влияния различных сетевых параметров (пропускной способности каналов, расстояния между узлами и количества узлов) на задержку и потерю пакетов.
- Оптимизация сетевых конфигураций, в т.ч. выбор типа сетевого оборудования), определение оптимального количества узлов и каналов и распределение нагрузки между различными узлами.
- Тестирование и проверки производительности сети и анализа их результатов.

Другое отечественное ПО анализа пропускной способности ТКС.

- **Анализатор трафика++** – технически сложный программно-аппаратный комплекс, который для захвата и обработки большого массива сетевого трафика с дальнейшим его глубоким анализом. Он способен производить

тестирование пропускной способности и производительности сети и осуществлять поддержку необходимых приложений для данных целей:

- **NetVizor и NetCrunch** – это программное обеспечение с инструментами для анализа пропускной способности и мониторинга трафика в сети.
- **Prometheus** – это комплексное ПО оценки и управления ТКС. Оно состоит из инструментов анализа пропускной способности и мониторинга сетевых ресурсов.
- **Qrator Labs** – Компания Qrator Labs предоставляет решения для анализа и защиты сетей от DDoS-атак. Их сервисы включают инструменты для мониторинга пропускной способности и обнаружения атак на сеть.
- **NetAngels** от НПО «Спектр» – это российский продукт, предназначенный для мониторинга и анализа сетей. Включает в себя инструменты для анализа пропускной способности и качества обслуживания.
- **SolarWinds NetFlow Traffic Analyzer** – предоставляет детальную информацию о трафике в сети, включая объем переданных данных, типы пакетов и их происхождение. Он также помогает выявлять узкие места в сети и оптимизировать использование пропускной способности.
- **ManageEngine NetFlow Analyzer** – это комплексное решение для мониторинга и анализа сети, созданное специально для мониторинга пропускной способности и анализа трафика на основе потоков. Он анализирует данные о потоках из таких источников, как NetFlow, sFlow и IPFIX, чтобы обеспечить полную видимость производительности и использования полосы пропускания сети.
- **NetFlow Analyser** был создан и предложен ManageEngine, подразделением управления предприятием компании-разработчика программного обеспечения Zoho Corporation. Под своим брендом ManageEngine они разрабатывают программное обеспечение для управления ИТ в области безопасности, сетей, облаков, приложений и многоного другого.
- **SoftPerfect Network Scanner** – это бесплатный инструмент для анализа сети, который может помочь определить их пропускную способность.
- **SolarWinds Engineer's Toolset** – это набор инструментов для сетевых инженеров, который включает в себя инструменты для анализа пропускной способности и мониторинга сети.

Российскими разработчиками создан также ряд перспективных решений для моделирования и анализа характеристик телекоммуникационных сетей:

- ПО «**Имитатор**» компании Инфотек – предназначено для имитационного моделирования сетей связи различного масштаба – от локальных сетей до глобальных мультисервисных сетей связи. Позволяет оценить показатели надежности и качества обслуживания.

Основные возможности «Имитатора»:

- Поддержка моделирования сетей фиксированной и мобильной связи, локальных вычислительных сетей, с использованием оборудования и протоколов таких производителей как Cisco, Juniper, Huawei, МТУ-Интел, Элтекс и др.
- Визуальный конструктор для быстрой сборки топологии сети из готовых модулей и настройки их параметров.

- Библиотеки моделей различных сетевых элементов – маршрутизаторов, коммутаторов, модемов, серверов, АТС.
- Поддержка основных сетевых протоколов – TCP/IP, ОКС-7, SIP, Ethernet, ATM.
- Задание широкого спектра нагрузок и сценариев моделирования, анализ качества передачи голоса и видео.
- Расширенные возможности сбора статистики, графического отображения и экспорта результатов моделирования.

Благодаря гибким настройкам имитационного моделирования «Имитатор» позволяет достаточно реалистично воспроизводить поведение различных типов сетей связи для анализа их пропускной способности.

- ПО «БАРС» (Блок Анализа Развития Сети) – российский программный комплекс для моделирования, анализа и оптимизации телекоммуникационных сетей. Разработчик – компания «Инфинет».

Основные функциональные возможности:

- Построение модели транспортной сети, включая топологию, оборудование, емкости каналов, параметры трафика.
- Визуализация текущего состояния сети – загрузки узлов, линий связи на схеме topview.
- Моделирование распределения нагрузки по сети в зависимости от структуры, технологий коммутации, алгоритмов маршрутизации трафика.
- Анализ KPI – потерь, задержек, джиттера, доступности на основе статистических данных имитации.
- Расчёт оптимальных технико-экономических параметров развития и модернизации сети под прогнозируемые объёмы трафика.
- Сравнение разных вариантов построения инфраструктуры, выбор рациональной архитектуры.

ПО «БАРС» активно используется операторами связи для планирования развития транспортных сетей с учетом обеспечения необходимой пропускной способности.

- APM **Foresight** – это отечественная разработка компании IBS для радиопланирования и анализа пропускной способности сетей мобильной связи стандартов 3G, 4G и 5G.

Основные функциональные возможности:

- Импорт цифровой карты местности, рельефа, зданий для максимального приближения к реальной инфраструктуре оператора.
- Моделирование распространения радиоволн, зон покрытия и ячеистой структуры сети с учетом рельефа, застройки, затенений.
- Расчет емкости радиоканалов и сот на основе заданного трафика голосовых вызовов и пакетной передачи данных.
- Оценка потенциального количества абонентов, которых может обслужить существующая сеть с заданным качеством.

- Оптимизация мест размещения базовых станций и их параметров для расширения покрытия и пропускной способности сети.

Использование APM Foresight позволяет операторам связи на этапе планирования сети обеспечить требуемую пропускную способность исходя из прогнозируемого роста абонентов и объемов трафика.

• **SET investment** – это инновационная российская разработка компании «Сетевые решения», предназначенная для моделирования, проектирования и расчёта опорных мультисервисных транспортных сетей электросвязи нового поколения.

Функциональные возможности:

- Моделирование топологии транспортной сети, инженерных систем и ресурсов узлов связи.
- Расчёт оптимальных сценариев построения инфраструктуры с применением перспективных технологий SDN, VPN, DWDM, 100GE, OTN.
- Оценка стоимости оборудования и лицензий, капитальных и операционных затрат.
- Определение оптимальной маршрутизации различных видов трафика.
- Анализ ключевых показателей производительности сети: пропускной способности, задержек, джиттера, потерь, отказоустойчивости.

Применение платформы SET investment позволяет операторам связи выполнить технико-экономическое обоснование построения масштабируемых высокотехнологичных транспортных сетей, отвечающим современным и перспективным требованиям по пропускной способности.

Заключение

В работе были рассмотрены основные методы анализа пропускной способности телекоммуникационных сетей – аналитическое моделирование, имитационное моделирование и натурные испытания. Каждый из подходов обладает своими преимуществами и недостатками.

Для комплексной оценки пропускной способности целесообразно комбинировать все три подхода.

Рассмотрена и решена задача обзора и анализа ряда инструментов зарубежного и отечественного программного обеспечения по оценке характеристик телекоммуникационных систем, в том числе – одной из определяющих – их пропускной способности, особенно актуальной в современном мире и перспективе взрывного роста потока данных в стране и мире.

Литература

1. Баранов И.А., Судницын П.С. Анализ пропускной способности освещенных оптических сетей. Москва: Горячая линия-Телеком, 2010. 230 с.
2. Вершинин В.И., Жуков В.Н. Пропускные способности высокоскоростных сетей с коммутацией на интерфейсах. Москва: Фолиант, 2015. 320 с.
3. Горовой А.Л., Лапаев Н.И. Анализ пропускной способности сетей с коммутацией на уровне канала. СПб: Наука, 2012. 270 с.

4. Дерюгин В.Н., Макарова О.К. Методы измерения и анализа пропускной способности телекоммуникационных сетей. Москва: Вильямс, 2018.
5. Краснов В.А. Теория пропускной способности многодорожечных систем связи. М: Статистика, 2009. 340 с.
6. Леонов В.М., Мелик-Пашаев А.А., Ткаченко И.В. Методы оценки пропускной способности оптических телекоммуникационных систем. М: Наука, 2016. 350 с.
7. Николаев В.А., Федотов В.И. Анализ пропускной способности телекоммуникационных систем в условиях многоклассового обслуживания. М: Фолиант, 2011. 243 с.
8. Петров А.С. Оценка пропускной способности в оптических сетях. Санкт-Петербург: Наука, 2013. 356 с.
9. Тимофеев М.В. Методы и инструменты анализа пропускной способности сетей Ethernet. Москва: Наука, 2019. 325 с.

УДК 004.04

Повышение эффективности мобильных приложений

Татьяна Сергеевна Аббасова, кандидат технических наук,
доцент кафедры информационных технологий и управляющих систем,
Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего образования
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

Проанализированы методы увеличения конверсии мобильных приложений; описаны этапы создания мобильного приложения для бартерного обмена товаров и услуг; даны рекомендации по оценке эффективности разработанного мобильного приложения; сформулирована методика повышения его эффективности, в которой критерием оптимизации является конверсия приложения; проведена оценка влияния различных факторов на эффективность приложения; осуществлена оценка эффективности разработанной методики на примере конкретного мобильного приложения.

Мобильное устройство, среда разработки, уникальные пользователи, ключевые факторы, прибыльность сервиса.

Improving the efficiency of mobile applications

Tatyana Sergeevna Abbasova, Candidate of technical Sciences, Associate Professor
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 methods of increasing the conversion of mobile applications are analyzed; the stages of creating a mobile application for barter exchange of goods and services are described; recommendations are given for assessing the effectiveness of the developed mobile application; a methodology for increasing its effectiveness is formulated, in which the optimization criterion is the conversion of the application; an assessment of the influence of various factors on the effectiveness of the application is carried out; an assessment of the effectiveness of the developed methodology is carried out using a specific mobile application as an example.

Mobile device, development environment, unique users, Key factors, service profitability.

Введение

В связи с широким внедрением мобильных технологий [1, С. 160] акту-

ально формирование навыков разработки мобильного приложения с применением технологий API (от англ. Application Programming Interface – программный интерфейс приложения) и UML (от англ. Unified Modeling Language – унифицированный язык моделирования). После того, как утверждена идея нового мобильного приложения, разработан прототип (визуальная составляющая мобильного приложения с применением технологий API), написан программный код, проведено тестирование и отладка, пройден этап релиза (публикации), актуальна оптимизация работы приложения для повышения его конверсии (привлечения пользователей).

Изложение проблемы

После публикации мобильного приложения с течением времени активность пользователей может значительно уменьшиться, то есть пользователи вошли в новое приложение, попробовали с ним работать – что-то им не понравилось, и количество пользователей снизилось. Это явление называется «выгоранием» аудитории. Необходимо разработать и реализовать методику для увеличения эффективности мобильных приложений, критерием эффективности является количество привлеченных пользователей (конверсия).

Результаты исследования

Исследованы существующие методы и стратегии повышения эффективности конверсии ASO (от англ. App Store Optimization) на основе комплекса мер по оптимизации страницы мобильного приложения [4, С. 389]. Сделан вывод о том, что для увеличения числа пользователей приложения наибольшую значимость имеют: алгоритм ранжирования для поисковой оптимизации в магазине приложений, программное обеспечение для обработки естественного языка, архитектурный паттерн, проведение A/B тестирования, push-уведомления.

Поставлена задача разработки мобильного приложения для бартерного обмена, так как широко распространенные интернет-сервисы типа «Авито» не включают такие функции, а многие существующие мобильные приложения на эту тему требуют регистрации через Facebook. В соответствии с поставленной задачей разработки интуитивно понятной и удобной платформы, где пользователи смогут находить предложения по бартерному обмену товаров и услуг, осуществлять сделки на основе взаимных интересов, разработано мобильное приложение, которое должно стать надежным инструментом для тех, кто хочет экономить ресурсы, находя эквивалентный обмен.

На этапе разработки прототипа мобильного приложения строится схема взаимного расположения функций приложения, обычно в формате диаграммы прецедентов UML (от англ. Unified Modeling Language – унифицированный язык моделирования). Диаграмма вариантов использования приложения для бартерного обмена, представленная на рисунке 1, показывает ключевые функции, доступные пользователю, и их взаимосвязи. Пользователь, изображенный в центре диаграммы, взаимодействует с различными модулями приложения.

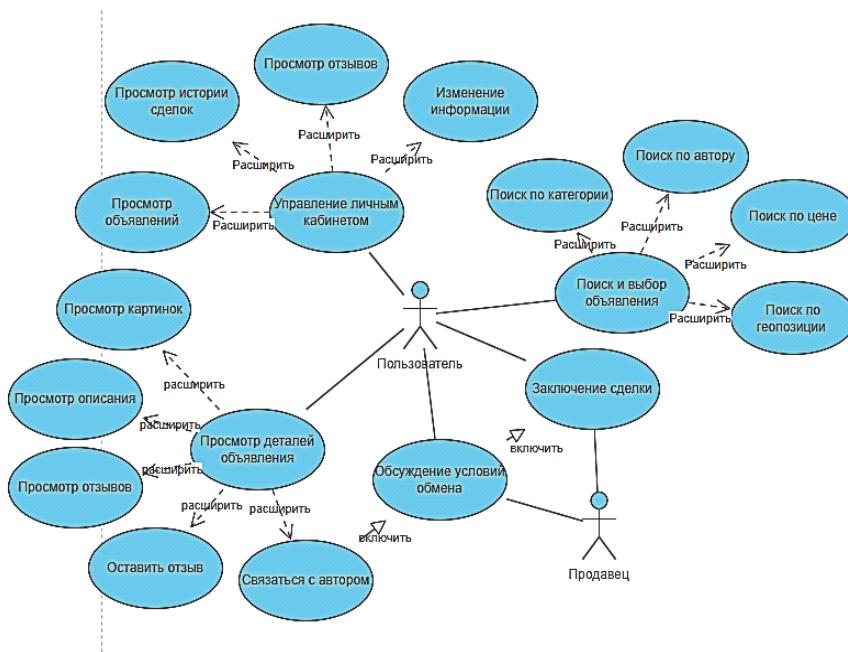


Рисунок 1 – Диаграмма вариантов использования приложения для бартерного обмена товаров и услуг

Различные элементы пользовательского интерфейса API для этого приложения представлены на рисунке 2, они созданы с помощью набора инструментов для построения современных пользовательских интерфейсов Jetpack Compose. Приложение разработано в Android Studio при помощи языка программирования Kotlin и языка разметки XML.

После релиза (публикации) мобильного приложения необходимо оценить его эффективность с помощью метрик. Метрика DAU (от англ. Daily active users) показывает количество уникальных пользователей, заходивших в приложение в течение суток, пример метрики приведен на рисунке 3. Метрика Retention Rate (уровень удержания), пример на рисунке 4, показывает усредненную динамику использования приложения после релиза.

Как видно из рисунков 3 и 4, после публикации мобильного приложения с течением времени активность пользователей может значительно снизиться, то есть пользователи вошли в новое приложение, попробовали с ним работать – что-то им не понравилось, и количество пользователей снизилось. Это явление называется «выгоранием» аудитории.

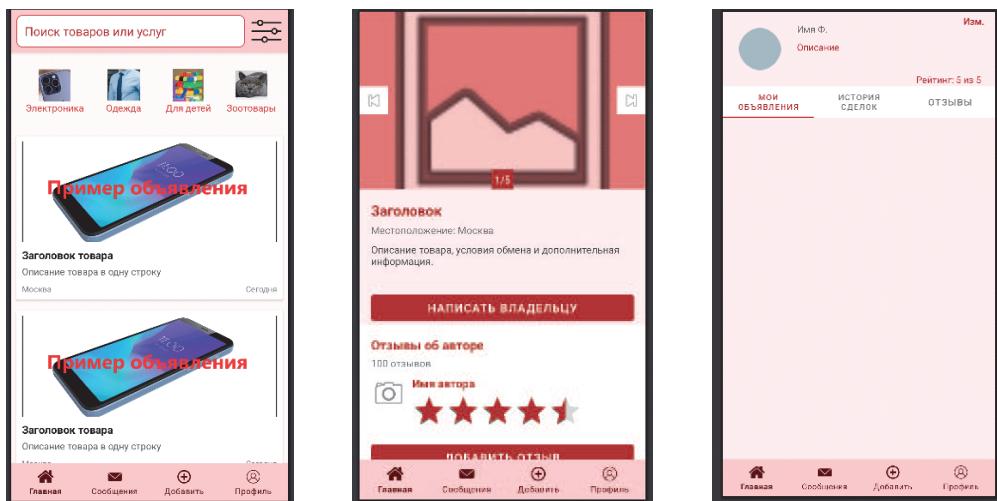


Рисунок 2 – Дизайн пользовательского интерфейса приложения для бартерного обмена: а – прототип главной страницы; б – прототип страницы объявления; в – прототип страницы «личный кабинет»

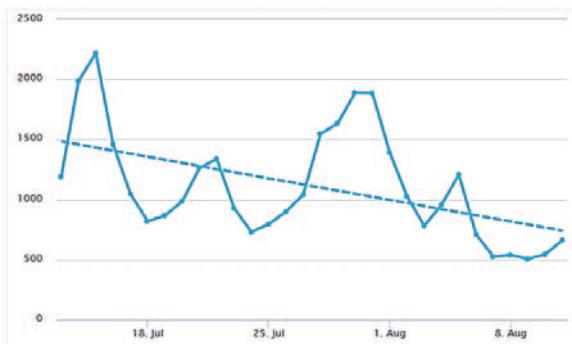


Рисунок 3 – Пример анализа активности приложения после его релиза

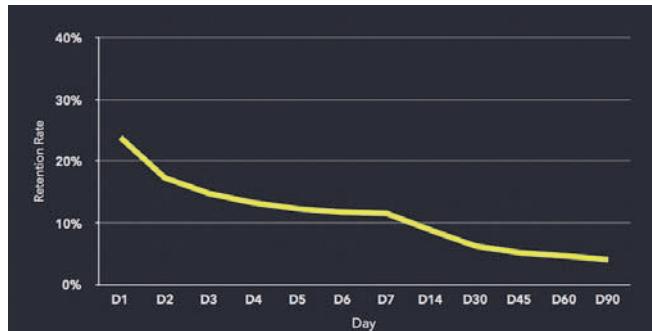


Рисунок 4 – Пример усредненной динамики Retention Rate в первые дни после загрузки приложения

«Выгорание» аудитории можно более точно оценить с помощью метрики Churn Rate (уровень оттока), рисунок 5, метрика показывает, какой процент пользователей прекращает работать с приложением – через неделю, месяц и так далее.

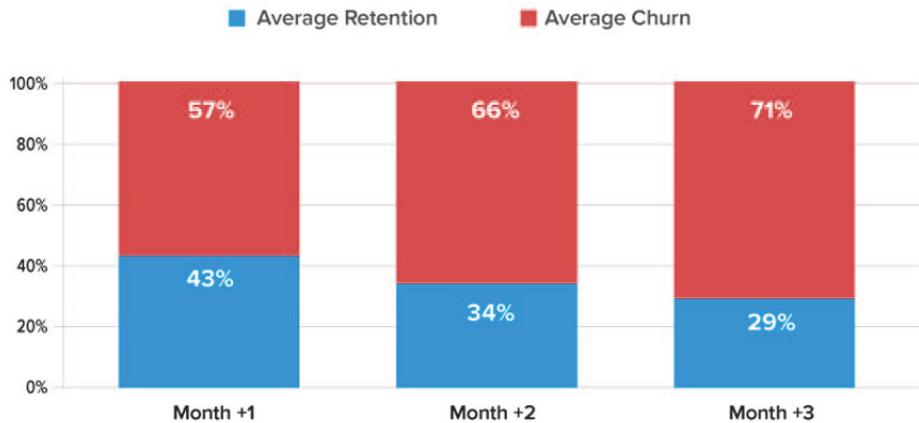


Рисунок 5 – Пример оценки темпов ухода аудитории из приложения

Метрика Churn Rate (C_R) обратна метрике Retention Rate (R_R)

$$100\% - C_R = R_R. \quad (1)$$

Получить информацию о всех метриках можно в «Конструкторе отчетов» мультиплатформенной системы аналитики и атрибуции для мобильных приложений myTracker, Яндекс Метрики и других средств аналитики тестирования интернет-ресурсов. Самый важный показатель для оценки мобильного приложения – это коэффициент конверсии C , который связывает количество пользователей мобильного приложения N_1 , совершивших целевое действие (то есть воспользовавшихся приложением) и общее количество пользователей, посетивших мобильное приложение, следующим образом

$$C = N_1 / N_2 \cdot 100 \%. \quad (2)$$

Практически любое мобильное приложение сталкивается с «выгоранием» аудитории, необходимо его дорабатывать в соответствии с анализом потребностей аудитории, а также использовать искусственный интеллект для сокращения оттока клиентов [2, С. 62]. Мобильные приложения используют алгоритмы машинного обучения, чтобы предложить клиенту персонализированный контент на основе его предпочтений и поведения.

Чтобы результаты анализа эффективности разработанного приложения в соответствии с приведенными метриками были удовлетворительными, необхо-

димо сформулировать и реализовать этапы методики для увеличения эффективности мобильных приложений:

- а) выбор алгоритма ранжирования для поисковой оптимизации в магазине приложений;
- б) выбор программного обеспечения для обработки естественного языка,
- в) выбор архитектурного паттерна,
- г) проведение А/В тестирования для различных вариантов страницы объявлений,
- е) формирование стратегии push-уведомлений с помощью языка Kotlin.

Магазины мобильных приложений созданы не только для того, чтобы разместить и предоставлять приложения, в их функции также входит организация поиска, категоризация [5, С. 35], фичеринг, хранение отзывов и оценок [6, С. 130]. Эти функции влияют на размещение приложения в поисковой выдаче (в топе). Семь основных факторов ранжирования показаны на рисунке 6. Более подробно факторы ранжирования описаны в [2, С. 63].



Рисунок 6 – Влияние на поисковую выдачу основных факторов ранжирования мобильного приложения

Требования к основным параметрам приложения для его удобного поиска в магазине приложений (на примере магазинов приложений App Store и Play Market) приведены в таблице 1.

По данным таблицы 1 можно сделать вывод, что предпочтительно использовать магазин приложений App Store и его алгоритмы ранжирования, а также можно добавить рекомендацию пользоваться отечественным аналогом App Store, который называется RuStore [3, С. 2].

Таблица 1 – Требования к основным параметрам мобильного приложения

	 App Store	 Play Market
Название		• до 30 символов
Краткое описание	• до 170 символов • не является значимым фактором ранжирования	• до 80 символов • учитывается при ранжировании
Подзаголовок	• до 30 символов • видим пользователям	не предусмотрено
Описание	• напрямую не влияет на позицию в выдаче • до 4 000 символов	• выступает фактором ранжирования • до 4 000 символов
Поле "Ключевые слова"	• до 100 символов • поле не видно пользователям, но важно для Apple	нет
Локализация	• 1 страна – 1 главная и 1 или несколько других	• 1 страна – одна локализация

Алгоритмы Word2vec работают таким образом – каждому слову присваивается уникальный набор чисел, являющийся семантическим вектором. Эти алгоритмы реализованы с помощью библиотеки Gensim для языка программирования Python. На рисунке 7 показаны результаты выявления с помощью технологии NLP проблем при использовании мобильного приложения.

Проблемы разделены на два кластера, кластеры выделены темным и светлым тоном. По данным рисунка 7 можно сделать вывод, что наибольшую трудность для пользователя вызывает обновление мобильного приложения. После обновления приложения образовывается повышенный фон обращений от обновленных приложений.

Также вызывают большие трудности непосредственной работы с мобильным приложением и записью информации, например, отзывов, у некоторых пользователей.

Таким образом, алгоритмы Word2vec позволяют оперативно выявить инциденты, сократить время их устранения, сделать мобильное приложение лучше, увеличить число привлеченных пользователей.

Целесообразно выбрать такой архитектурный паттерн для проектирования мобильного приложения, который обеспечивает разделение задач между различными уровнями приложения, то есть делает это приложение более модульным, тестируемым и обслуживаемым. Такой паттерн называется «чистая архитектура» [7, С. 281], его схема приведена на рисунке 8.

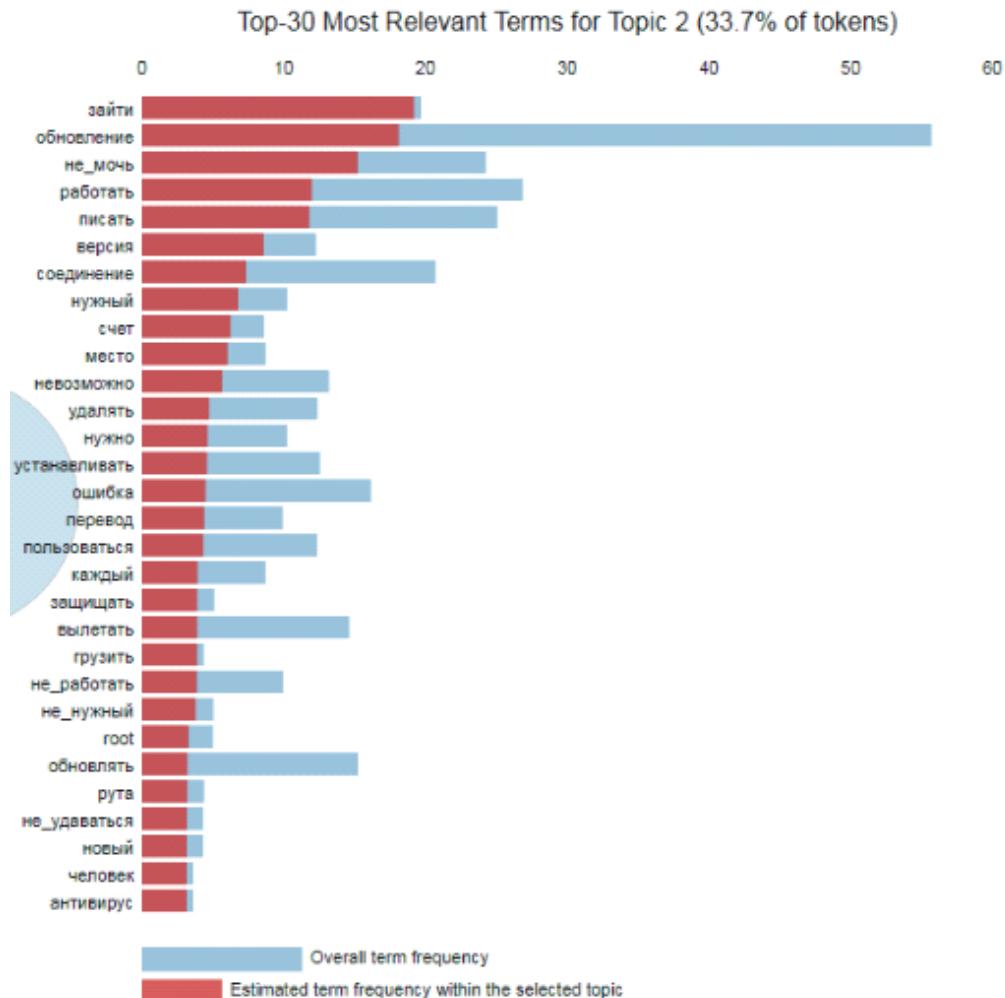


Рисунок 7 – Выявленные при анализе отзывов с помощью алгоритмов Word2vec
проблемы работы с мобильным приложением

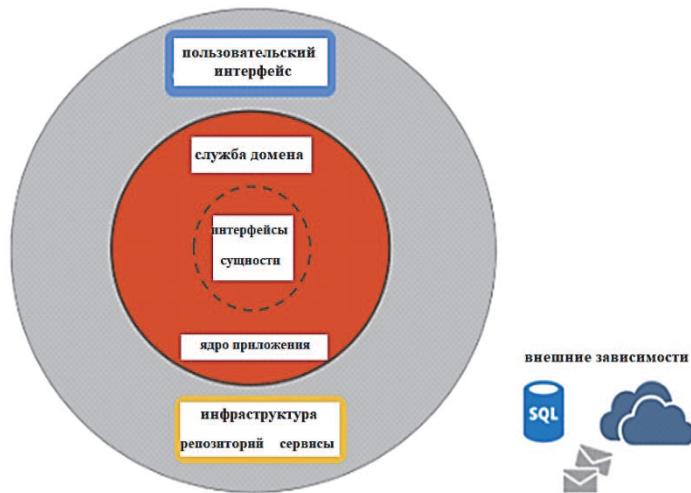


Рисунок 8 – Схема паттерна «чистая архитектура»

Результат внедрения «чистой архитектуры» показан на рисунке 9.

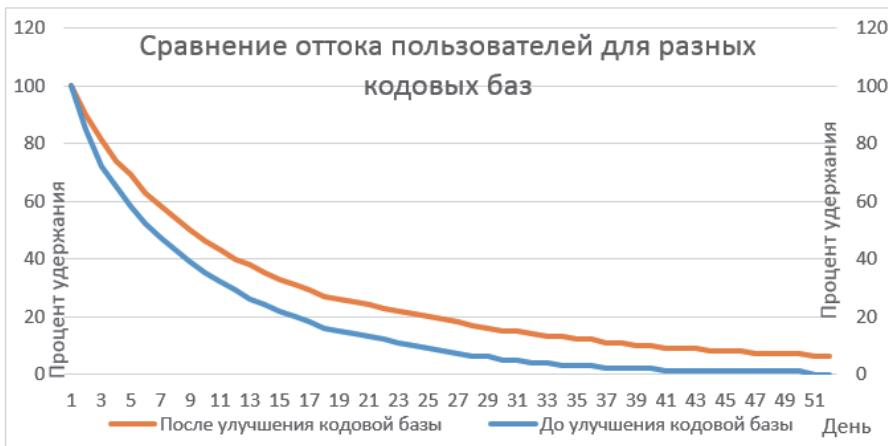


Рисунок 9 – Оценка улучшения кодовой базы после внедрения паттерна «чистой архитектуры»

А/В-тестирование применено для сравнения двух вариантов реализации элементов мобильного приложения. Выделены две контрольные группы пользователей мобильного приложения *A* и *B*, каждая группа оценивала свою версию элемента и как этот элемент влияет на общую концепцию поведения пользователя. Метрика для А/В тестирования – показатель конверсии; гипотеза – показатель конверсии в результате изменения дизайна страницы должен увеличиться. Тестируемый элемент – страница объявления (показана на рис. 2 б). На странице мало кнопок и они располагаются поочередно сверху вниз, схема расположения показана на рисунке 10 а. Внесено предложение добавить функциональность

этой странице, увеличить количество кнопок, расположить их в виде матрицы-таблицы, как показано на рисунке 10 б.

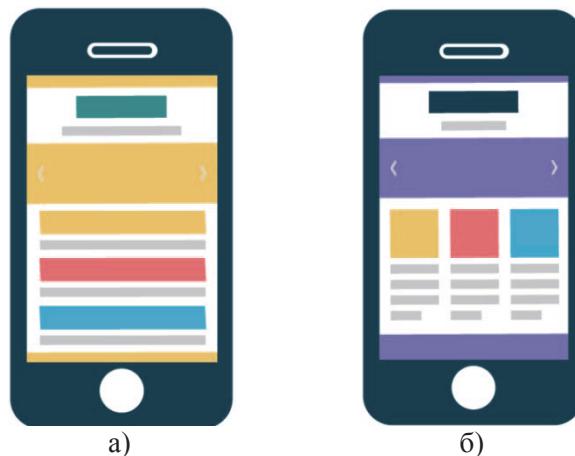


Рисунок 10 – Элементы для А/В тестирования: а – схема расположения кнопок, вариант А; б – схема расположения кнопок, вариант В

Определен размер выборки для тестирования: версия *A*, 1000 посетителей, 50 подписок (конверсия 5%); версия *B*, 1000 посетителей, 75 подписок (конверсия 7,5%). Тестирование с помощью Яндекс Метрики проведено в течение месяца, сделан вывод, что конверсия для выборки варианта *B* выше.

Для того, чтобы исключить ситуации, когда разработанное мобильное приложение не отвечает, в главном потоке имеются длительные операции, оценивается показатель ошибки ANR (от англ. Application Not Responding – приложение не отвечает). Эту ошибку отслежена с помощью Google Play, в его функции входит автоматическая отправка отчётов об ошибках ANR, рисунок 11.

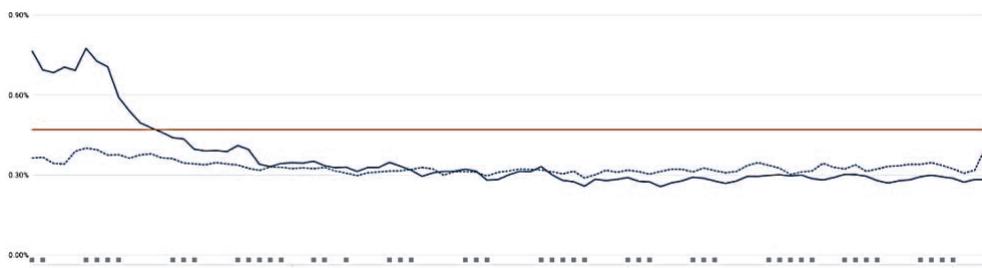


Рисунок 11 – Показатель ошибки «приложение не отвечает»

На рисунке 12 максимальный порог поведения, определенный Google, показан прямой, параллельной оси абсцисс. По оси ординат оценивается доля ANR-ошибок в процентах. Из рисунка 11 видно, что измеренный показатель ошибки становится ниже по сравнению с порогом поведения, и достигает 0,28%.

Для создания уведомлений в разработанном мобильном приложении

применен конструктор класса `NotificationCompat.Builder` языка `Kotlin`. Сервисы `App Store / RuStore` отображают статистику уведомлений. Формирование стратегии `push`-уведомлений включает следующие задачи: а) уместность, а не массовость; б) отправка в подходящее время (время наибольшей активности пользователей); в) краткий и грамотный формат; г) добавление ссылок, кнопок действий «Ответить», «Архивировать», «Заказать»; д) приоритет уведомлений, сопровождение наиболее важных уведомлений звуком.

Наиболее простым способом определения эффективности уведомлений является расчет коэффициента удержания пользователей C_{RR} (от англ. Customer Retention Rate)

$$C_{RR} = ((Q_2 - Q_n) / Q_1) \cdot 100\%, \quad (3)$$

где Q_2 – количество пользователей на конец периода наблюдения за функционированием приложения с внедренными уведомлениями, Q_n – количество новых пользователей, зарегистрировавшихся за период использования уведомлений, Q_1 – количество пользователей на начало периода внедрения уведомлений. При наблюдениях оценивался временной период, равный месяцу. Проведенные наблюдения показали, что применение уведомлений вызвало следующие изменения в количестве пользователей: сначала количество пользователей уменьшилось с 3500 до 3300, но потом появилось 122 новых пользователя, поэтому величина коэффициента удержания пользователей C_{RR} определится следующим образом: $(3422 - 122) / 3500 \cdot 100\% = 94\%$.

В рамках исследования, направленного на выявление ключевых факторов, влияющих на прибыльность сервиса, была проведена детализированная аналитика пользовательского поведения за последние 50 дней с помощью Яндекс Метрики. Результаты аналитики представлены на рисунке 12.

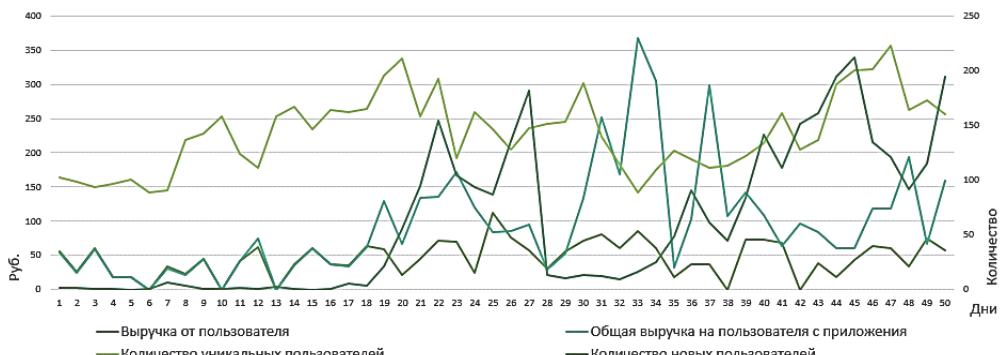


Рисунок 12 – Результаты анализа поведения пользователей мобильного приложения для бартерного обмена

Результаты анализа данных, приведенных на рисунке 12, свидетельствуют о том, что несмотря на существенные колебания исследуемых показателей, общая выручка на пользователя с приложения растет, количество уникальных

пользователей соответствует коэффициенту удержания 94%.

Исследования проведены в рамках практических занятий и кейсов по дисциплине «Мобильные технологии» для студентов направления подготовки 09.03.02 «Информационные системы и технологии».

Заключение

Разработана и реализована методика увеличения эффективности мобильных приложений. Методика основана на выборе магазина приложений App Store / RuStore, осуществляющего лучшую поисковую оптимизацию; аналитике поведения пользователей в приложении с помощью алгоритмов обработки естественного языка word2vec и А/В тестирования; стратегии формирования уведомлений.

Приведен пример разработанного мобильного приложения для бартерного обмена с помощью набора инструментов: языка программирования мобильных приложений Kotlin и среды разработки Android Studio. Показатель ошибки «приложение не отвечает» по сравнению с максимальным порогом поведения, определенным Google, ниже и составляет 0,28%. В результате проведенного А/В тестирования обоснована более удобная с точки зрения юзабилити схема расположения кнопок. Общая выручка на пользователя с приложения растет, количество уникальных пользователей соответствует коэффициенту удержания 94%.

Литература

1. Аббасова Т.С., Аббасов Э.М. Обработка агрегированных данных веб-сервисов // Современные информационные технологии: Сборник научных статей 9-й Международной научно-технической конференции, Бургас, 04-05 июля 2023 года. Бургас: Институт за хуманитарни науки, икономика и информационни технологии=Институт гуманитарных наук, экономики и информационных наук, 2023. С. 159-166.
2. Атажонова С.Б., Останакулов Х.М. Роль искусственного интеллекта и машинного обучения в поисковой оптимизации / В сборнике: Актуальные проблемы и тенденции развития современной экономики и информатики. Материалы Международной научно-практической конференции. Бирск, 2024. С. 61-64.
3. Аналитики: RuStore обогнал App Store в РФ по количеству заходов в приложение, 2024 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rozetked.me/news/32356-analitiki-rustore-obognal-app-store-v-rf-pokolichestvu-zahodov-v-prilozhenie/> (дата обращения 21.01.2025).
4. Брончукова Т.В., Горбунова О.Н. Разработка эффективной стратегии продвижения интернет-ресурса / В сборнике: Проблемы развития национальной экономики на современном этапе. Материалы Международной научно-практической конференции. Отв. редакторы А.А. Бурмистрова [и др.]. 2020. С. 388-393.
5. Ковалев И.И., Аббасова Т.С. Поддержка принятия решений на основе правил доказательной аргументации // Информационно-технологический вестник, 2024. №1 (39). С. 34-47.
6. Пономаренко В.П., Белодед Н.И. Разработка кроссплатформенных мобильных

- приложений // Актуальные проблемы социально-экономического развития современного общества: Материалы V международной научно-практической конференции, Киров, 29 мая 2024 года. Киров: Кировский государственный медицинский университет, 2024. С. 529-531.
7. Садрутдинов Ф.Р. Обзор архитектурных подходов совместимых с принципами чистой архитектуры, применяемых при проектировании Android приложений / В сборнике: Техника и технология современных производств. Сборник статей V Всероссийской научно-практической конференции. Пенза, 2024. С. 279-284.
8. Ямпольская А.И. Векторизация в процессе подготовки данных к обработке естественного языка // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2023: Сборник трудов VI международного научно-технического форума. В 10-ти томах, Рязань, 01-03 марта 2023 года / Под общей редакцией О.В. Миловзорова. Том 4. Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, 2023. С. 214-221.

УДК 621.396.626

**Математические алгоритмы численного определения собственных
значений корреляционной функции сигнала на выходе радиоканала с
рассеянием по запаздыванию**

Евгений Кимович Самаров, доктор технических наук,
заведующий кафедрой математики,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
морской технический университет», г. Санкт-Петербург

Рассмотрен математический метод численного определения собственных значений и функций однородного уравнения Фредгольма 2-го рода, ядром которого является корреляционная функция сигнала на выходе радиоканала с рассеянием по запаздыванию. Проведен пример решения и порядок оценки точности получаемых результатов.

Радиоканалы связи с замираниями и рассеянием по запаздыванию, зона многолучевости, метод механических квадратур, точность определения собственных функций, априорная оценка, формулы трапеций.

**Mathematical algorithms for the numerical determination
of the eigenvalues of the correlation function of the signal at the output
of a radio channel with delay scattering**

Evgeny Kimovich Samarov, Doctor of Technical Sciences,
Head of the Department of Mathematics,
St. Petersburg State Maritime Technical University, St. Petersburg

A mathematical method for numerically determining the eigenvalues and functions of a homogeneous Fredholm equation of the 2nd kind, the core of which is the correlation function of the signal at the output of a radio channel with delay scattering, is considered. An example of the solution and the procedure for evaluating the accuracy of the results obtained are carried out.

Radio communication channels with fading and delay scattering, multipath zone, mechanical quadrature method, accuracy of determining eigenfunctions, a priori estimation, trapezoid formulas.

Введение

Для описания многих радиоканалов часто используют модель гауссовского стационарного в широком смысле канала с некоррелированным рассеянием [1-3].

Комплексная огибающая сигнала на выходе такого канала с рассеянием по запаздыванию представляет собой реализацию комплексного гауссовского

процесса с нулевым средним значением и корреляционной функцией [4]

$$R(t, \tau) = \int_a^b \sigma(r) u(t-r) u^*(\tau-r) dr, \quad (1)$$

где $\sigma(r)$ – функция рассеяния канала; $u(t)$ – комплексная огибающая излученного сигнала; $(^*)$ – знак комплексного сопряжения; $[a, b]$ – интервал наблюдения сигнала.

Основой для синтеза оптимальных приемников в таком канале и анализа их помехоустойчивости является определение собственных значений λ_i и функций $\varphi_i(t)$ корреляционной функции (1) из одного уравнения

$$\lambda_i \varphi_i(t) = \int_a^b R(t, \tau) \varphi_i(\tau) d\tau, \quad i = 1, 2, \dots, \quad (2)$$

процедура аналитического решения которого для произвольных $\sigma(r)$ и $u(t)$ неизвестна.

Проведем обоснование метода численного решения уравнения (2) для любых $\sigma(r)$ и $u(t)$ путем замены его ядра вырожденным.

Метод численного решения уравнения для любых $\sigma(r)$ и $u(t)$.

Произвольно разбивая интервал $[a, b]$ на $M = N - 1$ частей точками r_n , то есть

$$a = r_1 < r_2 < \dots < r_N = b,$$

заменяя интервал в (1) конечной суммой

$$R(t, \tau) \approx \sum_{n=1}^N v_n(t) v_n^*(\tau), \quad (3)$$

где

$$v_n(t) = \sqrt{c_n \sigma(\xi_n)} u(t - \xi_n). \quad (4)$$

Здесь c_n коэффициенты квадратурной формулы численного интегрирования в узлах ξ_n расположенных внутри отрезков $[r_{n-1}, r_n]$.

Подставляя (3) в (2) и обозначая

$$x_{ni} = \int_a^b v_n^*(\tau) \varphi_i(\tau) d\tau, \quad (5)$$

имеем

$$\lambda_i^c \varphi_i^c(t) = \sum_{n=1}^N v_n(t) x_{ni}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (6)$$

где λ_i^c и $\varphi_i^c(t)$ – приближенные значения λ_i и $\varphi_i(t)$.

Умножая (6) на $v_k^*(t)$, интегрируя на интервале $[a, b]$ и пользуясь (4), (5), получаем систему линейных уравнений для неизвестных x_{ki}

$$\lambda_i^c x_{ki} = \sum_{n=1}^N \alpha_{kn} x_{ni}, \quad i, k = 1, 2, \dots, N, \quad (7)$$

где

$$\alpha_{kn} = \sqrt{c_k c_n \sigma(\xi_k) \sigma(\xi_n)} B(\xi_k - \xi_n), \quad (8)$$

где, в свою очередь, $B(\xi_k - \xi_n) = \int_a^b u^*(t - \xi_k) u(t - \xi_n) dt$ – отсчеты автокорреляционной функции комплексной, огибающей $u(t)$.

Решение системы (7) можно легко получить с использованием стандартных методов определения собственных значений и собственных векторов эрмитовых матриц, а соответствующие λ_i^c собственные функции согласно (4), (6) имеют вид

$$\varphi_i^c(t) = \sum_{n=1}^N \sqrt{c_n \sigma(\xi_n)} x_{ni} u(t - \xi_n). \quad (9)$$

На рисунке 1 представлены графики изменения первой нормированной собственной функции (9) для [4]

$$u(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{T}} & \text{при } |t| \leq \frac{T}{2}; \\ 0 & \text{при } |t| > \frac{T}{2}, \end{cases} \quad (10)$$

где T – длительность сигнала и

$$\sigma(r) = \left(\frac{\sqrt{2}}{L}\right) \exp\left\{-2\pi\left(\frac{r}{L}\right)^2\right\}, \quad (-\infty < r < \infty), \quad (11)$$

где L – зона многолучевости при $T = 2$ мкс и различных L .

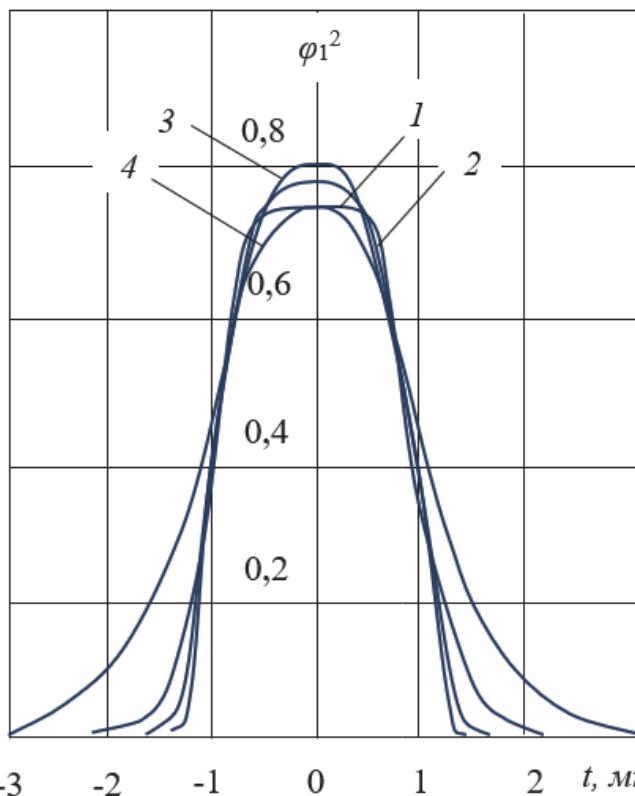


Рисунок 1 – Графики изменения первой нормированной собственной функции,
где кривые 1-4 соответствуют: 1 - $L = 0,5$; 2 - 1; 3 - 2; 4 - 4

На рисунке 2 представлены графики изменения первых четырех собственных значений в зависимости от отношений входящих в (11) и (10) параметров L и T , номера кривых соответствуют номерам собственных значений.

Точность получаемых результатов зависит от величины интервала $[a, b]$, типа квадратурной формулы и числа M . Величина $\Omega = b - a$ выбирается из естественного условия $\Omega \geq T + L$, а тип квадратурной формулы и число узлов определяются на основе оценки отклонения собственных значений (2) от собственных значений системы (7), после преобразования уравнения (2) к другому виду.

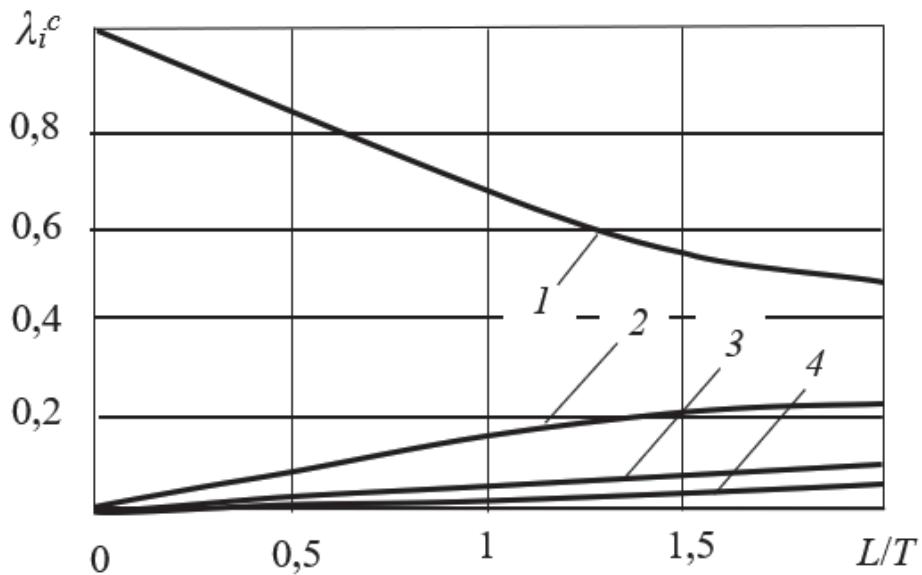


Рисунок 2 – Графики изменения первых четырех собственных значений параметров L и T

Подставляя (1) в (2), изменяя порядок интегрирования, обозначая

$$f_i(r) = \sqrt{\sigma(r)} \int_a^b u^*(\tau - t) \varphi_i(\tau) d\tau,$$

умножая обе части полученного равенства на

$$\sqrt{\sigma(s)} u^*(t - s)$$

и интегрируя по t на интервале $[a, b]$, получаем уравнение

$$\lambda_i \varphi_i(s) = \int_a^b K(s, r) f_i(r) dr, \quad i = 1, 2, \dots, \quad (12)$$

где

$$K(s, r) = \sqrt{\sigma(s) \sigma(r)} B(s - r), \quad (13)$$

собственные значения которого совпадают с собственными значениями ядра (1).

Из сопоставления (13) и (8) следует, что при решении (12) методом механических квадратур [2] с такими же параметрами квадратурной формулы, как и при замене интеграла в (1), задача сводится к уже рассмотренной задаче решения системы (7) и точность получаемых результатов будет одинаковой.

Эту точность можно определить на основе оценки

$$\Delta = \max \delta_i,$$

где $\delta_i = |\lambda_i - \lambda_i^c|$, $i = 1, 2, \dots, N$, по методике [5].

Согласно наиболее простым априорным оценкам Виландта, использование формулы трапеции позволяет обеспечить

$$\Delta \leq 0,54 \left(\frac{\Omega}{M} \right) \max \left| \frac{\partial}{\partial s} K(s, r) \right|, \quad (14)$$

откуда следует, что для решений, показанных на рисунках 1 и 2, при $\Omega = 6$ мкс, $M = 100$, величина Δ изменяется от 0,2816 при $L = 0,5$ мкс до 0,0074 при $L = 0,4$ мкс.

Апостериорные оценки Δ можно получить с использованием результатов [5], либо при тестовых расчетах.

На рисунке 3 представлены зависимости $\lg \delta_i$ от M , где номера кривых 1-4 соответствуют номерам собственных значений, полученные с использованием формулы трапеций для сигнала [4]

$$u(t) = \frac{2^{1/4}}{\sqrt{T}} \exp \left\{ -\pi \left(\frac{t}{T} \right)^2 \right\}, \quad (-\infty < r < \infty),$$

и функции рассеяния (11) при $T = 2$ мкс, $L = 1$ мкс и $\Omega = 6$ мкс.

Точные значения λ_i в этом случае равны [4]

$$\lambda_i = (1 - p)p^{i-1}, \quad i = 1, 2, \dots,$$

где

$$p = \frac{\sqrt{1+\nu^2}-1}{\sqrt{1+\nu^2}+1}; \quad \nu = \frac{L}{T}.$$

Штриховая линия 5 на рисунке 3 соответствует априорной оценке (14). Хотя, как видно из рисунка 3, оценка (14) является завышенной, применение более точных, но громоздких оценок, полученных в [5], вряд ли целесообразно, поскольку выбор типа и параметров квадратурной формулы с использованием простых оценок, подобных (14), гарантирует высокую точность расчета собственных значений.

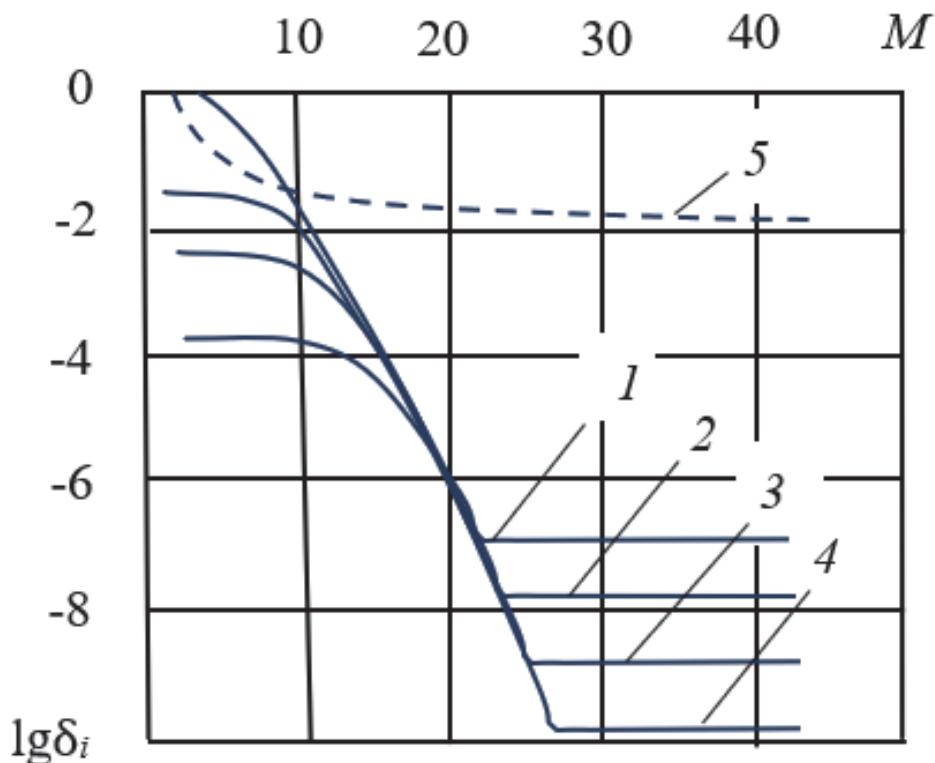


Рисунок 3 – Зависимости $\lg\delta_i$ от M

Точность определения собственных функций для рассматриваемого примера также достаточно высока.

При $M = 100$, величина

$$\max|\varphi_i(t) - \varphi_i^c(t)|, a \leq t \leq b, i = \overline{1,4},$$

где [3]

$$\varphi_i(t) = \gamma_{i-1} H_{i-1}(gt) \exp\left\{-\frac{(gt)^2}{2}\right\};$$

$$\gamma_k = \sqrt{\frac{g}{k! 2^k \sqrt{\pi}}};$$

$$g = \frac{\sqrt{2\pi}}{T \sqrt[4]{1+\nu^2}};$$

$$H_k(z) = (-1)^k \exp z^2 \frac{d^k}{dz^k} (\exp - z^2),$$

не превышает $3,5 \times 10^{-4}$.

Результаты тестовых расчетов подтверждают правильность рассмотренного метода.

Выводы

Таким образом, рассмотрен и проанализирован метод численного определения собственных значений и собственных функций корреляционной функции сигнала на выходе радиоканала с рассеянием по запаздыванию. Рассмотрен математический метод численного определения собственных значений и функций однородного уравнения Фредгольма 2-го рода, ядром которого является корреляционная функция сигнала на выходе радиоканала с рассеянием по запаздыванию. Проведен пример решения и порядок оценки точности полученных результатов.

Показано, что результаты тестовых расчетов подтверждают правильность рассмотренного метода.

Литература

1. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Статистические характеристики смеси сигнала и аддитивно-мультиплекативных помех с негауссовским характером распределения // Радиотехника. 2017. № 1. С. 95-102.
2. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кабельков Г.М. Численные методы и программирование. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2003. 632 с.
3. Винер Норберт. Интеграл Фурье и некоторые его приложения / пер. с англ. Н.Я. Виленкина. М.: Физматгиз, 1963. 256 с.
4. Кеннеди Р. Каналы связи с замираниями и рассеянием. М.: Сов. Радио, 1973. 304 с.
5. Мысовских И.П. Методы вычислений: [Сб. ст.] / ЛГУ им. А.А. Жданова; Л.: Изд-во ЛГУ. Ленинград: Изд-во ЛГУ, 1985. 183 с.

УДК 004.05

Анализ путей реализации схемы эксплуатации СКС «по потребности»

Андрей Борисович Семенов, доктор технических наук, профессор,

Национальный исследовательский университет

Московский государственный строительный университет

(НИУ МГСУ), г. Москва,

Владимир Михайлович Арtyushenko, 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 анализа рассмотрены пути наращивания общей эффективности эксплуатации СКС как сложной технической системы через применение схемы «по потребности». Показана необходимость внедрения в состав волоконно-оптических и витопарных стационарных линий СКС дополнительного технологического коннектора как необходимого условия реализации этой схемы. Приведена классификация задач, решаемых в процессе реализации применения схемы «по потребности» и выполнен анализ особенностей их решения.

Структурированные кабельные системы, техническая эксплуатация, технологический разъем.

Analysis of ways to implement SCS usage according to the «on demand» scheme

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

As part of the system analysis, the ways to increase the overall efficiency of the SCS operation as a complex technical system through the use of the «on demand» scheme are considered. The necessity of introducing an additional technological connector into the composition of fiber-optic and twisted pair permanent links and channels SCS as a necessary condition for the implementation of this scheme is shown. The classification of tasks solved in the process of implementing the «as needed» scheme is

given and the analysis of the specifics of their solution is performed.

Structured cabling systems, technical operation, technological connector.

Введение

Современный объект недвижимости, на котором постоянно или длительное время находятся люди, вне зависимости от его назначения (производственное, жилое или общественное здание) в реалиях сегодняшнего дня в обязательном порядке оборудуется информационно-телекоммуникационной системой (ИТС) [3]. Аналогично классическим системам инженерного обеспечения здания (водопровод, электроснабжение, вентиляция, кондиционирование и аналогичные им) ИТС предназначена для того, чтобы сделать пребывание людей на объекте максимально комфортным. Поставленная цель достигается за счет предоставления пользователям, подключенными к системе, высококачественного доступа к услугам, которые оказываются телекоммуникациями и информационными технологиями.

ИТС рассматриваемой разновидности строится в соответствии с проверенной временем моделью OSI взаимодействия открытых систем. Физический уровень реализующей ее структуры с начала 90-х гг. прошлого столетия в подавляющем большинстве случаев выполняется в виде структурированной кабельной системы (СКС). Несмотря на наличие альтернатив, этот вариант из-за своих известных преимуществ получил наибольшее практическое распространение.

СКС демонстрирует высокую степень типизации своей структуры: содержит в общем случае три подсистемы, которые реализованы на медножильной и волоконно-оптической элементной базе и выполнены в виде совокупности стационарных линий и кабельных трактов. При этом кабельная система даже среднего масштаба насчитывает в своем составе несколько тысяч отдельных компонентов, т.е. представляет собой типичную сложную техническую систему.

Вопросам стандартизации, построения и оптимизации СКС как сложной технической системы посвящено большое количество публикаций: библиография на только русском языке насчитывает несколько сотен наименований, в т.ч. монографического характера, например, [1, 13]. Вопросам эксплуатации внутриобъектовой информационной кабельной системы уделяется существенно меньше внимания. В этом нет ничего удивительного, т.к. сказывается то, что в основу СКС изначально был положен принцип «построил и забыл».

Рост интереса к вопросам эксплуатации СКС как необходимость

СКС представляет собой одно из самостоятельных направлений развития кабельной техники, которое в существующем виде окончательно сформировалось в начале 90-х гг. прошлого столетия в момент принятия первого поколения американских стандартов. Прошедшие с этого момента практически полные три с половиной десятка лет – огромный срок даже по меркам кабельной техники, которая отличается явно выраженным техническим консерватизмом.

Изначальная идея, которая была заложена в СКС как в технический объект массового применения, оказалась во многом исчерпана уже к началу второго десятилетия текущего века. Свой вклад в ускорение развития соответствующих процессов вносят высокие темпы технического прогресса в области электроники и телекоммуникаций. С учетом важности структурированной проводки как типового средства реализации внутриобъектовых ИТС перед отраслью встал вопрос о восстановлении той исходной техники-экономической привлекательности, которую СКС демонстрировала на ранних этапах своего существования.

Высокая сложность СКС как системы фактически форсированно предполагает наличие довольно большого количества направлений ее совершенствования, что отмечалось ранее [7, 8]. В первую очередь улучшаются параметры элементной базы, используемой для формирования стационарных линий и кабельных трактов, а также технологии их монтажа. Немаловажное значение с учетом изменения условий внедрения приобретает наращивание функциональных возможностей и эксплуатационной гибкости стационарных линий и трактов как основных комплексных объектов СКС. Большую перспективность демонстрирует направление в части целенаправленной гармонизации интерфейсов активного и пассивного оборудования [4] и прямого внедрения функционально законченных решений на основе их интеграции [5].

В части совершенствования процедур использования уже законченной строительством СКС большие перспективы потенциально демонстрирует обращение к методу эксплуатации по потребности [12]. Его использование дает возможность значительно снизить те большие разовые капитальные затраты, которые необходимы для реализации СКС по классическим принципам.

Указанный эксплуатационный прием наиболее предпочтителен в тех случаях, когда адаптация кабельной системы к новым потребностям ИТС не требует выполнения в полевых условиях технических сложных процедур установки элементов разъемных соединителей на волокна или витые пары линейных кабелей. Иначе говоря, все необходимые изменения, в т.ч. добавление новых компонентов ограничиваются простыми переключениями, которые выполняются с помощью различных соединителей. При этом применение компонентов заводского изготовления делает излишним инструментальное подтверждение уровня качества вновь сформированных кабельных стационарных линий и трактов.

В процессе адаптации СКС к потребностям ИТС на протяжении текущей эксплуатации решаются разнообразные задачи. Их полную совокупность можно классифицировать по нескольким основным независимым группам, что демонстрирует рисунок 1.



Рисунок 1 – Основные разновидности задач, решаемых в процессе эксплуатации СКС по схеме «по потребности»

Далее рассмотрены основные варианты решения задач каждой из обозначенных групп.

Наращивание класса кабельной системы

СКС с системной точки зрения допустимо рассматривать как совокупность стационарных линий, которые в процессе формирования кабельных трактов соединяются друг с другом, а также подключаются к интерфейсам активного сетевого оборудования коммутационными шнурами. При этом стационарная линия образует фиксированную часть кабельной системы, которая в большинстве случаев остается неизменной на протяжении всего срока эксплуатации кабельной системы.

Тем не менее, при возникновении такой необходимости класс стационарной линии можно увеличить, если только такая возможность предусматривается на этапе проектирования СКС.

Применительно к медножильной части СКС наращивание класса технически реализуется без выполнения новой инсталляции. С учетом заложенного в профильные стандарты на уровне постулата принципа «слабого звена» данная процедура возможна, если

- для формирования линейной части стационарной линии используется стационарный кабель более высокой категории, что не требует его замены;
- при построении стационарной линии на кабель устанавливаются розеточные части соединителя, конструкция которого соответствует концепции Edge connector.

Первое положение очевидно, а второе требует дополнительного пояснения. Его суть заключается в том, что в соединитель изначально закладываются запасы по пропускной способности. Розеточная часть разъема выполняется двухкомпонентной в виде оконцевателя с контактами под проводники витых пар и

собственно гнезда под вилку. Для их соединения привлекается внутренний технологический коннектор. Последний считается частью соединителя и по своему форм-фактору не обязан соответствовать стандартным разъемам СКС. Обычно реализуется по линейной или квадратной схеме взаимного расположения контактов, которая обеспечивает заметно лучшие шумовые параметры разъема как компонента кабельного тракта.

Сам разъем класса Edge connector должен быть функционально идентичен моноблочному. Дополнительно на него накладывается требование в части телекоммуникационных параметров: для поддержания открытого характера кабельных трактов СКС они должны быть по крайней мере не хуже по сравнению с теми, которые обеспечиваются стандартным соединителем, рисунок 2.

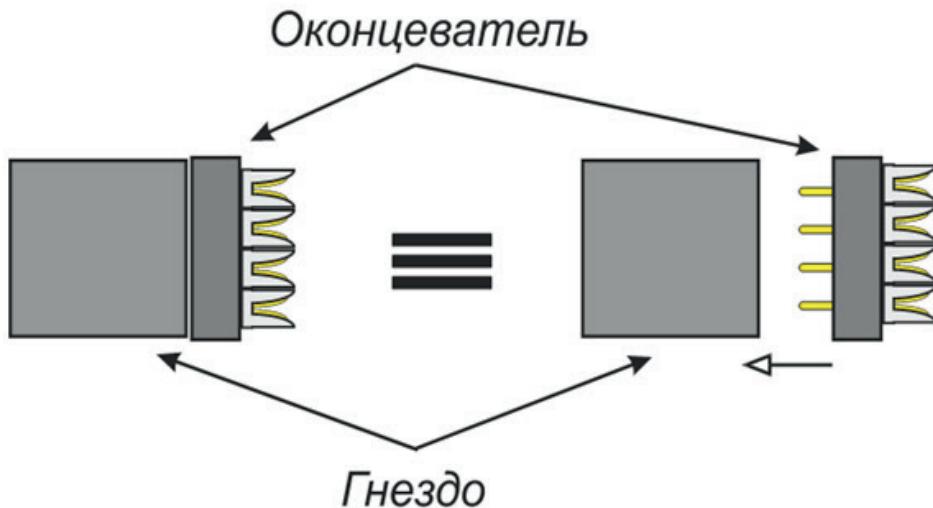


Рисунок 2 – Функциональная идентичность моноблочной (слева) и разборной (справа, с технологическим коннектором) розеток модульного разъема

Выигрыш по величине защищенности сигнала от переходной помехи, а также расширения ширины полосы пропускания в случае замена разъема на более широкополосный в качественной форме демонстрирует рисунок 3.

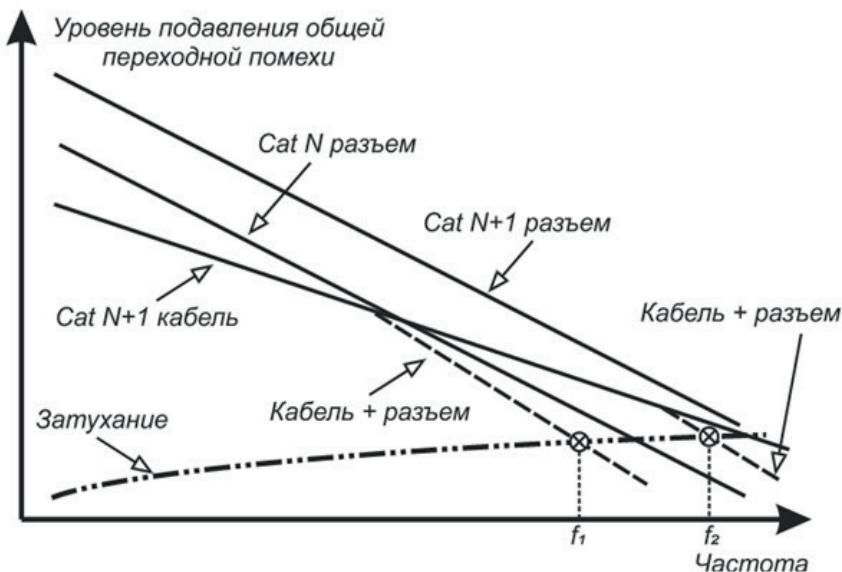


Рисунок 3 – Расширение полосы пропускания симметричного кабельного тракта при увеличении категории разъема

Для оптической подсистемы СКС наращивание класса, для которой разъем не влияет на частотные характеристики кабельного тракта, наращивание класса линии выполняется простой заменой волокна на более широкополосное. Эта процедура возможна в случае применения технологии пневматической прокладки, в основу которой положено использование в линейной части кабельной системы т.н. трубчатого кабеля. Пример конструкции такого изделия для применения на нижнем пользовательском уровне ИТС приведен на рисунке 4.

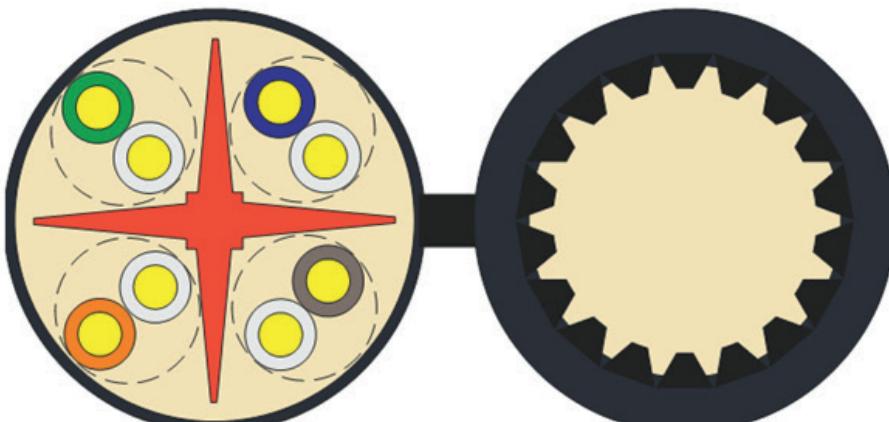


Рисунок 4 – Дуплексный (сиамский) горизонтальный кабель с трубкой для задувки волокна по технологии пневматической прокладки

В процессе организации связи в данную трубку осущененным сжатым воздухом или азотом вдувается одиночное волокно или маловолоконный микрокабель со специальным образом подготовленной внешней поверхностью для увеличения скорости продвижения по каналу [2, 6].

О выгодности технологии свидетельствует скорость прокладки, которая в благоприятных условиях может достигать 40 м в минуту.

Отметим, что технология пневматической прокладки позволяет также реализовать схему «по запросу» подачи волокна в нужную точку, т.е. дополнительно улучшить экономические параметры информационной кабельной системы.

Смена типа интерфейса

Как известно, стандартами СКС в пользовательских информационных розетках разрешается использование трех видов соединителей: модульного типа, типа Tera и типа GG45.

С учетом достигнутого уровня техники вместо GG45 рекомендуется установка розетки ARJ45, которая обратно совместима по своим рабочим контактам с GG45, но при этом за счет исключения из конструкции внутреннего переключателя заметно дешевле и более надежна, рисунок 5.

Кабельные тракты СКС с разъемами модульного типа поддерживают скорость передачи вплоть до 10 Гбит/с. При необходимости скорость может быть увеличена до 40 Гбит/с с использованием стандартной элементной базы [10].

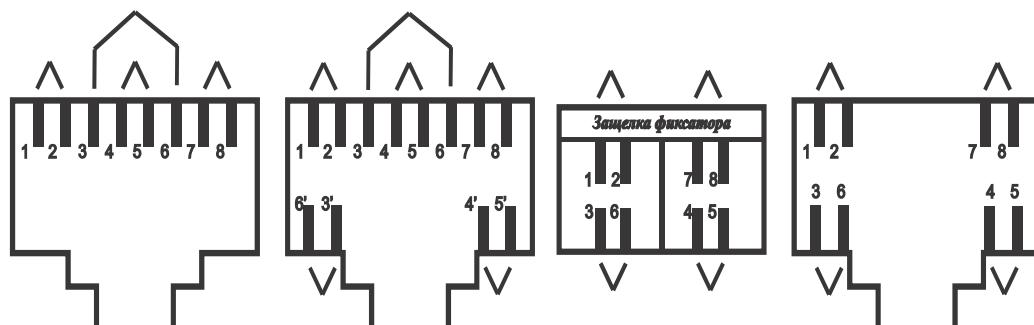


Рисунок 5 – Разновидности розеток разъемов для кабелей из витых пар.
Слева направо: модульный, GG45, Tera, ARJ45

Эта процедура выполняется, в частности,

- при наращивании класса кабельного тракта до уровня F и Fa;
- в процессе замены несимметричного по вилкам абонентского или коммутационного шнура на симметричный;
- во время подключения к СКС пока еще достаточно распространенных на практике устройств с коаксиальным или триаксиальным интерфейсом (чаще всего это телевизионный приемник с ВЧ-входом).

Возможен ряд вариантов выполнения рассматриваемой процедуры. Наиболее просто она осуществляется в случае применения разъемного соединителя с внутренним технологическим коннектором.

С учетом слабой практической востребованности медножильных линий

класса F и выше, необходимость смены типа интерфейса встречается в практике эксплуатации СКС достаточно редко.

Применение схемы cable sharing

Схема cable sharing основана на использовании одного горизонтального кабеля для поддержки функционирования аппаратуры одновременно нескольких приложений. Де-факто представляет собой аналог популярного в волоконной оптике метода пространственного уплотнения оптического кабеля.

В основу идеи внедрения cable sharing в массовую практику эксплуатации нижних уровней ИТС положено простое соображение о том, что большинство терминальных устройств функционируют на скорости не выше 100 Мбит/с. Это дает возможность построения канала связи в 2-парном варианте в линейной части. С учетом достаточно высокого междупарного переходного затухания стандартного кабельного тракта СКС достижение необходимых для нормального функционирования сетевых интерфейсов качественных показателей канала связи не сопровождается появлением серьезных проблем.

При любой реализации рассматриваемого принципа для его осуществления необходим корпусной или шнуровой адаптер. С эксплуатационной точки зрения наиболее выгодно корпусное исполнение этого устройства по полускрытой схеме, что, в свою очередь, возможно при наличии у разъема технологического коннектора.

Принцип cable sharing наиболее целесообразно для массового практического использования в экранированной СКС. Обращение к нему выгодно в первую очередь тем, что позволяет в более полной степени использовать доступную пропускную способность дорогостоящей экранированной техники.

Изменение схемы передачи. Потребность в адаптации кабельной системы к применению новой схемы передачи в процессе эксплуатации является типичной задачей для машинного зала ЦОД. Причина такового положения дел заключается в том, что

- на скоростях 100 Гбит/с и выше из-за недостаточного быстродействия современной электроники неизбежно приходится переходить на схему параллельной передачи;
- из-за небольших дальностей связи (средняя протяженность стационарной линии близка к 30 м) схема спектрального мультиплексирования не позволяет добиться хороших стоимостных параметров даже в случае двухволной передачи [11].

В такой ситуации целесообразно воспользоваться хорошими массогабаритными показателями волоконного световода и применить для решения задачи построения быстродействующий межмашинной линии связи физическую параллельную передачу. Это влечет за собой необходимость перехода от традиционных дуплексных трактов к параллельным.

Без замены линейной части кабельной системы указанная задача наиболее просто решается в случае построения стационарных линий по модульно-кассетной схеме, рисунок 6 [9].



Рисунок 6 – Структура простого волоконно-оптического тракта, построенного с использованием модульно-кассетной техники

При такой структуре линии изменение схемы передачи сводится к простому применению вместо одной оконечной кассеты другой. Кассета в этом случае берет выполняет функции корпусного адаптера, а ее замена занимает предельно мало времени. Последнее чрезвычайно важно с той точки зрения, что нарушение нормального функционирования системы воздушного охлаждения как типового средства утилизации того большого объема тепла, которое выделяется при функционировании сетевого оборудования и серверов машинного зала, занимает предельно малое время.

Комбинацию из вилки транкового кабеля и линейного разъема кассеты вполне допустимо рассматривать как функциональный аналог технологического разъема медножильных линий. Отличается от него только тем, что вилка транкового кабеля при необходимости может взять на себя функции тестового интерфейса кабельной системы без использования специализированных переходников для подключения кабельного сканера.

Еще одним отличием оптического технологического разъема становится то, что он выполняется на типовых компонентах. Дополнительные потери, вносимые в цепь передачи оптического сигнала дополнительным соединителем, сравнительно легко решают за счет тех больших запасов по параметрам относительно требований стандартов, которые характерны для современной техники оптической подсистемы СКС.

Действительно, стандарты допускают потери на одном многомодовом соединителе 0,75 или 0,5 дБ (в зависимости от типа сетевого интерфейса). Типовая величина этого параметра для разъемов в исполнении Elite колеблется в пределах 0,15-0,25 дБ. Это позволяет удвоить количество коннекторов в тракте без нарушения общего затухания.

Заключение

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Достигнутый уровень техники СКС позволяет заметно нарастить эксплуатационную гибкость внутриобъектовой информационной кабельной системы за счет реализации стратегии «по потребности» текущей эксплуатации с привлечением для этого серийно выпускаемой элементной базы без выполнения новых разработок.

2. С учетом сложности замены линейного кабеля стационарной линии СКС ключевым элементом, обеспечивающим массовую реализацию принципа

«по потребности» в реальной практике эксплуатации СКС различного назначения, становится разъем с внутренним технологическим коннектором.

3. Технологический коннектор волоконно-оптической и медножильной подсистем демонстрируют высокую степень сходства, но не являются полными функциональными аналогами.

4. Технологический коннектор для электропроводных линий СКС требует выполнения специальных разработок.

5. Технологический коннектор многомодовой волоконно-оптической подсистемы, поддерживающей схему эксплуатации «по потребности», может быть реализован на стандартной элементной базе, но отвечать исполнению Elite по гарантированному создаваемому затуханию (вносимые потери не свыше 0,25 дБ).

Литература

1. Гальперович Д.Я., Яшнев Ю.В. Инфраструктура кабельных сетей. М.: Русская панорама, 2006. 248 с.
2. Гриффен В. Прокладка кабелей в трубках / Пер с англ. Санкт-Петербург, Гипротранссигналсвязь, 2001. 138 с.
3. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 4-е изд. СПб.: Питер, 2010. 944 с.
4. Семенов А.Б. Перспективы применения в СКС однопортовых розеток // Первая миля. 2024. № 3(119). С. 26-3.
5. Семенов А.Б. Активная консолидационная точка // Вестник связи. 2020. № 8. С. 20-24.
6. Семенов А.Б. Системы пневматической прокладки волоконных световодов для применения в технике СКС // Фотон-экспресс. 2008. № 7-8(71-72). С. 45-47.
7. Семенов А.Б., Артюшенко В.М. Анализ структурированных кабельных систем в системной точке бифуркации. Вертикальная интеграция и особенности ее внедрения // Информационно-технологический вестник. 2024. № 3(41). С. 56-67.
8. Семенов А.Б., Артюшенко В.М. Анализ структурированных кабельных систем в системной точке бифуркации. Системные вопросы // Информационно-технологический вестник. 2024. № 2(40). С. 36-48.
9. Семенов А., Журавлева М., Сидоркина И. Модульно-кассетные волоконно-оптические решения с улучшенными параметрами // Журнал сетевых решений LAN. 2014. № 3. С. 49.
10. Семенов А., Макуев А., Фомичев Б. Структурированные кабельные системы категории 8 // Первая миля. 2016. № 5(58). С. 58-62.
11. Семенов А.Б., Портнов Э.Л., Колесников О.В. Технология BiDi для терабитных скоростей – первые шаги // Фотон-экспресс. 2023. № 7(191). С. 8-12.
12. Семенов А.Б., Сиднев С.А., Царенко В.А. Математическая модель процесса технической эксплуатации информационной кабельной системы по схеме «по

- потребности» // Информационно-технологический вестник. 2024. № 2(40). С. 49-65.
13. Смирнов И.Г. Структурированные кабельные системы – проектирование, монтаж и сертификация. М.: Экон-Информ, 2005. 348 с.

УДК 629.7

**О концепции создания подвижных автономных комплексов
дистанционного аэромониторинга состояния объектов
на контролируемых территориях большой площади с использованием
ракет легкого класса**

Людмила Григорьевна Азаренко, профессор базовой кафедры
«Управление и информационные технологии в космических системах»,

доктор экономических наук, доцент, главный научный сотрудник,

Григорий Григорьевич Вокин, заведующий базовой кафедрой
«Управление и информационные технологии в космических системах»,

доктор технических наук, профессор,

НИИ космических систем им. А.А. Максимова – филиал АО ГКНПЦ

им. М.В. Хруничева, г. Королев, Московская область,

Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего образования

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

В статье излагаются вопросы получения информации о состоянии объектов самого различного назначения, дислоцируемых на территории большой площади, на основе использования предлагаемой технологии дистанционного аэромониторинга и дистанционно-кибернетической технологии доставки средств с использованием ракет. Для решения упомянутых задач в качестве основных составных частей структуры перспективных комплексов аэромониторинга предлагается использовать ракеты различной дальности и беспилотники, базирующиеся на подвижных стартовых платформах.

Аэромониторинг, датчики, ракеты, беспилотники, каналы связи, объекты контроля, мобильные стартовые платформы.

**On the Concept of creating mobile autonomous complexes for remote
air-monitoring the condition of objects in controlled territories of a large
area using light-class missiles**

Ludmila Grigorievna Azarenko, D.Sc. (Economy), docent, Chief Scientific Officer,
Grigory Grigorievich Vokin, D.Sc. (Tech.), professor,

honored worker of science of the Russian Federation,

Head of the basic Department of Technology university,

Space Systems Research Institute named after A.A. Maximov – a branch of FSUE
Khrunichev State Research and Production Space Center, Korolev, Moscow region,

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 paper outlines the issues of obtaining information about the condition of objects in controlled territories of a large area based on the use of the proposed remote air-monitoring technology and remote cybernetic technology for the delivery of funds using missiles. To solve these tasks it is proposed to use missiles of various ranges and drones based on three launch platforms as the main components of the structure of promising air-monitoring complexes.

Remote air-monitoring, sensors, missiles, drones, communication channels, objects of control, mobile launch platforms for launching light-class missiles.

Введение

Общеизвестно исключительно большое значение характеристик и параметров состояния объектов оборонного и социально-экономического назначения для их бесперебойного и эффективного использования. Эффективность мониторинговой информации во многом определяется уровнем автоматизации процессов получения и обработки первичной информации, интеграции и сроков доставки информации потребителю, уровнем объема, комплексности и многофакторности информации. В статье предлагается вариант построения системы мониторинга, обладающей во многом упомянутыми свойствами.

Одновременно с выполнением упомянутых требований-пожеланий может быть осуществлено только при системном анализе и синтезе систем мониторинга, потому что, как свидетельствует практика, процессы индивидуального контроля состояния объектов уходят в прошлое, как менее эффективной технологии, судя по затратным показателям по их содержанию и другим характеристикам. В связи с этим возникают актуальные вопросы создания эффективных систем мониторинга объектов как социально-экономического назначения, так и особенно оборонного характера на основе использования мобильных стартовых платформ, большого спектра датчиков первичной информации, работающих на различных физических принципах, а также на основе использования таких летательных аппаратов, как беспилотники и ракеты относительно небольшой дальности действия (например, до 500 км).

1. О задачах дистанционного получения информации о состоянии объектов оборонного и социально-экономического назначения, находящихся на территориях большой площади

К настоящему времени создано много систем контроля состояния объектов различного назначения, в основном, локального характера. Но практика управления территориями требует создание систем мониторинга обзорного интегрирующего характера, причем мониторинга объектов самого различного назначения. В настоящее время возникла необходимость при мониторинге выявлять, в первую очередь, критическое состояние объектов путем периодического контроля, потому что постоянный контроль связан пока что с неприемлемыми затратами. В статье приводится актуальный перечень объектов социально-экономического и оборонного назначения большой площади, подлежащие контролю.

Для примера можно указать на необходимость периодического контроля в таких областях деятельности, как:

- контроль лесных массивов с точки зрения наличия пожаров, незаконной вырубки лесов, оценки количества зверей и птиц;
- оценка состояния рек и озёр в период половодья или при наступлении холодов;
- оценка состояния посевов на полях;
- выявление косяков рыбы, например, в прибрежных районах;
- оценка состояния вулканов и состояния дорог в горах;
- сбор информации о состоянии загруженности шоссейных дорог и водных магистралей;
- осуществление контроля государственной границы и выявление военных приготовлений в приграничной зоне;
- оказание помощи поисковым командам при определении точек попадания частей ракет, отделяемых на активном участке при их испытаниях;
- получение информации о противнике в зоне боевого соприкосновения или в ближайшем тылу противника;
- обзор и контроль газопроводов, нефтепроводов, высоковольтных линий электропередач;
- поиск заблудившихся людей;
- доставка первоочередной помощи людям, попавшим в трудные условия, а также военнослужащим, попавшим, например, в окружение;
- оказание помощи людям, оказавшимся на аварийном судне и т.п.

Очевидно, что для решения этих задач, причем далеко неинформационных задач, требуются иные технологии сбора информации и оказание помощи. В докладе предпринята попытка осветить основные из них.

2. Характеристика подхода к созданию систем контроля состояния важнейших объектов на основе использования технологий дистанционного мониторинга и дистанционно-кибернетической доставки целевых грузов

Представления о функциях и содержании мониторинга, которые в прошлые времена сводились к наблюдению за локальными объектами и их охране, существенно расширились и углубились, а также стали более интегрированными как по количеству контролируемых объектов, так и по пространственному их распределению на больших площадях.

Применительно к предлагаемым в докладе комплексам мониторинга учитываются сформировавшиеся требования к современным системам мониторинга, вытекающая из потребностей практической деятельности. В этом отношении приведем первоочередные приемы и элементы подхода на основе использования технологии дистанционного мониторинга и дистанционно-кибернетической доставки полезных грузов [1, 2]:

- при мониторинге должна получаться не только информация о состоянии объекта, но в случае необходимости должна обеспечиваться доставка с высокой точностью к объекту полезных грузов, необходимых для выживания объекта;
- должно осуществляться дистанционное определение параметров внешней среды (температуры, сведений о погодных условиях и ландшафте окружающей среды и т.д.);
- информация об объекте должна включать время наблюдения и координаты объекта;
- выявлять при обзоре объекты в аномальном состоянии;
- осуществлять активацию датчиков, установленных на объекте, с борта беспилотников;
- обеспечивать мониторинг на больших площадях контролируемых территорий;
- необходимо максимально автоматизировать процесс получения информации об объекте и ее обработки, в том числе и с использованием элементов искусственного интеллекта;
- обеспечение автономности компонентов аэромониторинга и их мобильности.

Следует отметить, что к настоящему имеется широкий спектр датчиков получения информации об объектах и окружающей их среде и эффективных информационных технологий их обработки и преобразования.

Технология дистанционно-кибернетической доставки целевых грузов с помощью ракет содержательно изложена в работах [1-4], при этом будет целесообразным отметить важнейшие её составляющие.

Дистанционно-кибернетическая технология доставки в заданный район, расположенный на значительном расстоянии от старта, например, на дальности 100-500 км и более, информационно-разведывательных, боевых, спасательных средств или продуктов питания за самое короткое время может быть реализована в результате выполнения целого ряда упорядоченных операций, среди которых к важнейшим следует отнести, в первую очередь, следующие операции:

- компоновка ракеты-носителя и головной части, включающей две основные составляющие: компактно сложенный беспилотный летательный аппарат (БПЛА) самолетного или вертолетного типа и обтекатель – теплозащитный корпус (ТЗК). При этом, в свою очередь, кроме несущей конструкции, БПЛА включает двигатель и его составные элементы, систему управления и целевую нагрузку;
- осуществление расчёта полётного задания ракеты-носителя и БПЛА с учётом коррекции его полёта с использованием крупномасштабных эталонных карт физических полей (рельефа, оптических и радиолокационных снимков) в пределах заданного целевого района и на подходе к нему;

- прицеливание и запуск ракеты в соответствии с полётным заданием с подвижной стартовой платформы, предпочтительно по настильной траектории;
- перевод головной части в конце пассивного участка траектории на горизонтальный полёт на высоте около одного километра с помощью рулей, расположенных на ТЗК;
- осуществление отделения БПЛА от ТЗК после прохождения, например, звукового барьера. Эта операция является ключевой в выдвигаемой технологии доставки целевых грузов (средств) на большую дальность за физически самое малое время. Именно эта операция является, образно говоря, прорывной, именно она сообщает выдвигаемой технологии существенные признаки новизны. Более того, она снимает проблему получения высокой точности стрельбы (вплоть до прямого попадания в цель), в том числе и для боевых ракет межконтинентальной дальности. При этом, несмотря на то, что решение проблемы обеспечения высокой точности попадания межконтинентальных ракет было предложено 45 лет назад и новые научно-технические решения были защищены соответствующими авторскими свидетельствами, в том числе и в закрытом варианте [1-4], однако конструкторы ракет до сих пор не использовали это научно-техническое достижение для обеспечения высокоточной доставки боевых блоков стратегических ракет к целям, доставки в том числе с точностью вплоть до прямого попадания в цель. Уместным будет попутно отметить также, что проблема достижения межконтинентальной дальности стрельбы баллистическими ракетами была решена в 50-х годах прошлого века путём использования параллельной установки ракетных модулей с двигателями на отделяемой первой ступени ракеты;
- осуществление после отделения БПЛА запуска двигателей, раскрытия несущих поверхностей и включение всех командных подсистем системы управления для обеспечения высокоточного полёта БПЛА на высоте 40-100 м с огибанием рельефа и выполнения программных операций полётного задания;

- проведение заключительных операций боевого задания: проведение оперативной разведки местности и передача данных мониторинга на узел связи старта непосредственно или через ретранслятор, высокоточный и мягкий сброс целевого груза потребителю, сброс автоматизированных разведывательно-информационных средств для последующего дежурного мониторинга и передачи данных на старт, минирование и самонаведение по излучениям цели или по её образу и т.п.

При реализации изложенного подхода может быть технически обеспечен многофункциональный аэромониторинг упомянутых объектов и доставка к объектам остро необходимых средств.

Схема выполнения некоторых этапов предлагаемой технологии доставки средств и получения информации условно отражена на рисунке 1.

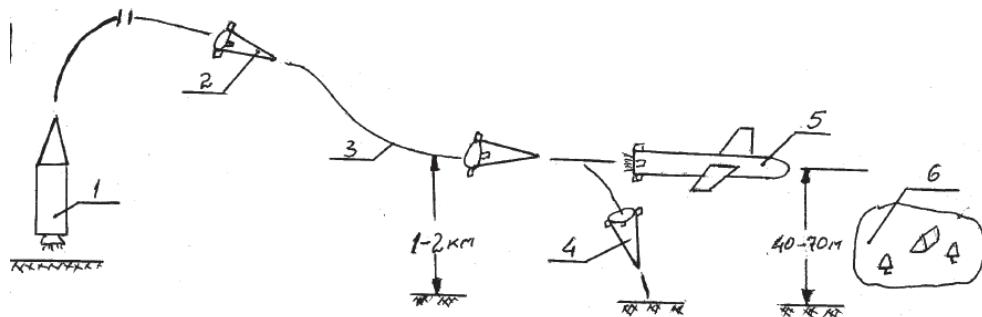


Рисунок 1 – Условная схема полета ракеты-носителя легкого класса и беспилотного летательного аппарата, оснащенного датчиками аэромониторинга или снабженного полезной нагрузкой:

- 1 – ракета-носитель лёгкого класса, 2 – головная часть, 3 – участок перехода,
4 – теплозащитный корпус, 5 – беспилотный летательный аппарат,
6 – район аэромониторинга – район доставки полезного груза

3. Структура первого приближения автономного мобильного комплекса дистанционного аэромониторинга на основе использования беспилотников и ракет легкого класса

Количество составных частей структуры рассматриваемого комплекса и их функциональное назначение определяются, как очевидно, функциями, которые необходимо выполнять при проведении аэромониторинга. На начальном этапе синтеза структуры комплекса целесообразно вычленить, в первую очередь, самые важные и ключевые элементы:

- стартовые мобильные платформы для запуска традиционных беспилотников и ракет, осуществляющих доставку беспилотников в зону контроля в соответствии с дистанционно-кибернетической технологией самой быстрой доставки грузов;
- блок хранения беспилотников самолетного или вертолетного типа, запускаемых с платформы, и беспилотников, доставляемых в район контроля с помощью ракеты;
- блок хранения датчиков информации, устанавливаемых на объектах и активизирующихся с борта, и бортовых датчиков дистанционного контроля;
- головной офис управления (штаб) мобильного комплекса;
- офис связи и расчета полетных заданий;
- офис дислокации функциональных расчетов личного состава;
- энергетический блок и блок питания личного состава комплекса;
- хранилище вспомогательного технологического оборудования.

На рисунке 2 условно приведены ключевые элементы структуры и функции комплекса аэромониторинга.

Очевидно, что элементы, названные на рисунке 2, и многие другие, не

перечисленные, размещаются в транспортных средствах (кунгах) автономного комплекса мониторинга, основой ходовой части которых является использование колёс. Есть основания полагать, что перечисленные элементы, будучи увязанными в единую структуру в соответствии с технологией аэромониторинга, способны сообща реализовать функции, возлагаемые на комплекс мониторинга в целом.



Рисунок 2 – Элементы структуры и основные функции, возлагаемые на комплексы аэромониторинга

Очевидно, что при создании мобильного комплекса мониторинга целесообразно использовать уникальный опыт создания и эксплуатации подвижных боевых ракетных комплексов наземного базирования с ракетами различного радиуса действия.

4. Вопросы организации эксплуатации и базирования предлагаемых типов комплексов аэромониторинга

Излагаемые выше соображения дают достаточно сведений о функциональных возможностях. К характерным особенностям предлагаемых комплексов следует отнести:

- большую площадь контролируемой территории;
- многофункциональный мониторинг;
- получение не только информации об объектах, но и возможность доставки к объектам материальных средств;
- высокую степень автоматизации процессов мониторинга;
- мобильность и оперативность;
- двойное назначение: комплексы могут применяться как в интересах социально-экономических объектов, так и при организации мероприятий оборонного характера.

Организационно комплекс представляет автономную производственную структуру.

Очевидно, что могут быть созданы комплексы с различным числом функций в зависимости от потребностей. На начальных стадиях использования комплексов, когда их будет еще мало, целесообразно, чтобы они были мобильными, но по мере их увеличения и накопления опыта их использования можно их сделать стационарными для обслуживания контролируемой территории. При этом, когда комплексов будет пока мало, то целесообразно, конечно, чтобы обслуживание контролируемых территорий производилось только периодически или по мере острой необходимости.

5. Ожидаемый эффект от использования предлагаемых комплексов аэромониторинга объектов различного назначения

Ожидаемый эффект оценивается, в первую очередь, по величине предупрежденного ущерба, когда было своевременно обнаружено аномальное состояние контролируемого объекта.

Очень важным элементом эффекта является оказание оперативной помощи людям, попавшим в трудные условия. Это касается как социальной сферы, так и оборонной.

Обеспечение всех руководящих служб контролируемой территории информацией о состоянии объектов даёт надежную основу для организации планомерной их деятельности по эксплуатации объектов, расположенных на упомянутых площадях.

Заключение

1. Предложены концептуальные соображения и обоснованные предложения по созданию комплексов многофункционального аэромониторинга объектов на контролируемых территориях большой площади на основе использования беспилотников и ракет относительно небольшой дальности действия (например, до 500 км).

2. Предлагаемые комплексы обладают возможностью обеспечения потреб-

бителей не только интересующей информацией о состоянии контролируемых объектов, но и оперативно доставлять материальные средства объектам и людям, попавшим в критические ситуации.

3. Комплексы обладают потенциальными возможностями решений задач в интересах как социально-экономической сферы, так и при организации мероприятий оборонного характера.

Литература

1. Вокин Г.Г. О перспективах создания и функциональных возможностях ДКО // Научно-технический журнал «Авиационная техника и технология». 2015. № 3-4. С. 58-68.
2. Вокин Г.Г. Дистанционно-кибернетическое оружие – альтернатива оружию ядерному?: приглашение к размышлению и поиску решений. Королев. ООО «Триада-С», 2024. 128 с.
3. Вокин Г.Г. Способ экстренной доставки средств спасения объектам, попавшим в экстремальные условия и терпящим бедствие в удаленных безлюдных районах земного шара с неточно известными координатами и аэробаллистическая система для его осуществления. Патент № 207759 от 08.02.1993. 1997. Бюллетень № 10 Комитета по патентам и товарным знакам. С. 15-17.
4. Вокин Г.Г. Ракета спешит на помощь // Ежемесячный журнал «Армейский вестник». 2001. № 6. С. 43-45.

УДК 621.391

**Оптимизация законов фазовой модуляции сигнала
в радиолокационных системах с высокой частотой
повторения импульсов**

Яна Юрьевна Ионченкова, старший преподаватель кафедры математики,
Евгений Кимович Самаров, доктор технических наук,
заведующий кафедрой математики,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской
технический университет», г. Санкт-Петербург

Рассмотрена возможность оптимизации закона фазовой модуляции последовательности зондирующих импульсов по критерию минимума дисперсии нескомпенсированного остатка пассивной помехи на выходе выбеливающего фильтра. Показано, что при наложении пассивных помех, принимаемых с различных дальностей и имеющих несовпадающие энергетические спектры, оптимизация закона фазовой модуляции дает существенный выигрыш в величине коэффициента подавления пассивных помех по сравнению со случаем использования немодулированного сигнала. Сформулированы условия оптимальности и приведены примеры синтеза оптимальных законов фазовой модуляции.

Фазовая модуляция, радиолокационный сигнал, высокая частота повторения импульсов, пассивные помехи, синтез оптимальных законов фазовой модуляции, зондирующий сигнал.

Optimization of the laws of signal phase modulation in radar systems with high pulse repetition rate

Yana Yuryevna Ionchenkova, is a senior lecturer at the Department of Mathematics,
Evgeny Kimovich Samarov, Doctor of Technical Sciences,
Head of the Department of Mathematics,
St. Petersburg State Maritime Technical University, St. Petersburg

The possibility of optimizing the law of phase modulation of the probing pulse sequence by the criterion of minimum dispersion of the uncompensated passive interference residue at the output of the bleaching filter is considered. It is shown that when passive interference is applied, received from different ranges and having mismatched energy spectra, optimization of the phase modulation law gives a significant gain in the value of the passive interference suppression coefficient compared to the case of using an unmodulated signal. Optimality conditions are formulated and examples of synthesis of optimal laws of phase modulation are given

Phase modulation, radar signal, high pulse repetition rate, passive interference, synthesis of optimal laws of phase modulation, probing signal.

Введение

Исследованию систем череспериодической компенсации (ЧПК) пассивных помех (ПП) посвящено большое количество работ [2-6]. Однако в этих работах отсутствуют результаты исследования потенциальных возможностей ЧПК в условиях, когда ПП образована наложением помех от нескольких источников, локализованных в различных элементах разрешения по дальности, разделенных интервалами с

$$cT_{\pi}/2,$$

где c – скорость распространения электромагнитных волн; T_{π} – период повторения зондирующих импульсов, и имеющих несовпадающие энергетические спектры флуктуаций. Такой случай типичен для радиолокационных систем (РЛС) с высокой и средней частотами повторения импульсов [4].

В данной работе рассмотрена задача ЧПК при наложении ПП с учетом фазовой модуляции (ФМ) зондирующего сигнала и показана возможность оптимизации закона ФМ по критерию минимума дисперсии не скомпенсированного остатка ПП на выходе выбеливающего фильтра.

Структура выбеливающего фильтра. Считаем, что ПП, наблюдаемая в канале дальности приемного устройства, образована наложением ПП из M разрешаемых по дальности импульсных объемов, расположенных на дальностях

$$m_{\nu}cT_{\pi}/2,$$

где m_{ν} – натуральное число, номер кольца дальности; $\nu = \overline{1, M}$.

Примем модель ν -й ПП в виде дискретного гауссовско-марковского случайного процесса $u_{\nu}(n)$, порожденного динамической системой

$$\begin{cases} \vec{Y}_{\nu}(n) = \Phi_{\nu}\vec{Y}_{\nu}(n-1) + \vec{Z}_{\nu}(n), \\ u_{\nu}(n) = H_{\nu}(n)\vec{Y}_{\nu}(n), \end{cases} \quad (1)$$

где $u_{\nu}(n)$ – выборочное значение, отсчет, комплексной огибающей ПП в n -м периоде; $\vec{Y}_{\nu}(n) – (p_{\nu} \times 1)$ – вектор состояния динамической системы (1); $\Phi_{\nu} – (p_{\nu} \times p_{\nu})$ – переходная матрица; $\vec{Z}_{\nu}(n) – (p_{\nu} \times 1)$ – вектор дискретного белого гауссовского шума возбуждения; $H_{\nu}(n) = [0, \dots, 0, \exp\{j\varphi_{n-m_{\nu}+1}\}]$ – $(1 \times p_{\nu})$ – матрица наблюдения; $\{\varphi_n\}$ – последовательность значений начальных фаз зондирующего сигнала, определяемая законом его ФМ.

Тогда модель помехи $v(n)$, наблюдаемая в канале дальности приемного устройства, можно построить в виде

$$\begin{cases} \vec{Y}(n) = \Phi\vec{Y}(n-1) + \vec{Z}(n), \\ v(n) = H(n)\vec{Y}(n) + \eta(n), \end{cases} \quad (2)$$

где

$$\Phi = \text{diag}(\Phi_{\nu}), \nu = \overline{1, M},$$

$$\begin{aligned}\vec{Y}^T(n) &= [\vec{Y}_1^T(n), \vec{Y}_2^T(n), \dots, \vec{Y}_M^T(n)], \\ \vec{Z}^T(n) &= [\vec{Z}_1^T(n), \vec{Z}_2^T(n), \dots, \vec{Z}_M^T(n)], \\ H(n) &= [H_1(n), H_2(n), \dots, H_M(n)],\end{aligned}$$

$\eta(n)$ – дискретный белый гауссовский шум наблюдения, T – операция транспонирования.

Алгоритм работы выбеливающего фильтра определим при помощи равенства [9]

$$v_0(n) = v(n) - \hat{v}(n), \quad (3)$$

где $\hat{v}(n)$ – оптимальная по критерию минимума среднеквадратичной ошибки (СКО) линейная оценка $v(n)$ по совокупности предыдущих наблюдений; $v_0(n)$ – ошибка оценивания, совпадающая с остатком ПП на выходе выбеливающего фильтра.

При использовании конечного числа L текущих наблюдений [7,9] получаем

$$\begin{aligned}\hat{v}(n) &= \vec{W}^T(n) \vec{V}^T(n-1) = E\{v(n) \vec{V}(n-1)\} \times \\ &\times \left[E\{\vec{V}(n-1) \vec{V}(n-1)\} \right]^{-1} \vec{V}(n-1),\end{aligned} \quad (4)$$

где $\vec{V}^T(n) = [v(n), v(n-1), \dots, v(n-L+1)]$; $\vec{W}(n)$ – $(L \times 1)$ – вектор весовых коэффициентов выбеливающего фильтра; $E\{\cdot\}$, \sim – соответственно, знаки математического ожидания и эрмитова сопряжения.

Оценке (4) соответствует дисперсия σ^2 не скомпенсированного остатка v_0 ПП [7]:

$$\begin{aligned}\sigma^2(n) &= E\{\tilde{v}(n)v(n)\} - E\{v(n)\vec{V}(n-1)\} \times \\ &\times \left[E\{\vec{V}(n-1) \vec{V}(n-1)\} \right]^{-1} E\{\tilde{v}(n)\vec{V}(n-1)\}.\end{aligned} \quad (5)$$

Критерий качества

Задачу оптимизации закона ФМ можно сформулировать как задачу определения последовательности $\{\varphi_n\}$, минимизирующей σ^2 (5).

Однако при решении такой задачи встречаются серьезные трудности, обусловленные сложным характером целевой функции, и это решение может быть получено только численными методами. Поэтому в качестве показателя качества примем не дисперсию σ^2 , а ее оценку. Закон ФМ, минимизирующий эту оценку, и будем считать оптимальным.

Оценку σ^2 получим следующим образом. Запишем, согласно (2), выражение $v(n)$ для L ($L = \sum_{v=1}^M p_v$) последовательных моментов времени:

$$\left\{ \begin{array}{l} v(n) = H(n)\vec{Y}(n) + \eta(n), \\ v(n-1) = H(n-1)\Phi^{-1}\vec{Y}(n) - H(n-1)\Phi^{-1}\vec{Z}(n) + \eta(n-1), \\ v(n-L+1) = H(n-L+1)\Phi^{-L+1}\vec{Y}(n) - \\ - H(n-L+1)\Phi^{-L+1}\vec{Z}(n) - \cdots - H(n-L+1)\Phi^{-1}\vec{Z}(n-L+2) + \\ + \eta(n-L+1). \end{array} \right. \quad (6)$$

В векторно-матричной форме (6) имеет вид

$$\vec{V}(n) = N(n)\vec{Y}(n) + \vec{X}(n), \quad (7)$$

где

$$\vec{X}(n) = \begin{bmatrix} \eta(n) \\ -H(n-1)\Phi^{-1}\vec{Z}(n) + \eta(n-1) \\ \cdots \\ -H(n-L+1)\Phi^{-L+1}\vec{Z}(n) - \cdots \\ \cdots - H(n-L+1)\Phi^{-1}\vec{Z}(n-L+2) + \eta(n-L+1) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} N(n) &= \begin{bmatrix} H(n) \\ H(n-1)\Phi^{-1} \\ \cdots \\ -H(n-L+1)\Phi^{-L+1} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} H_1(n), H_2(n), \dots, H_M(n) \\ H_1(n-1)\Phi_1^{-1}, H_2(n-1)\Phi_2^{-1}, \dots, H_M(n-1)\Phi_M^{-1} \\ \cdots \\ H_1(n-L+1)\Phi_1^{-L+1}, H_2(n-L+1)\Phi_2^{-L+1}, \dots \\ \cdots, H_M(n-L+1)\Phi_M^{-L+1} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (9)$$

Уравнение (7) связывает векторы наблюдения $\vec{V}(n)$ и состояния $\vec{Y}(n)$ динамической системы (2).

Используя эту связь и предполагая, что матрица наблюдаемости $N(n)$ не вырождена, найдем оценку наименьших квадратов вектора $\vec{Y}(n)$ [9]:

$$\hat{Y}_{\text{МК}}(n) = N^{-1}(n)\vec{V}(n). \quad (10)$$

Подставив в (2) вместо $\vec{Y}(n)$ оценку $\hat{Y}_{\text{МК}}(n)$ и в (3) полученную таким образом оценку $\hat{v}(n)$, найдем выражение ошибки оценивания $v(n)$ по критерию наименьших квадратов:

$$v_{0,\text{МК}}(n) = v(n) - H(n)\hat{Y}_{\text{МК}}(n) - \eta(n) = H(n)\Delta\vec{Y}(n), \quad (11)$$

где $\Delta\vec{Y}(n) = \vec{Y}(n) - \hat{Y}_{\text{МК}}(n)$.

Отсюда, с учетом свойств евклидовой нормы, получаем следующее ограничение на дисперсию $\hat{\sigma}^2(n)$ оценки $v_{0, \text{мк}}$:

$$\hat{\sigma}^2(n) \leq \|H(n)\|^2 E\{\|\Delta \vec{Y}(n)\|^2\}, \quad (12)$$

где $\|\cdot\|$ – обозначение евклидовой нормы.

Во всех случаях $\sigma^2 \leq \hat{\sigma}^2$ [9]. Поэтому, принимая во внимание, что $\|H(n)\| = M$, имеем

$$\sigma^2(n+1) \leq M^2 E\{\|\Delta \vec{Y}(n)\|^2\}. \quad (13)$$

Ошибку оценивания $\Delta \vec{Y}(n)$ можно интерпретировать как погрешность решения системы линейных уравнений (7), обусловленную возмущением $\vec{X}(n)$.

Из теории линейных алгебраических уравнений известно, что [8]

$$\|\Delta \vec{Y}(n)\| \leq \text{cond}[N(n)] \|\vec{X}(n)\| / \|N(n)\|, \quad (14)$$

где $\text{cond}[N(n)]$ – мера обусловленности матрицы $N(n)$, определяемая как квадратный корень отношения максимального и минимального собственных чисел матрицы $N(n)\tilde{N}(n)$.

Подстановка (14) в (13) дает

$$\sigma^2(n+1) \leq \sigma_{\max}^2(n) = M^2 \text{cond}^2[N(n)] E\{\|\vec{X}(n)\|^2\} / \|N(n)\|^2. \quad (15)$$

Условия оптимальности

Оптимизация закона ФМ проведем, исходя из требования $\min \sigma_{\max}^2$.

Нетрудно показать, что при заданной размерности вектора $\vec{X}(n)$, совпадающей с рангом матрицы $N(n)$, величина $E\{\|\vec{X}(n)\|^2\}$ не зависит от закона ФМ.

Действительно, непосредственное вычисление $E\{\|\vec{X}(n)\|^2\}$ с использованием (8) и с учетом статистической независимости $\vec{Z}(n)$ и $\vec{Z}(k)$ при $n \neq k$, а также $\vec{Z}(k)$ и $\eta(n)$ при всех n, k дает

$$E\{\|\vec{X}(n)\|^2\} = L\sigma_{\eta}^2 + \sum_{l=1}^{L-1} (L-1) \sum_{v=1}^M B \Phi_v^{-l} Q_v \tilde{\Phi}^{-l} B^T, \quad (16)$$

где $B = H_v(n)_{\{\varphi_n=0\}} = [0, \dots, 0, 1]$; $Q_v = E\{\vec{Z}_v \vec{Z}_v\}$; $\sigma_{\eta}^2 = E\{\eta \tilde{\eta}\}$.

Из выражения (16) следует, что величина $E\{\|\vec{X}(n)\|^2\}$ не зависит от закона ФМ и при $Q_v = Q_k$, $v, k = \overline{1, M}$ увеличивается примерно в квадратичной зависимости от кратности наложения M ПП.

Поэтому единственная возможность уменьшения $E\{\|\vec{X}(n)\|^2\}$ заключается в выборе такого закона ФМ, при котором уменьшается ранг матрицы $N(n)$, что равнозначно уменьшению кратности наложения ПП.

Учитывая, что $\|N(n)\|$ не зависит от закона ФМ, приходим к условию оптимальности закона ФМ по критерию $\min\sigma_{\max}^2$:

$$\text{rank}[N(n)]\text{cond}[N(n)] = \min_{\{\varphi_n\}}. \quad (17)$$

Оптимизация закона ФМ в соответствии с условием (17) состоит в следующем. Для каждого из возможных значений ранга $N(n)$ находится последовательность $\{\varphi_n\}$, достигающая минимум мере обусловленности матрицы $N(n)$, порядок которой должен быть уменьшен до значения ее ранга, и определяются возможные значения произведений

$$\text{rank}[N(n)] \min_{\{\varphi_n\}} \{\text{cond}[N(n)]\}.$$

Минимальное из этих произведений и будет соответствовать оптимальной последовательности $\{\varphi_n\}_{\text{опт}}$:

Рассмотрим реализацию указанной процедуры в предположении, что

$$\Phi_v = \Phi_0 \exp \{j\varphi_{dv}\},$$

где $\varphi_{dv} = \Omega_{dv} T_{\pi}$, Ω_{dv} – средний доплеровский сдвиг частоты ПП с m_{ν} -го кольца дальности.

Как известно [1], ранг матрицы равен максимальному числу ее линейно независимых столбцов.

Из условия линейной зависимости i -го и l -го столбцов ($i, l = \overline{1, M}$) блочной матрицы (9) получаем

где ψ – произвольная константа ($0 < \psi \leq 2\pi$).

Соотношения (18) выполняются, если последовательность $\{\varphi_n\}$ с $n = m_i - L + 2$ -го периода формируется в соответствии с алгоритмом

$$\varphi_{n-m_i-L+v+1} = \varphi_{n-m_{l-L+v+1}} + (L-v)(\varphi_{\alpha i} - \varphi_{\alpha l}) + \psi, \quad v = 1, 2, \dots \quad (19)$$

Аналогично из условий ортогональности любой пары столбцов, например, j -го и k -го, имеем

$$\varphi_{n-m_j-L+v+1} = \varphi_{n-m_{k-L+v+1}} + (L-v)(\varphi_{dj} - \varphi_{dk}) + \psi, v = 1, 2, \dots (20)$$

Алгоритмы (19), (20) совместны в двух случаях.

Первый при совпадающих значениях доплеровских набегов фазы $\varphi_{di} = \varphi_{dl} = \varphi_{dj} = \varphi_{dk}$ соответствует немодулированному сигналу $\{\varphi_n = \varphi_{n-1} + \psi\}$. При этом максимально возможное уменьшение ранга матрицы $N(n)$ составляет

$$p_v(Q - 1),$$

где Q – число столбцов блочной матрицы (9) с совпадающими значениями φ_d .

Во втором случае должны быть выполнены условия

$$\varphi_{di} - \varphi_{dl} = \varphi_{dj} - \varphi_{dk} \text{ при } m_l - m_i = m_k - m_j, \quad (21)$$

которым соответствует максимально возможное уменьшение ранга $N(n)$ на

$$p_v(Q_1 - 1),$$

где Q_1 – число пар столбцов, для которых выполняются условия (21).

Алгоритмы (19), (20) определяют подмножество реализаций $\{\varphi_n\}$, на котором ранг матрицы $N(n)$ уменьшается по крайне мере на единицу.

Используя эти алгоритмы, можно вычислить $\text{cond}[N'(n)]$ для каждой из реализаций $\{\varphi_n\}$ этого подмножества, где $N'(n)$ – матрица, получаемая из $N(n)$ после исключения линейно зависимых столбцов, и выбрать последовательность $\{\varphi_n\}_{\text{опт}}$, доставляющую $\min \{\text{cond}[N'(n)]\text{rank}[N(n)]\}$.

Более сложной задачей является поиск последовательности $\{\varphi_n\}$, доставляющей $\min \{\text{cond}[N(n)]\}$ при невырожденной матрице $N(n)$.

Решение этой задачи упрощается, если вместо меры обусловленности $\text{cond}[N(n)]$, которую можно рассматривать как меру разброса собственных значений матрицы $N(n)$, выбрать отношение геометрического среднего собственных значений λ_i ($i = \overline{1, L}$) матрицы $N(n)\tilde{N}(n)$ к их арифметическому среднему [1].

Кроме того, если учесть, что среднее арифметическое $\sum_{i=1}^L \lambda_i / L$, равное

$$\text{sp}[N(n)\tilde{N}(n)]/L,$$

где $\text{sp}(\cdot)$ – след матрицы (\cdot) , не зависит от $\{\varphi_n\}$, в чем нетрудно убедиться путем непосредственного вычисления диагональных элементов матрицы $N(n)\tilde{N}(n)$, а произведение [1]

$$\sum_{i=1}^L \lambda_i = \det[N(n)\tilde{N}(n)],$$

то из условия минимума отношения $\sum_{i=1}^L \lambda_i / \sum_{i=1}^L \lambda_i$ получаем следующую систему нелинейных алгебраических уравнений для определения последовательности $\{\varphi_n\}$, на которой достигается $\min\{\sum_{i=1}^L \lambda_i / \sum_{i=1}^L \lambda_i\}$:

$$\frac{\partial}{\partial \varphi_i} \{\det[N(n)\tilde{N}(n)]\}_{\varphi_i=\varphi_{i,\text{опт}}} = 0, i = n, \overline{n-L+1}. \quad (22)$$

Другая возможность минимизации $\text{cond}[N(n)]$ может быть основана на поиске последовательностей $\{\varphi_n\}$, для которых матрица $N(n)$ близка к ортогональной.

Из условия ортогональности столбцов блочной матрицы (9) получаем

$$\sum_{l=1}^L H_i(n-l+1) \Phi_i^{-l+1} \tilde{\Phi}_j^{-l+1} H_j(n-l+1) = 0, i, j = \overline{1, M}. \quad (23)$$

Если эти условия выполняются, то мера обусловленности

$$\text{cond}[N(n)] = (B\Phi_0^{-L+1} \tilde{\Phi}_0^{-L+1} B^T)^{1/2} ? \quad (24)$$

достаточно близка к единице.

Однако условия ортогональности (23) могут быть удовлетворены при выборе закона ФМ лишь в исключительных случаях. Например, при $p_v = 1$, $v = \overline{1, M}$ (модель v -й ПП задается процессором авторегрессии первого порядка с коэффициентом $\Phi_0 = r$) условия (23) выполняются, если $N(n)$ является обобщенной матрицей Адамара [2]. В общем случае уравнения (23) несовместимы, поэтому приходится использовать уравнения (22).

Результаты синтеза. Проиллюстрируем предложенную методику синтеза закона ФМ для случая наложения двух ПП. Матрицу наблюдаемости зададим в виде

$$N(n) = \begin{bmatrix} \exp\{j\varphi_n - m_i + 1\} & \exp\{j\varphi_n - m_l + 1\} \\ r^{-1} \exp\{j(\varphi_n - m_i - \varphi_{d,1})\} & r^{-1} \exp\{j(\varphi_n - m_l - \varphi_{d,2})\} \end{bmatrix}. \quad (25)$$

Ранг $N(r)$ может принимать два значения: 1, если закон ФМ задан (19), или 2 для всех других законов ФМ.

В первом случае

$$\min\{\text{rank}[N(n)]\} \text{cond}[N'(n)] = 1.$$

Во втором,

$$\min\{\text{rank}[N(n)]\} \text{cond}[N(n)] = 2 \min\{\text{cond}[N(n)]\}$$

достигается на последовательности $\{\varphi_n\}$, формируемой в соответствии с правилом

$$\varphi_n = \varphi_{n-1} + \varphi_{n+m_i-m_l} - \varphi_{n+m_i-m_l+1} + \varphi_{d,2} - \varphi_{d,1} + \pi, \quad (26)$$

вытекающих из условий (22), (23) и $\min\sigma_{\max}^2 = 2/r$.

Следовательно, оптимальной по критерию $\min\sigma_{\max}^2$ будет последовательность $\{\varphi_n\}$, алгоритм формирования которой задан (19).

Нетрудно показать, что закон ФМ, определяемый алгоритмом (19), будет оптимальным и по критерию $\min\sigma^2$. Действительно, из (4) и (5) для последовательностей $\{\varphi_n\}$, определяемых алгоритмами формирования (19), (26), и модели (25) ПП при $\sigma_{\eta}^2 = 0$ получаем

$$\begin{aligned} \vec{W}(n) &= r \exp\{j(\varphi_{n-m_l+1} - \varphi_{n-m_l} + \varphi_{d,2})\}, \\ \sigma^2 &= \sigma_{\eta}^2(1 - |r|^2) \end{aligned} \quad (27)$$

для алгоритма формирования (19) и

$$\begin{aligned} \vec{W}(n) &= [0, r \exp\{j(\varphi_{n-m_l+1} - \varphi_{n-m_l-1} + 2\varphi_{d,2})\}], \\ \sigma^2 &= \sigma^2(1 - |r|^4) \end{aligned} \quad (28)$$

для алгоритма (26), где σ_{η}^2 – дисперсия ПП на входе выбеливающего фильтра.

Из соотношений (27), (28) видно, что в этих случаях выбеливающий фильтр реализуется в виде схемы однократной ЧПК. Однако если (28) соответствует вычитанию с задержкой на $2T_{\eta}$, то (27) – с задержкой на T_{η} , то есть в последнем случае выбеливающий фильтр остается таким же, как в отсутствии наложения ПП.

Физически такой результат объясняется тем, что при использовании алгоритма формирования (19) ПП, принимаемые с различных дальностей, имеют совпадающие законы ФМ, поэтому выбеливающий фильтр и коэффициент подавления $K_{\eta} = \sigma_{\eta}^2/\sigma^2$ такие же, как и в случае одной ПП.

В таблице 1 приведены значения K_{η} (в дБ), рассчитанные с использованием выражения (5) для случая наложения трех ПП ($M = 3$), $\Phi_0 = r = 0,995$ и $\varphi_{d,1} = 0$ при различных значениях $\varphi_{d,2}, \varphi_{d,3}$.

Верхние значения K_{η} в каждой строке соответствуют немодулированному сигналу $\{\varphi_n = 0\}$, нижнее – модулированному в соответствии с алгоритмом (19) при $i = 2, l = 3$.

Из таблицы 1 видно, что оптимизация закона ФМ в соответствии с алгоритмом (19) дает выигрыш в величине коэффициента подавления по сравнению со случаем немодулированного сигнала, если все $\varphi_{d,i}, i = \overline{1,3}$, имеют различные значения.

Таблица 1 – Значения коэффициента подавления при различных $\varphi_{d,i}$

$\varphi_{d,3}$	$\varphi_{d,2}$				
	0	0,2π	0,4π	0,6π	0,8π
0	21,77	19,95	19,612	19,26	19
	21,77	19,95	19,612	19,26	19
0,2π	19,95	19,95	15,59	15,53	16,15
	19,61	19,95	21,78	19,95	19,915
0,4π	19,61	15,59	19,61	15,54	15,99
	19	19,26	19,61	19,95	21,79
0,6π	19,26	15,54	15,54	19,26	16,15
	19	18,9	19	19,26	19,612
0,8π	19	16,15	15,99	16,15	19
	19,61	19,26	19	18,9	19

Если хотя бы два значения $\varphi_{d,i}$ совпадают, то при немодулированном сигнале обеспечивается такой же коэффициент подавления, как и при законе ФМ (19). Это объясняется тем, что в двух случаях уменьшение ранга $N(n)$ оказывается одинаковым.

Выводы

Таким образом, если значения средних доплеровских сдвигов частоты $\Omega_{d,i}$, $i = \overline{1, M}$, различные, оптимизация закона фазовой модуляции в соответствии с предложенной методикой увеличивает коэффициент подавления пассивных помех по сравнению с немодулированным сигналом.

Литература

1. Амиантов И.Н. Избранные вопросы статистической теории связи. М.: Сов. радио, 1971. 416 с.
2. Артюшенко В.М. Исследование и разработка радиолокационного измерителя параметров движения протяженных объектов: монография, ФГБОУ ВПО ФТА. М., 2013. 214 с.
3. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Особенности отражения зондирующих сигналов радиотехнических устройств обнаружения от протяженных объектов сложной формы // Школа университетской науки: парадигма развития. 2012. № 2-1(6). С. 42-46.
4. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Статистические характеристики смеси сигнала и аддитивно-мультиплексных помех с негауссовским характером распределения // Радиотехника. 2017. № 1. С. 95-102.
5. Бакулов П.А., Степин В.М. Методы и устройства селекции движущихся целей. М.: Радио и связь, 1986. 288 с.
6. Иванов Ю.В. Радиолокационные системы селекций движущихся целей. Учеб. Пособие / Ю.В. Иванов, Ю.В. Родионов, В.В. Смирнов. Л.: ЛМИ, 1982. 83 с.
7. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки. М.: Радио и связь, 1986. 446 с.

8. Райс Дж. Матричные вычисления и математическое обеспечение. М.: Мир, 1984. 264 с.
9. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. М.: Связь, 1976. 496 с.

УДК 532.517.4: 536.24

**Точные аналитические решения для двумерной
стационарной линейной обратной задачи теплопроводности
для полого цилиндра с граничными условиями на одной
из поверхностей, полученные в замкнутой рекуррентной форме**

Игорь Евгеньевич Лобанов, доктор технических наук,
профессор кафедры «Техники и технологии»,
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 получены точные аналитические решения для стационарной двумерной линейной обратной задачи теплопроводности для полых цилиндров (а также плоского тела) с граничными условиями на одной из поверхностей, полученные в замкнутой рекуррентной форме. Приведённая в статье рекуррентная форма записи решения стационарной двумерной линейной обратной задачи теплопроводности полых цилиндров (а также плоского тела) с граничными условиями на одной поверхности являются решениями в замкнутой форме с единых позиций, что не всегда возможно в явной форме. Следовательно, опровергнуто существующее утверждение о невозможности получение замкнутого решения данной задачи. Выведенные закономерности необходимо использовать при инженерных и научных расчётах стационарных температурных полей и плотностей тепловых потоков в перспективных деталях, используемых в космической, авиационной и ракетной технике.

Теплопроводность, аналитический, стационарный, линейный, двумерный, обратная задача, поверхность, граничные условия, односторонний, рекуррентный, цилиндрический.

**Exact analytical solutions for the two-dimensional stationary linear inverse
problem of thermal conductivity for a hollow cylinder with boundary
conditions on one of the surfaces, obtained in a closed recurrent form**

Igor Evgenievich, Lobanov, Doctor of Technical Sciences,
Professor of the 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 paper provides accurate analytical solutions for a stationary two-dimensional linear inverse heat conduction problem for hollow cylinders (as well as a flat body) with boundary conditions on one of the surfaces, obtained in a closed recur-

rent form. The recurrent form of writing the solution of a stationary two-dimensional linear inverse problem of thermal conductivity of hollow cylinders (as well as a flat body) with boundary conditions on one surface given in the article is a closed-form solution from a single position, which is not always possible explicitly. Consequently, the existing statement about the impossibility of obtaining a closed solution to this problem has been refuted. The derived patterns should be used in engineering and scientific calculations of stationary temperature fields and heat flux densities in promising parts used in space, aviation and rocket technology.

Thermal conductivity, analytical, stationary, linear, two-dimensional, inverse problem, surface, boundary conditions, one-sided, recurrent, cylindrical.

1. Решения для двумерной стационарной линейной обратной задачи теплопроводности для полого цилиндра с граничными условиями на одной из поверхностей, сгенерированные в замкнутой рекуррентной форме

Для линейной обратной одномерной задачи теплопроводности, независимо друг от друга, были получены решения Стефаном Й., Бургграфом О. Р., Лэнгфордом Д. [31, 4, 26], при условии известности тепловых потоков и температур в точке расположения датчика.

Точные решения для температурных полей, основанные на известных температурах в двух различных внутренних точках, были получены Имбером М. и Кханом Д. [5] с помощью метода интегрального преобразования Лапласа [2, 25].

Аналогичные решения для одномерных тел также были представлены в работах [25] и [1], где решения для нестационарной температуры были получены в явном виде, а плотность теплового потока была определена путем дифференцирования полей температур.

В последующем были найдены решения аналогичных задач, которые включали не только теоретический, но и практический аспект, в том числе, и нелинейную одномерную задачу нестационарной теплопроводности [2, 3, 6-9, 11-15, 17-21, 23, 24].

Как отчасти информировалось в исследованиях [1, 4, 5, 16, 25, 26], решаемость для линейных обратных нестационарных задач процесса теплопроводности у тел с одномерными геометриями в явных формах не всегда возможно, и чтобы получить окончательные решения возникает необходимость применения дополнительных допущений, к примеру, как в работе [4], в которой использовались допущения о тонких стенках.

К вышесказанным задачам примыкает обратная задача двумерной стационарной линейной теплопроводности для полых цилиндров с граничными условиями на одной из поверхностей, сгенерированные в замкнутой рекуррентной форме, поскольку модельные уравнения у них имеют сходства.

Аналитические решения данных задач были представлены в работах [28-30], в которых указывалось, что замкнутой формы решения для двумерной ста-

ционарной линейной обратной задачи теплопроводности для полых цилиндров с граничными условиями на одной из поверхностей не существует [29, 30].

Целью исследования являлось в получения решения стационарных линейных обратных задач теплопроводности для полых цилиндров с граничными условиями на одной из поверхностей в замкнутых рекуррентных формах, имеющие перед решениями в явных видах определённые преимущества.

Решения этой задачи будем искать рекуррентным методом, который был успешно апробирован при решении сходных задач.

Рассматривается линейная стационарная двумерная задача теплопроводности с равномерным внутренним тепловыделением (поглощением) в стенке полого цилиндра.

В задаче распределения температуры и плотностей тепловых потоков на внешней – с радиусом r_0 (внутренней – с радиусом r_i) – поверхности полого цилиндра задаются известными функциями от осевой координаты.

Цель задачи заключается в отыскании температурного поля в стенке полого цилиндра вплоть до другой границы (до граничных условий в прямой задаче теплопроводности).

При заданных условиях на внешней границе полого цилиндра $q_0(y)$ и $T_0(y)$ линейная двумерная стационарная задача теплопроводности моделируется ниже-следующими модельными уравнениями:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{q_V}{\lambda} = 0; \quad (1)$$

$$T(r_0, y) = T_0(y); \quad (2)$$

$$q_r(r_0, y) = q_0(y). \quad (3)$$

Здесь: T – температура; y – осевая координата; r – радиальная координата; λ – коэффициент теплопроводности; q_V – объёмная плотность теплового потока; q_r – плотность теплового потока (в радиальном направлении).

Оевые профили теплового потока и температуры $q_0(y)$ и $T_0(y)$ (в данном случае на внешней поверхности) являются непрерывными дифференцируемыми функциями по осевой координате y .

Используя принцип суперпозиции, запишем решение задачи для теплопроводности $T(r, y)$ в следующем виде:

$$T(r, y) = \psi(r, y) + \phi(r), \quad (4)$$

где $\phi(r)$ – предполагаемое решение одномерной задачи.

Решение одномерной задачи $\phi(r)$ находится из решения следующего уравнения:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{q_V}{\lambda} = 0; \quad (5)$$

$$\left. \frac{d\phi}{dr} \right|_{r=r_0} = 0; \quad (6)$$

$$\phi(r_0) = 0. \quad (7)$$

Решение для функции двумерной задачи $\psi(y, r)$ находится из решения нижеследующего уравнения:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} = 0; \quad (8)$$

$$\frac{d\psi}{dr} \Big|_{r=r_0} = -\frac{q_0(y)}{\lambda}; \quad (9)$$

$$T(r_0, y) = T_0(y). \quad (10)$$

Решение задачи для $\phi(r)$ может быть представлено в виде:

$$\phi(r_0) = \frac{q_V}{4\lambda} r_0^2 \left(1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 + \ln \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right). \quad (11)$$

Общее решение для функции $\psi(y, r)$ может быть представлено в нижеследующем виде [1, 4, 5, 25, 28-30]:

$$\psi(r, y) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n(r) \frac{d^{2n} T_0(y)}{dy^{2n}} + \frac{1}{\lambda} \sum_{n=0}^{\infty} B_n(r) \frac{d^{2n} q_0(y)}{dy^{2n}}, \quad (12)$$

где $A_n(r)$ и $B_n(r)$ функции, которые детерминируются из решения (8)-(10).

Решения для $A_n(r)$ детерминируются из решений дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} A'_0(r) + rA''_0(r) = 0; \\ rA_{n-1}(r) + A'_n(r) + rA''_n(r) = 0; \end{cases} \quad \forall n \in \mathbb{N} \quad (13)$$

с граничными условиями:

$$\begin{cases} A_0(r_0) = 1; A_n(r_0) = 0; \\ A'_0(r_0) = 0; A'_n(r_0) = 0; \end{cases} \quad \forall n \in \mathbb{N}. \quad (14)$$

Решения для $B_n(r)$ детерминируются из решений дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} B'_0(r) + rB''_0(r) = 0; \\ rB_{n-1}(r) + B'_n(r) + rB''_n(r) = 0; \end{cases} \quad \forall n \in \mathbb{N} \quad (15)$$

с граничными условиями:

$$\begin{cases} B_0(r_0) = 0; B_n(r_0) = 0; \\ B'_0(r_0) = -1; B'_n(r_0) = 0; \end{cases} \quad \forall n \in \mathbb{N}. \quad (16)$$

Решение для $A_0(r)$ и $B_0(r)$ с учётом вышеприведённых граничных условий можно представить в следующем виде:

$$A_0(r) = 1; \quad (17)$$

$$B_0(r) = -r_0 \ln \left(\frac{r}{r_0} \right). \quad (18)$$

Квадратуры решений для $A_n(r)$ и $B_n(r)$ $\forall n \in \mathbb{N}$ с учётом вышеприведённых граничных условий можно представить в следующем виде:

$$A_n(r) = - \int_{r_0}^r \frac{1}{r} \int_{r_0}^r r A_{n-1}(r) dr dr; \quad (19)$$

$$B_n(r) = - \int_{r_0}^r \frac{1}{r} \int_{r_0}^r r B_{n-1}(r) dr dr. \quad (20)$$

Далее следует детерминировать $A_n(r)$ и $B_n(r)$ $\forall n \in \mathbb{N}$ в замкнутой форме.

Решения для $A_n(r)$ и $B_n(r)$ будем искать методом математической индукции в рекуррентных формах, которым были решены обратные задачи теплопроводности, например, в [10, 22, 27].

Сначала решим задачу для $A_n(r)$.

Для первых значений параметра n они будут нижеследующими (сразу же запишем значения для старших членов через младшие члены, минуя промежу-

точные выкладки, поскольку они подробно разбирались в многочисленных более ранних работах, например, в [10, 22, 27]):

$$A_1(r) = -\frac{r^2}{4} + \frac{r_0^2}{4} A_0 + \frac{r_0^2}{2} \left(-\frac{B_0}{r_0} \right); \quad (21)$$

$$A_2(r) = \frac{r^4}{64} - \frac{r_0^4}{64} A_0 - \frac{r_0^4}{16} \ln \left(-\frac{B_0}{r_0} \right) + \frac{r_0^2}{4} A_1 + \frac{r_0^2}{2} \left(-\frac{B_1}{r_0} \right); \quad (22)$$

$$A_3(r) = -\frac{r^6}{2304} + \frac{r_0^6}{2304} A_0 + \frac{r_0^6}{384} \ln \left(-\frac{B_0}{r_0} \right) + \frac{r_0^2}{2} \left(-\frac{B_2}{r_0} \right) + \frac{r_0^2}{4} A_2 - \frac{r_0^4}{16} \ln \left(-\frac{B_1}{r_0} \right) - \frac{r_0^4}{64} A_1; \dots \quad (23)$$

Следовательно, применив метод математической индукции, можно привести квазиполиномы $A_n(r)$ для решения обратных двумерных стационарных задач теплопроводности для полых цилиндров в рекуррентных формах:

$$A_n(r) = \frac{(-1)^n}{((2n)!!)^2} r^{2n} + \sum_{m=0}^{n-1} \frac{(-1)^{(n-m)+1}}{((2(n-m))!!)^2} r_0^{2(n-m)} A_m + \sum_{m=0}^{n-1} (-1)^{(n-m)} \frac{2(n-m)}{((2(n-m))!!)^2} r_0^{2(n-m)-1} B_m. \quad (24)$$

Затем решим задачу для $B_n(r)$.

Для первых значений параметра n они будут нижеследующими:

$$B_1(r) = \frac{r_0^3}{4} A_0 + \frac{r_0^3}{4} \left(-\frac{B_0}{r_0} \right) + \frac{1}{4} r_0 r^2 \left(\ln \left(\frac{r}{r_0} \right) - 1 \right); \quad (25)$$

$$B_2(r) = \frac{r_0^3}{4} A_1 - \frac{r_0^2}{4} B_1 - \frac{5}{64} r_0^5 \left(-\frac{B_0}{r_0} \right) - \frac{3}{128} r_0^5 A_0 - \frac{1}{64} r_0 r^4 \left(\ln \left(\frac{r}{r_0} \right) - \frac{3}{2} \right); \quad (26)$$

$$B_3(r) = \frac{11}{13824} r_0^7 A_0 - \frac{3}{128} r_0^5 A_1 + \frac{5}{64} r_0^4 B_1 + \frac{r_0^3}{4} A_2 - \frac{r_0^2}{4} B_2 - \frac{5}{1152} r_0^6 B_0 + \frac{1}{2304} r_0 r^2 \left(\ln \left(\frac{r}{r_0} \right) - \frac{11}{6} \right); \dots \quad (27)$$

Следовательно, применив метод математической индукции, можно привести квазиполиномы $B_n(r)$ для решения обратных двумерных стационарных задач теплопроводности для полых цилиндров в рекуррентных формах:

$$B_n(r) = \frac{(-1)^{n+1}}{((2n)!!)^2} r_0 r^{2n} \left(\ln \left(\frac{r}{r_0} \right) - \sum_{m=1}^n \frac{1}{m} \right) + \sum_{m=0}^{n-1} \frac{(-1)^{(n-m)+1}}{((2(n-m))!!)^2} r_0^{2(n-m)+1} \left(\sum_{l=1}^{n-m} \frac{1}{l} \right) A_m + \sum_{m=0}^{n-1} \frac{(-1)^{(n-m)}}{((2(n-m))!!)^2} r_0^{2(n-m)} \left(1 + 2(n-m) \sum_{l=1}^{(n-m)-1} \frac{1}{l} \right) B_m. \quad (28)$$

Окончательное выражение для температуры для полых цилиндров будет выглядеть следующим образом:

$$T(r, y) = T_0(y) - \frac{q_0}{\lambda} r_0 \ln \left(\frac{r}{r_0} \right) + \frac{q_V}{4\lambda} r_0^2 \left(1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 + \ln \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n(r) \frac{d^{2n} T_0(y)}{dy^{2n}} + \frac{1}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} B_n(r) \frac{d^{2n} q_0(y)}{dy^{2n}}. \quad (29)$$

Реализованная техника решения двумерной стационарной задачи теплопроводности с переменными осевыми граничными условиями сходна с техникой решения одномерной нестационарной задачи теплопроводности с переменными по времени граничными условиями, (реализованной, например, в [10, 22, 27]).

Если переменные осевые граничные условия заданы на внутреннем радиусе полого цилиндра r_i , то решение стационарных двумерных обратных задач теплопроводности для полых цилиндров будут выглядеть нижеследующим образом:

$$T(r, y) = T_i(y) - \frac{q_i}{\lambda} r_i \ln \left(\frac{r}{r_i} \right) + \frac{q_v}{4\lambda} r_i^2 \left(1 - \left(\frac{r}{r_i} \right)^2 + \ln \left(\frac{r}{r_i} \right)^2 \right) + \\ + \sum_{n=1}^{\infty} C_n(r) \frac{d^{2n} T_i(y)}{dy^{2n}} + \frac{1}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} D_n(r) \frac{d^{2n} q_i(y)}{dy^{2n}}; \quad (30)$$

$$C_n(r) = \frac{(-1)^n}{((2n)!!)^2} r_i^{2n} + \sum_{m=0}^{n-1} \frac{(-1)^{(n-m)+1}}{((2(n-m))!!)^2} r_i^{2(n-m)} A_m + \\ + \sum_{m=0}^{n-1} (-1)^{(n-m)} \frac{2(n-m)}{((2(n-m))!!)^2} r_i^{2(n-m)-1} B_m; \quad (31)$$

$$D_n(r) = \frac{(-1)^{n+1}}{((2n)!!)^2} r_i^{2n} \left(\ln \left(\frac{r}{r_i} \right) - \sum_{m=1}^n \frac{1}{m} \right) + \\ + \sum_{m=0}^{n-1} \frac{(-1)^{(n-m)+1}}{((2(n-m))!!)^2} r_i^{2(n-m)+1} \left(\sum_{l=1}^{n-m} \frac{1}{l} \right) A_m + \\ + \sum_{m=0}^{n-1} \frac{(-1)^{(n-m)}}{((2(n-m))!!)^2} r_i^{2(n-m)} \left(1 + 2(n-m) \sum_{l=1}^{(n-m)-1} \frac{1}{l} \right) B_m. \quad (32)$$

Как уже отмечалось, решения двумерных стационарных обратных задач теплопроводности с переменными осевыми граничными условиями сходны с техникой решения одномерных нестационарных задач теплопроводности с переменными по времени граничными условиями, ([10, 22, 27]), которые для сравнения приводятся ниже:

$$T(\rho, \text{Fo}) = \sum_{n=0}^{\infty} T_1^{(n)}(\text{Fo}) P_{n,1} + \sum_{n=0}^{\infty} \text{Ki}^{(n)}(\text{Fo}) P_{n,2} = \\ = \sum_{n=0}^{\infty} \Theta_{n,1} P_{n,1} + \sum_{n=0}^{\infty} \Theta_{n,2} P_{n,2}, \quad (33)$$

где $\text{Fo} = \frac{a\tau}{r_1^2}$ – критерий Фурье; $\text{Ki} = \frac{qr_1}{\lambda\Delta t}$ – критерий Кирпичёва; $\rho = r/r_1$ –

безразмерная координата; r_1 – радиальная координата, на которой заданы граничные условия; a – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности; q – плотность теплового потока; Δt – разность температур.

$$P_{n,1} = \frac{1}{((2n)!!)^2} \rho^{2n} - \sum_{m=0}^{n-1} \frac{1}{((2(n-m))!!)^2} P_{m,1} - \sum_{m=0}^{n-1} \frac{2(n-m)}{((2(n-m))!!)^2} P_{m,2}; \quad (34)$$

$$P_{n,2} = \left(\ln \rho - \sum_{m=1}^n m^{-1} \right) \frac{1}{((2n)!!)^2} \rho^{2n} + \sum_{m=0}^{n-1} \frac{1}{((2(n-m))!!)^2} \sum_{l=1}^{n-m} l^{-1} P_{m,1} + \\ + \sum_{m=0}^{n-1} \frac{1}{((2(n-m))!!)^2} P_{m,2} + \sum_{m=0}^{n-1} \frac{2(n-m)}{((2(n-m))!!)^2} \sum_{l=1}^{n-m-1} l^{-1} P_{m,2}; \quad (35)$$

$$\Theta_{n,i} = \frac{r_1^2}{a} \frac{\partial \Theta_{n-1,i}}{\partial \tau}, \forall i = 1, 2. \quad (36)$$

Сравнение решений (24), (28), (29) и (30)-(32) с решениями (33)-(35) показывает, что они очень сходны, но имеют место отличия поскольку модельные уравнения различаются: в нестационарном одномерном случае имеется производная по времени, а для двумерного случая вместо неё имеется двойная производная по осевой координате.

Подобный сходственный случай в модельных уравнениях имеет место

при сравнении систем уравнений, описывающих теплообмен в регенеративных теплообменниках с рекуперативными теплообменниками с перекрёстно-точным движением теплоносителя.

Следовательно, в настоящей научной работе получены точные замкнутые аналитические решения стационарных обратных задач теплопроводности для полых цилиндров, хотя в работах [10, 22, 27], утверждалось, что это невозможно осуществить.

2. Решения для двумерной стационарной линейной обратной задачи теплопроводности для плоского тела с граничными условиями на одной из поверхностей, полученные в замкнутой рекуррентной форме

Рассматривается линейная стационарная двумерная задача теплопроводности с равномерным внутренним тепловыделением (поглощением) в стенке плоского тела. Координатные оси: абсцисса – r , ордината – y .

В задаче распределения температуры и плотности тепловых потоков на внешней – на расстоянии r_0 (внутренней – на расстоянии r_i) от начала координат – поверхности плоского тела задаются известными функциями от осевой координаты.

Здесь сохраним координирование плоского тела аналогично полого цилиндра для сравнения. Цель задачи заключается в отыскании температурного поля в стенке плоского тела вплоть до другой границы (до граничных условий в прямой задаче теплопроводности).

При заданных условиях на внешней границе плоского тела $q_0(y)$ и $T_0(y)$ линейная двумерная стационарная задача теплопроводности моделируется нижеследующими модельными уравнениями:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{q_v}{\lambda} = 0; \quad (37)$$

$$T(r_0, y) = T_0(y); \quad (38)$$

$$q_r(r_0, y) = q_0(y); \quad (39)$$

Снова используем принцип суперпозиции и запишем решения задач теплопроводности $T(r, y)$ в следующем виде:

$$T(r, y) = \psi(r, y) + \phi(r). \quad (40)$$

Решение одномерной задачи $\phi(r)$ находится из решения следующего уравнения:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{q_v}{\lambda} = 0; \quad (41)$$

$$\left. \frac{d\phi}{dr} \right|_{r=r_0} = 0; \quad (42)$$

$$\phi(r_0) = 0. \quad (43)$$

Решение для функции $\psi(y, r)$ находится из решения нижеследующего уравнения:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} = 0; \quad (44)$$

$$\left. \frac{d\psi}{dr} \right|_{r=r_0} = -\frac{q_0(y)}{\lambda}, \quad (45)$$

$$T(r_0, y) = T_0(y). \quad (46)$$

Решение задачи для $\phi(r)$ может быть представлено в виде:

$$\phi(r_0) = \frac{qv}{2\lambda} r_0^2 \left(1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right). \quad (47)$$

Общее решение для функции $\psi(y, r)$ получает точно так же, как и ранее:

$$\psi(r, y) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n(r) \frac{d^{2n} T_0(y)}{dy^{2n}} + \frac{1}{\lambda} \sum_{n=0}^{\infty} B_n(r) \frac{d^{2n} q_0(y)}{dy^{2n}}. \quad (48)$$

Решения для $A_n(r)$ детерминируются из решений дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} A_0''(r) = 0; \\ A_{n-1}(r) + A_n''(r) = 0; \end{cases} \quad \forall n \in \mathbb{N} \quad (49)$$

с граничными условиями:

$$\begin{cases} A_0(r_0) = 1; A_n(r_0) = 0; \\ A_0'(r_0) = 0; A_n'(r_0) = 0; \end{cases} \quad \forall n \in \mathbb{N}. \quad (50)$$

Решения для $B_n(r)$ детерминируются из решений дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} B_0''(r) = 0; \\ B_{n-1}(r) + B_n''(r) = 0; \end{cases} \quad \forall n \in \mathbb{N} \quad (51)$$

с граничными условиями:

$$\begin{cases} B_0(r_0) = 0; B_n(r_0) = 0; \\ B_0'(r_0) = -1; B_n'(r_0) = 0; \end{cases} \quad \forall n \in \mathbb{N}. \quad (52)$$

Решение для $A_0(r)$ и $B_0(r)$ с учётом данных граничных условий:

$$A_0(r) = 1; \quad (53)$$

$$B_0(r) = -r_0 + r. \quad (54)$$

Квадратуры решений для $A_n(r)$ и $B_n(r)$ $\forall n \in \mathbb{N}$ примут вид:

$$A_n(r) = - \int_{r_0}^r \int_{r_0}^r A_{n-1}(r) dr dr; \quad (55)$$

$$B_n(r) = - \int_{r_0}^r \int_{r_0}^r B_{n-1}(r) dr dr; \quad (56)$$

Решения для $A_n(r)$ и $B_n(r)$ для обратной двумерной стационарной задачи теплопроводности для плоского тела выглядят гораздо проще, чем для полых цилиндров:

$$A_n(r) = \frac{(-1)^n}{(2n)!} (r - r_0)^{2n}; \quad (57)$$

$$B_n(r) = \frac{(-1)^{n+1}}{(2n+1)!} (r - r_0)^{2n}. \quad (58)$$

Для сравнения решений обратной двумерной стационарной задачи теплопроводности для плоского тела и полого цилиндра приведём соответствующие решения для плоского тела в рекуррентной форме:

$$A_n(r) = \frac{(-1)}{2n \cdot (2n-1)} (r - r_0)^2 \cdot A_{n-1}(r); \quad (59)$$

$$B_n(r) = \frac{(-1)}{2n \cdot (2n+1)} (r - r_0)^2 \cdot B_{n-1}(r). \quad (60)$$

Окончательное выражение для температуры для плоского тела будет выглядеть следующим образом:

$$T(r, y) = T_0(y) - \frac{q_0}{\lambda} r_0 \left(1 - \frac{r}{r_0}\right) + \frac{q_v}{2\lambda} r_0^2 \left(1 - \left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right) + \\ + \sum_{n=1}^{\infty} A_n(r) \frac{d^{2n} T_0(y)}{dy^{2n}} + \frac{1}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} B_n(r) \frac{d^{2n} q_0(y)}{dy^{2n}}. \quad (61)$$

Решения (57), (58), (61) стационарной задачи теплопроводности для плоского тела полностью совпадает с аналогичными решениями, полученными в [28].

Очевидно, что решения для плоского тела значительно проще, чем аналогичные решения для плоского цилиндра.

3. Главные выводы

1. Актуальность проблем точных решений обратных линейных стационарных двумерных задач теплопроводности для полых цилиндров (а также для плоских тел), полученные в настоящей статье в замкнутых рекуррентных формах, состоит в том, что осуществлена возможность с достаточными степенями точностей восстановления граничных условий по измерению датчиков тепловых потоков.

2. Сгенерированные в статье рекуррентные формы записи решений стационарных двумерных линейных обратных задач теплопроводности для полых цилиндров (а также для плоских тел) с граничными условиями на одной из поверхностей являются решениями в замкнутых формах и с единых позиций, что не во всяких случаях реализуется в явных формах.

3. В настоящей научной работе получены точные замкнутые аналитические решения стационарных двумерных обратных задач теплопроводности для полых цилиндров, хотя в работах [2-30], утверждалось, что это невозможно осуществить.

4. С практических точек зрения сгенерированные решения можно будет использовать для расчётов температурного двумерного стационарного поля для разнообразного материала, применяемого в ракетно-космической и авиационной технике, исходя из измерений неравномерных осевых граничных условий на одной из поверхностей полых цилиндров (а также плоских тел).

5. Выведенные закономерности необходимо использовать при инженерных и научных расчётах стационарных двумерных температурных полей и плотностей тепловых потоков в перспективных деталях, используемых в космической, авиационной и ракетной технике.

Литература

1. Бек Дж., Блакуэлл Б., Сент-Клэр Ч., мл. Некорректные обратные задачи теплопроводности. М.: Мир, 1989. 312 с.
2. Бейтмен Г., Эрдейи А. Высшие трансцендентные функции. Гипергеометрическая функция. Функции Лежандра. М.: Издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, 1965. 296 с.
3. Белозёров Г.А., Лобанов И.Е. Применение теплоизоляционной упаковки для стабилизации температурных режимов хранения скоропортящихся продуктов // Актуальные проблемы современной науки. 2012. № 2. С. 193-200.
4. Бургграф О.Р. Точное решение обратной задачи в теории теплопроводности и

- её приложениях // Труды американского общества инженеров-механиков. Серия С: Теплопередача. 1964. № 3. С. 94-106.
5. Имбер М., Кхан Д. Расчёт нестационарного распределения температуры на основании показаний тепмопар, расположенных внутри тела // Ракетная техника и космонавтика. 1972. № 2. С. 83-90.
 6. Кавтарадзе Р.З., Лапушкин Н.А., Лобанов И.Е. Исследование теплоизолирующего действия слоя нагара на поверхностях КС дизеля с использованием обратных и сопряжённых методов теплопроводности // Изв. вузов. Машиностроение. 1997. № 4-6. С. 66-71.
 7. Кавтарадзе Р.З., Лапушкин Н.А., Лобанов И.Е. Исследование теплоизолирующего действия слоя нагара с применением обратных и сопряжённых методов теплопроводности // Двигатель-97. Материалы международной научно-технической конференции. М., 1997. С. 25.
 8. Кавтарадзе Р.З., Лапушкин Н.А., Лобанов И.Е. Расчётно-экспериментальное исследование нестационарного теплообмена в камере сгорания быстроходного дизеля с учетом теплоизолирующего действия слоя нагара // Совершенствование мощностных, экономических и экологических показателей ДВС. Материалы VI международного научно-практического семинара. Владимир, 1997. С. 111-112.
 9. Лобанов И.Е. Аналитическое решение нелинейной обратной задачи теплопроводности для тела с низким коэффициентом теплопроводности одномерной геометрии // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Программа XII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. М.: МЭИ, 1999. С. 10.
 10. Лобанов И.Е. Верифицированные точные аналитические решения в замкнутой рекуррентной форме нестационарной линейной обратной задачи теплопроводности для тел одномерной геометрии // Веб-портал профессионального сетевого педагогического сообщества «Ped-library.ru». 2024 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ped-library.ru/1732030985>.
 11. Лобанов И.Е. К вопросу детерминирования влияния медной плёнки в конструкции датчика поверхностной температуры на расчёт теплового состояния слоя нагара // Электронный периодический рецензируемый научный журнал «SCI-ARTICLE.RU». 2017. № 43 (март). С. 142-148.
 12. Лобанов И.Е. Нелинейная нестационарная обратная задача теплопроводности для тел одномерной геометрии с низким коэффициентом теплопроводности: точные аналитические решения // Тепловые процессы в технике. 2012. Т. 4. № 6. С. 274-283.
 13. Лобанов И.Е. Обратная одномерная нелинейная задача теплопроводности: точные аналитические решения // Электронный научный журнал «Теплофизика и теплотехника». 2012. Выпуск 1(1). Июль-Декабрь. С. 3-12.
 14. Лобанов И.Е. Расчётно-экспериментальная методика косвенного измерения толщины слоя нагара на поверхностях камер сгорания тепловых двигателей // Электронный периодический рецензируемый научный журнал «SCI-ARTICLE.RU». 2016. № 38 (октябрь). С. 96-100.

- 15.Лобанов И.Е. Теоретико-экспериментальное детерминирование нестационарного температурного состояния слоя нагара в камерах сгорания тепловых двигателей // Электронный периодический рецензируемый научный журнал «SCI-ARTICLE.RU». 2016. № 40 (декабрь). С. 194-206.
- 16.Лобанов И.Е. Теоретическое определение максимального воздействия слоя нагара на поверхности камеры сгорания на нестационарные параметры рабочего тела при радиационно-конвективном теплообмене // Московское научное обозрение. 2013. № 9. С. 11-15.
- 17.Лобанов И.Е. Теория теплообмена теплоизоляционной упаковки для стабилизации температурных режимов хранения скоропортящихся продуктов // Электронный научный журнал «Исследования технических наук». 2011. Июль. Выпуск 1. Том 1. С. 3-10.
- 18.Лобанов И.Е. Точные аналитические решения нелинейной нестационарной обратной задачи теплопроводности для тела с низким коэффициентом теплопроводности // Известия вузов. Авиационная техника. 2010. № 3. С. 72-74.
- 19.Лобанов И.Е. Точные аналитические решения нелинейной нестационарной обратной задачи теплопроводности для тел с низким коэффициентом теплопроводности одномерной геометрии // Альманах современной науки и образования. Тамбов: Грамота, 2010. № 8 (39). С. 56-64.
- 20.Лобанов И.Е. Точные аналитические решения нелинейной нестационарной обратной задачи теплопроводности для тел с низким коэффициентом теплопроводности одномерной геометрии // Тезисы докладов и сообщений XIV Минского международного форума по тепло- и массообмену. Минск, 2012. Т. 1. Ч. 2. С. 729-732.
- 21.Лобанов И.Е. Точные аналитические решения нелинейной нестационарной обратной задачи теплопроводности для тел с низким коэффициентом теплопроводности одномерной геометрии // Труды XIV Минского международного форума по тепломассообмену. Минск, 2012. Секция № 7. Общие вопросы тепломассообмена и теплопроводность. Доклад № 1-19. С. 1-11.
- 22.Лобанов И.Е. Точные аналитические решения линейной нестационарной обратной задачи теплопроводности для тел одномерной плоской геометрии с граничными нестационарными температурными условиями на двух поверхностях, полученные в замкнутой рекуррентной форме // Инновационные подходы в отраслях и сферах. 2019. Том № 4. Выпуск № 2 (февраль, 2019) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://inf16.ru/vypusk-2-fevral-2019>.
- 23.Лобанов И.Е., Доценко А.И. Влияние слоя нагара на поверхностях камер сгорания на параметры рабочего тела // Механизация строительства. 2009. № 5. С. 23-26.
- 24.Лобанов И.Е., Парамонов Н.В. Измерение и моделирование тепловых нагрузок в камерах двигателей внутреннего сгорания. М.: Издательство МАИ, 2012. 160 с.
- 25.Тёмкин А.Г. Обратные задачи теплопроводности. М.: Энергия, 1973. 464 с.
- 26.Langford D. New analytical Solutions of the One-Dimensional Heat Equation for Temperature are Heat Flow Rate Both Prescribed at the Same Fixed Boundary

- (with applications to the phase change problem) // Q. App. Math. 1976. 24 (4). P. 315-322.
27. Lobanov I.E. Exact Analytical Solutions for an Unsteady Linear Inverse Problem and Heat Conductivity for Bodies of One-Dimensional Geometry with Boundary Conditions on One Surface, and also on Two Surfaces for a Flat Body, a Hollow Cylinder, and a Hollow Sphere, Obtained in a Closed Recurrent Form // Journal of Chemistry: Education Research and Practice. 2020. Volume 4. Issue 2. P. 1-17.
28. Mosaad M. General Exact Inverse Solution to Steady Two-Dimensional Heat Conduction with Heat Generation in a Plane Wall // Mansoura Engineering Journal. 2021. Vol. 18. Iss. 3. Article 20. P. 123-134.
29. Mosaad M. Inverse problem of steady heat conduction in a cylindrical wall with axial-variable boundary conditions // JP Journal of Heat and Mass Transfer. 2010. Volume 4. Number 2. P. 137-150.
30. Mosaad M., Al-Ajmi R. Inverse problem of steady heat conduction in a cylindrical wall with axialvariable boundary conditions // JP Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. March. P. 1-16.
31. Stefan J. Über die Theorie der Eisbildung, insbesondere über die Eisbildung im Polarmeere // Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie Wiss., Wien, Math.-naturwiss. Kl. 1890. V. 98 (2a). S. 956-973.

УДК 629.783

Концепция создания космических платформ на базе универсального управляющего ядра

Антон Константинович Чернов, инженер,

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва
(ПАО «РКК «Энергия»), г. Королёв, Московская область

В работе предложен подход к созданию автоматических космических аппаратов на базе унифицированной платформы, построенной вокруг управляющего ядра. Такой подход позволяет улучшить основные целевые характеристики разрабатываемых аппаратов, поскольку все служебные системы выбираются под конкретную полезную нагрузку. При этом использование единого для всех аппаратов управляющего ядра платформы позволит сохранить надежность на высоком уровне. В работе приведены основные проектные характеристики управляющего ядра. Также показаны проектные облики космических аппаратов на базе предложенной платформы.

Космический аппарат, унифицированная спутниковая платформа, управляющее ядро платформы, космическая система, дистанционное зондирование Земли.

The concept of satellite buses based on a unified control core

Anton Konstantinovich Chernov, engineer,

S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia (RSC Energia),
Korolev, Moscow region

The approach of creating a spacecraft based on satellite bus control core are presented in this article. This approach helps to increase main characteristics of various spacecraft. According to this approach, all subsystems are selected according to the requirements of the payload. Furthermore, the use of a common satellite bus control core for all spacecraft helps to maintain the reliability of the space system at a high level. Main characteristics of the satellite bus control core device are presented in the article. In addition, the design of two type of spacecraft based on satellite bus control core is presented.

Spacecraft, satellite bus, satellite bus control core, space system, Earth observation.

Введение

Развитие автоматических космических аппаратов (АКА) преследует цель снижения стоимости их создания и эксплуатации при одновременном улучшении целевых характеристик. Одним из способов уменьшения стоимости создания АКА является использование унифицированных космических платформ (УКП) – конструктивно и функционально обособленных модулей, содержащих различные

служебные системы и обеспечивающих штатное функционирование полезной нагрузки (ПН). УКП различных классов, отличающиеся габаритами, массой и мощностью, предоставляемой ПН, существуют у многих ракетно-космических предприятий и позволяют разрабатывать новые космические аппараты (КА) на базе уже отработанных решений, что существенно повышает их надежность, а также снижает стоимость разработки.

Кроме того, к снижению стоимости создания космических систем при сохранении их целевых характеристик привело внедрение в космическую отрасль передовых технологий. Это также позволило снизить массогабаритные характеристики КА [1, 2], открыв новые возможности по развертыванию низкоорбитальных группировок, которые обеспечивают более оперативное получение актуальной информации.

Однако при растущем числе разрабатываемых и развертываемых орбитальных группировок (ОГ) становятся заметными недостатки «классического» подхода к созданию АКА на базе УКП. В настоящей работе предложен подход к созданию АКА на базе «управляющего ядра», приведено его сравнение с «классическим» подходом, а также предложены варианты различных КА на его базе.

Подходы к созданию унифицированных космических платформ

Большая часть существующих и разрабатываемых платформ представляет собой единую конструкцию, включающую в себя все служебные системы, необходимые для обеспечения штатного функционирования целевой аппаратуры. Сама же целевая аппаратура интегрируется в готовую конструкцию УКП. Такой подход считается классическим и большинство АКА выполнены именно по нему.

Классический подход позволяет ускорить разработку и снизить расходы, требуемые на создание космического аппарата. Кроме того, создание аппарата на базе уже отработанной платформы повышает его надежность и облегчает интеграцию со средствами выведения. Однако в рамках одной УКП сложно обеспечить унификацию для целого ряда различных по размерам и назначению аппаратов. При переходе от одного типа ПН к другому зачастую может потребоваться не только адаптация конструкции, но и внесение изменений в служебные системы, по типу системы обеспечения температурного режима (СОТР) и системы энергоснабжения (СЭС). Для решения представленной проблемы, многие предприятия предлагают линейку УКП различных классов для различных ПН. Некоторые платформы и их основные характеристики приведены в таблице 1 [3-7].

Таблица 1 – Основные характеристики некоторых УКП

Название	Масса УКП, кг	Мощность для ПН, Вт	Служебная радиолиния	Разработчик	СAC, лет
НТ-50	30	40		НПЦ МКА	3
НТ-100	120	120		НПЦ МКА	5
Карат	140	250 (для всего КА)		НПО Лавочкина	-
НТ-500	250	-		НПЦ МКА	5
Виктория	от 950	до 3000		ПАО «РКК	12,5

Название	Масса УКП, кг	Мощность для ПН, Вт	Служебная радиолиния	Разработчик	СAC, лет
	до 1200			«Энергия»	
БМСС Навигатор	980	1150		НПО Лавочкина	7,5
Экспресс-1000К	1220	3600		АО «ИСС»	15,25
Ресурс-УКП	до 1600	1500		НПП ВНИИЭМы	5

В связи с активным развитием многоспутниковых группировок, возрастают требования к рациональности основных характеристик подобных аппаратов. Использование существующих готовых платформ, даже после адаптации служебных систем к ПН, не позволяет добиться наилучших массогабаритных и, в некоторых случаях, целевых характеристик. Кроме того, использование стандартной платформы для создания большой группировки КА может увеличить ее конечную стоимость по сравнению со вновь разрабатываемой, поскольку некоторые функции унифицированной платформы могут не использоваться в конкретном аппарате.



Рисунок 1 – КА на базе платформы SSTL

Все вышесказанное привело к появлению подхода, при котором для вновь разрабатываемых космических аппаратов создают новую платформу. При этом платформа строится на базе приборов, хорошо зарекомендовавших себя в составе других аппаратов. Так, например, компания SSTL предлагает разрабо-

тать КА под ПН заказчика, при этом в качестве платформы используется стандартный приборный состав. На рисунке 1 представлены два КА на платформе SSTL – Д33 в оптическом и радиодиапазонах, при этом конструкция аппаратов максимально адаптирована под полезную нагрузку.

Описание предлагаемой платформы

Предлагаемая в настоящей работе платформа строится на базе одного универсального управляющего прибора – управляющего ядра. Управляющее ядро представляет собой совокупность программно-аппаратных средств для решения задач управления движением КА на орбите, а также управления функционированием вспомогательного оборудования бортового комплекса управления (БКУ), системы служебного канала управления (ССКУ), системы энергоснабжения, системы управления движением и навигацией (СУДН) и системы обеспечения теплового режима (СОТР) на всех этапах подготовки и эксплуатации аппарата.

Помимо универсального ядра в состав служебных систем КА входят различные необходимые приборы, выбранные специально для решения поставленной перед аппаратом задачи. Схема предложенной унифицированной платформы на базе управляющего ядра представлена на рисунке 2. Конструкция управляющего ядра платформы представлена на рисунке 3. Основные характеристики управляющего ядра приведены в таблице 2.

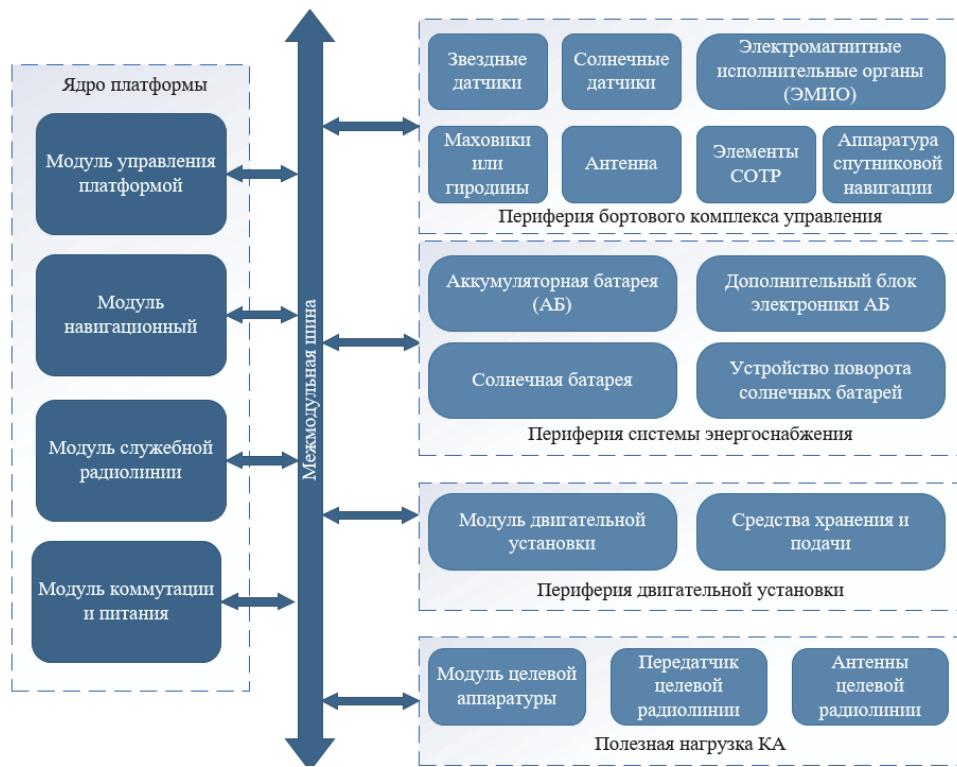


Рисунок 2 – Схема УКП на базе управляющего ядра



Рисунок 3 – Конструкция ядра платформы

Таблица 2 – Основные характеристики управляющего ядра платформы

Характеристика	Значение
Масса, кг	10...15
Габариты, мм × мм × мм	242×165×154
Электропотребление, Вт	20...50
Напряжение питания, В	25...35
Предоставляемые информационные интерфейсы	CAN; SpaceWire; RS422; SPI
Предоставляемые электрические интерфейсы	3,3В; 5В; 12В
Рабочая температура, °С	-20...+60

Ядро может быть по настоящему универсальным прибором, поскольку большинство периферийных приборов (солнечные, звездные датчики, управляющие двигатели-маховики, аппаратура регулирования и контроля СЭС и другие) используют стандартные информационные и силовые интерфейсы. Это позволит использовать ядро для КА различного назначения. В качестве примера рассмотрим проектные облики ДЗЗ в оптическом и радиодиапазонах, построенные на базе предложенной платформы.

Космические аппараты на базе предлагаемой платформы

Расчеты основных проектных параметров АКА и их служебных систем были проведены согласно методике [8]. Разнотипность требований, предъявляемых полезными нагрузками к платформе, позволяют показать преимущества

предложенного подхода к созданию космических аппаратов. Так, например, ни одна из рассмотренных выше малых платформ, не сможет обеспечить требуемые характеристики СЭС для радиолокационного КА. Кроме того, предложенная платформа позволяет максимально интегрировать целевую аппаратуру в конструкцию аппарата, повышая прочностные характеристики изделия в целом и упрощая размещение под обтекателем всей группировки.

ПН типовая, характеристики заданы на основе зарубежных аналогов: для радиолокатора выбран КА ICEYE, для оптической выбран КА NigeriaSat-2.

Изображения космических аппаратов в транспортировочном и рабочем положениях приведены на рисунке 4. Основные характеристики полученных АКА приведены в таблице 3.

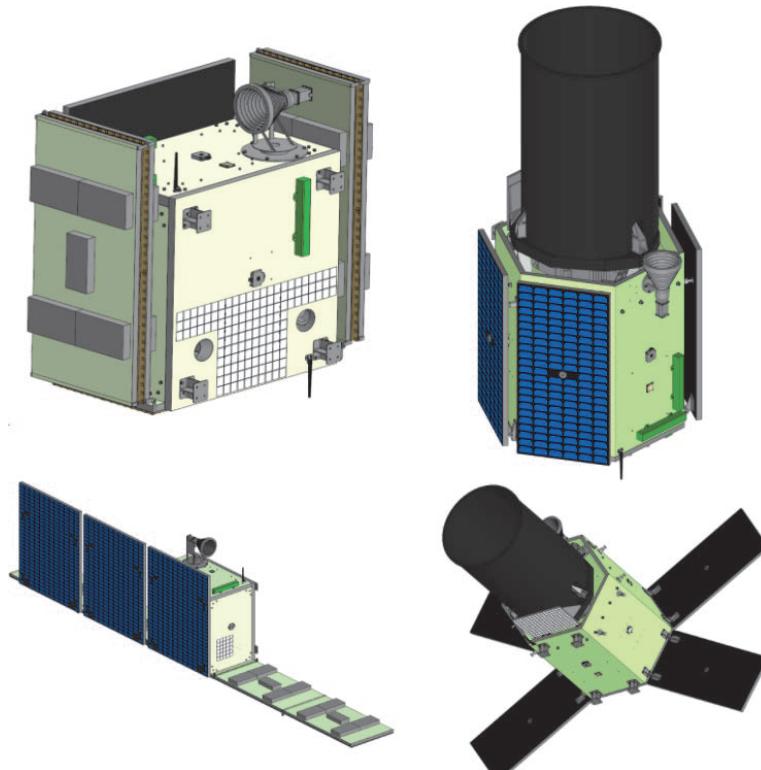


Рисунок 4 – АКА на базе предложенной платформы

Таблица 3 – Основные характеристики предложенных аппаратов

Характеристика	Радиолокационный КА	Оптический КА
Масса КА, кг	430	250
Энергопотребление ПН, Вт	1 500	120
Время работы ПН на витке, мин	1	10
Мощность СБ, Вт	930	408

Характеристика	Радиолокационный КА	Оптический КА
Характеристики орбиты	ССО, 533 км	ССО, 441 км
Масса рабочего тела ДУ, кг	10	16
Срок активного существования КА, лет	5	5

Заключение

Классический подход к созданию АКА на базе УКП имеет ряд недостатков. Применение такого подхода не позволяет обеспечивать глубокую интеграцию и адаптацию ПН к платформе без ее существенной доработки. В случае разработки единичных аппаратов такой подход имеет место, поскольку существенно снижает стоимость их создания. Однако, применительно к большим орбитальным группировкам имеет смысл рассмотреть предложенный подход к созданию АКА на базе платформ с управляющим ядром, поскольку применительно к серийным однотипным аппаратам получение наилучших целевых характеристик является более важной задачей, чем экономия средств при их создании.

В работе предложены облик и структура управляющего ядра платформы, а также показано его применение на примере АКА с разнотипными полезными нагрузками, имеющими существенно различающиеся требования к служебным системам.

Литература

1. Макриденко Л.А., Боярчук К.А. Микроспутники. Тенденции развития. Особенности рынка и социальное значение // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2005. Том 102. С. 12-27.
2. Петрович А.А., Никифоров О.В. Малые спутники для космических исследований // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2016. Том 3. № 4. С. 22-31.
3. Семенов Ю.П., Легостаев В.П., Вовк А.В. и др. Опыт проектирования космических аппаратов малой размерности на базе универсальной платформы «Виктория» // М.: РКК Энергия, 2007.
4. Тестоедов Н.А. Сибирский центр российского спутникостроения // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2012. № 5. С. 126-139.
5. Зимин И.И., Валов М.В., Яковлев А.В. Перспективные унифицированные платформы малого класса // Сибирский аэрокосмический журнал. 2016. Том 17. № 1. С. 118-124.
6. Макриденко Л.А., Волков С.Н., Горбунов А.В., Ходненко В.П. Унифицированная космическая платформа «Ресурс-УКП» // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2019. Том 170. № 3. С. 49-57.
7. Ефанов В.В. Многофункциональная космическая платформа «Навигатор» // ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». 2017. 360 с.: ил.
8. Мосин Д.А., Северенко А.В., Уртминцев И.А., Синявский В.В., Чернов А.К. Методологический подход к задаче выбора проектных параметров низкоорбитальных спутников // Вестник Самарского национального исследовательского университета. Серия: Космическая техника. 2018. № 1. С. 10-16.

тального малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли
// Космическая техника и технологии. 2023. № 4(43). С. 17-27.

УДК 669.017.3

Обоснование фазовых превращений в железе ниже A_1 на основании коррозионного поведения сталей

Бобомурод Хасанович Курбанов, ассистент кафедры
материаловедения и технологии художественных изделий,
Карэн Юрьевич Шахназаров, доктор технических наук,
профессор кафедры материаловедения и технологии художественных изделий,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург

Особенности фазовых превращений в железе и сталях имеют более чем вековую историю. Однако, природа изменений в структуре железа и сталей в субкритическом интервале (ниже A_1) до сих пор недостаточно изучена, а возможность превращений в данном интервале температур остается дискуссионной.

В представленной работе проведено исследование коррозионной стойкости и твердости конструкционных и инструментальных сталей (ХВГ, 38ХН3МФА, 12ХНВ2А, сталь 20, сталь 3кп) после различных режимов закалки и отпуска. Установлены оптимальные температуры отпуска, позволяющие обеспечить максимальную коррозионную стойкость перечисленных выше сталей.

На основании качественно одинакового хода кривых скорости коррозии от температуры отпуска сталей с различным содержанием углерода и легирующих элементов сделано предположение о возможном превращении в железе в подкритическом (ниже A_1) интервале температур.

Закалка, отпуск, мартенсит, троостит, коррозионная стойкость.

Justification of phase transformations in iron below a_1 based on the corrosion behavior of steels

Bobomurod Hasanovich Kurbanov, assistant of the Department
of Materials Science and Technology of Artistic Products,
Karen Yurievich Shakhnazarov, Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of Materials Science and Technology of Artistic Products,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg

The peculiarities of phase transformations in iron and steels have more than a century history. However, the nature of changes in the structure of iron and steels in the subcritical range (below A_1) is still insufficiently studied, and the possibility of transformations in this temperature range remains debatable.

In the presented work, a study of the corrosion resistance and hardness of structural and tool steels (HVG, 38KHN3MFA, 12KHNV2A, steel 20, steel 3kp) after various quenching and tempering modes was carried out. Optimal tempering tempera-

tures have been established to ensure maximum corrosion resistance of the above-listed steels.

Based on the qualitatively identical course of the corrosion rate curves from the tempering temperature of steels with different carbon contents and alloying elements, an assumption is made about the possible transformation into iron in the sub-critical (below A_1) temperature range.

Quenching, tempering, martensite, troostite, corrosion resistance.

Введение

Превращение в железе в субкритическом (ниже A_1) интервале температур до сих пор не нашла подтверждения, несмотря на то, что этим вопросом занимались ученые-металловеды всего мира на протяжении почти столетия.

Хорошо известные полиморфное при 911 °C и магнитное при 768 °C превращения являются тепловыми и сопровождаются тепловыми эффектами и экстремумами на кривых физических и химических свойств. Среди которых можно выделить резкое повышение коэффициента диффузии, скачкообразное изменение теплоемкости, экстремумом на кривой термоэлектродвижущей силы при A_2 , изменением объема (сжатием при нагреве), экстремумами на кривой ползучести и термоэлектродвижущей силы, колоссальной хрупкостью, проявляющей себя при ударных испытаниях при A_3 [9, 23].

Согласно Г. Тамману, Э. Гудремону, А.А. Бочвару, А.М. Самарину, Б.Г. Лившицу [9, 17] выявляют превращения по аномалиям «любых» физико-химических свойств. Например, по модулю упругости можно определить температуры Кюри никеля и железа (изгибы кривых), полиморфные превращения железа и кобальта (экстремумы на кривых) [14].

Уникальность железа не только в том, что оно является одним из самых распространенных элементов, а производство его производного (стали) «в 14 раз превосходит производство других металлов» и не только в его полиморфности, а в следующем – «превращение ОЦК α -Fe ($K=8$) в более плотную ГЦК γ -модификацию ($K=12$) при нагреве совершенно необычно и наряду с термодинамической интерпретацией требует специального физического объяснения особенно в связи с тем, что именно оно лежит в основе металловедения и термической обработки железных сплавов» [9]. «Необычность» железа подтверждается еще и тем, что твердость Fe при 440 °C в 1,15 раза выше, чем при 20 °C. Это уникально: у других металлов ничего подобного нет – при повышении температуры твердость снижается. Только у марганца с тетрагональной решеткой наблюдается максимум твердости при 650-750. Таким образом, вблизи $\alpha \rightleftharpoons \beta$ превращения марганца наблюдается максимум твердости. Абсолютный максимум твердости при 440 °C у железа позволяет – по аналогии – предполагать превращение и в железе при этой температуре. Особо отметим: при температуре безусловного $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения (910 °C) абсолютный минимум твердости.

Вокруг интервала температур 400-500 °C сложилась любопытная ситуация. М.В. Белоус с соавторами его просто не замечают в классификации четырех

превращений при отпуске, хотя еще в 1925 г. П. Обергоффер, основываясь на минимуме при 400-500 °С термоЭДС пары железо-платина, писал: «Имеем ли мы здесь дело с дальнейшим превращениями в чистом железе, должны показать новые подробные исследования».

«Троостит при отпуске до 400-500 °С переходит в характерный, очень легко проправливающийся продукт отпуска с наибольшим удельным весом и другими отличными физическими свойствами, который ранее называли осмондитом, но по микроструктуре он не отличается от троостита или сорбита». Описанная [2, 18] Н.Я. Минкевичем (1932 г.) аномалия известна более 80 лет. Воззрения на её природу Гудремон [22] обобщил следующим образом: «При отпуске мартенситной структуры состояние максимальной растворимости в кислотах (и максимальной травимости) достигается примерно после отпуска при 400 °С ... при некоторой критической дисперсности карбидов ... такую структуру, раньше иногда, называли осмондитом». За неимением лучшего, многократный рост предела упругости после среднего отпуска закалённой стали, также связывают с «оптимальной» степенью дисперсности карбидов, что нелепо, так как это наблюдается и в наклёпанной стали. Этот эффект нельзя объяснить «на основе общепринятых представлений» [5, 9]. Таким образом, повышенная травимость шлифов известна всем металлографам, а термин «осмондит» практически исчез из обихода.

Аномалия коррозионной стойкости и другие отличные «физические свойства» осмондита могут быть связаны с фазовым превращением в железе при 400-500 °С. Для этого интервала Обергоффер [4, 19] предлагал ещё в 1925 году провести «новые подробные исследования». Вместо них, иногда голословно, отрицается возможность «новых» превращений, а наблюдаемые эффекты относят к ошибкам эксперимента [11, 18].

Цель работы

Целью настоящей работы является использование метода определения коррозионной стойкости для обоснования вероятности фазовых превращений ниже A_1 в железе и его производных – сталях, поскольку превращения проявляют себя в скачках свойств и перегибах на кривых изменения свойств [12].

Материал и методика исследования

Для исследования были выбраны конструкционные стали марок 12ХНВ2А, 38ХН3МФА, сталь 20 и сталь 3 кп и инструментальная сталь марки ХВГ, резко различающиеся по содержанию углерода и легирующих элементов.

Термическую обработку, включающую в себя субкритическую (от 640 °С, вода) и обычную (930 °С, вода) закалки и последующего отпуска при 20 °С, 350 °С и 390 °С проводили в соляных ваннах АО «Северо-Западный региональный центр концерна ВКО «Алмаз-Антей» – Обуховский завод». Скорость коррозии определяли в 0,7 М растворе H_2SO_4 , потенциалы образцов измеряли в растворе 0,1 М $FeSO_4$ и 1 М растворе HCl . Выдержка для всех образцов составляла 168 часов [16, 21]. Твердость после проведения соответствующих режимов термической обработки измеряли на твердометре ТК-2М. Осадка образцов из стали 20 осуществлялась на прессе гидравлическом ПСУ-10 (10 тс).

Результаты эксперимента

После субкритической (от 640 °C, вода) и обычной (930 °C, вода) закалки и последующего отпуска карбидная фаза и твёрдый раствор принципиально различны, но отпуск при 390 °C одинаково резко снижает коррозионную стойкость промышленных сталей 12ХНВ2А, 38ХН3МФА и ХВГ, как и стали 20, предварительно осаженной на 70% (Таблица 1).

Доказательством последнего является качественно одинаковое увеличение скорости коррозии после отпуска при 390 °C сталей ХВГ, 38ХН3МФА и 12ХНВ2А [13, 24], медленно охлажденных от 640 и 930 °C, что почти исключает пересыщенность твердого раствора, т.е. «карбидную» версию коррозионного поведения [25, 26].

Таблица 1 – Твёрдость (HRC, HRB) и скорость коррозии (K) в 0,7М растворе H_2SO_4 после охлаждения в печи и воде от 640 °C и 930 °C с последующим отпуском при 20 °C, 350 °C и 390 °C [5, 9]

Сталь	Обработка перед отпуском	Температура отпуска, °C					
		20		350		390	
		HRC	K, мм/г од	HRC	K, мм/год	HRC	K, мм/год
ХВГ	640 °C, печь	27	1,66	27	3,05	25	5,92
	640 °C, вода	27	1,44	25	3,62	25	4,63
	930 °C, печь	29	4,91	29	4,19	29	5,45
	930 °C, вода	63	0,5	55	3,34	53	6,58
38ХН3МФА	640 °C, печь	35	1,59	32	3,51	32	5,09
	640 °C, вода	37	1,44	35	2,76	35	3,96
	930 °C, печь	36	1,99	37	3,36	33	5,24
	930 °C, вода	52	2,12	46	3,34	42	6,29
12ХНВ2А	640 °C, печь		1,54		3,26		3,58
	640 °C, вода		1,4		3,07		5,33
	930 °C, печь		2,47		4,79		19,55
	930 °C, вода		3,02		2,94		6,7
Ст 20	Осадка на 70%	72*	1,09	71*	1,71	69*	2,11

* – HRB

Описанные эффекты не связаны с легированием и содержанием кислорода [10, 23], поскольку повышенная скорость коррозии после отпуска при 400 °C наблюдается в стали 20 (Рисунок 1, кривая 1) и стали 3кп (Рисунок 1, кривая 3). Первую отпускали после отжига при 930 °C, а вторую – в состоянии поставки. Скорость коррозии определяли в 0,5 М растворе H_2SO_4 при выдержке 168 часов [16, 21]. Потенциалы образцов измеряли в растворе 0,1 М $FeSO_4$.

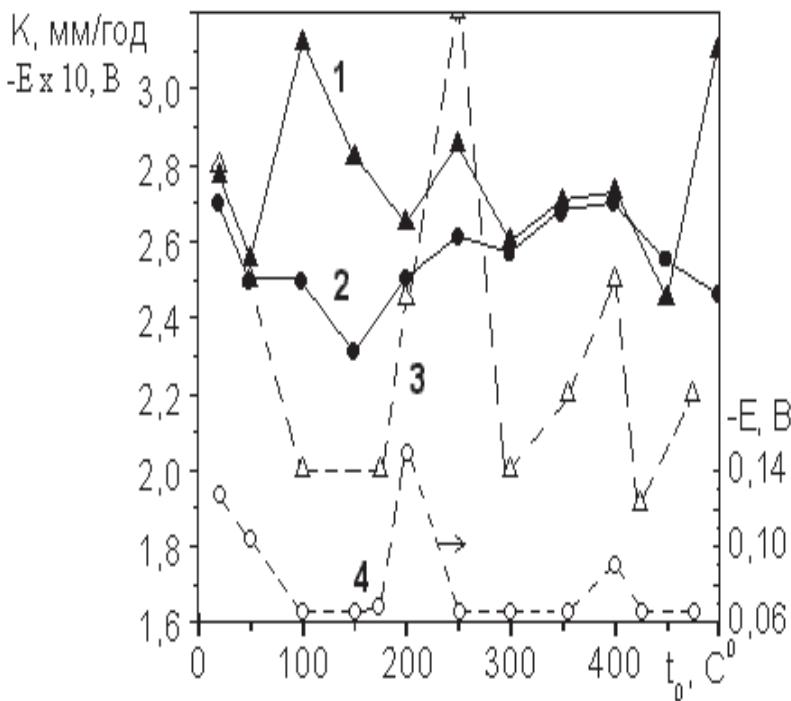


Рисунок 1 – Зависимость скорости коррозии K , мм/год (кр. 1, 3) и потенциала E , В (кр. 2, 4) стали 20 (кр. 1, 2) и 3kp (кр. 3, 4) от температуры отпуска (t_0)
составлено авторами

При 160-180 °С происходят мощные изменения свойств отпускаемого мартенсита, саморазмагничивание перлита [20] и излом на кривой его теплоёмкости и др. Поэтому определены E в 0,1 М растворе $FeSO_4$ и K в 1 М растворе HCl сталей ХВГ, 38ХН3МФА и 12ХНВ2А после обычной (900 °С) и субкритической (650 °С) закалок [14, 15].

Независимо от вида закалки [6, 7], содержания углерода, легирования, небольшого, но самого разного изменения твёрдости, отпуск при 180 °С резко – в несколько раз – снижает скорость коррозии (Рисунок 2, кривые 1, 2, 3, Рисунок 3, кривые 1, 2, 3), а кривые E – t_0 имеют минимум при $t_0 = 150$ °С (Рисунок 2, кривые 4, 5, 6, Рисунок 3, кривые 4, 5, 6). Это доказывает, что коррозионное поведение определяется воздействием нагрева (отпуска) на ансамбль атомов железа [17, 27].

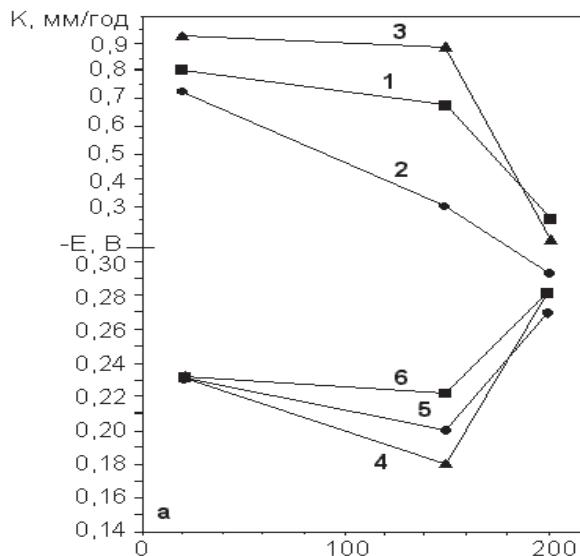


Рисунок 2 – Зависимость скорости коррозии V , мм/год и потенциала E , В сталей 12ХНВ2А (кр. 1, 4), 38ХН3МФА (кр. 2, 5) и ХВГ (кр. 3, 6) от температуры отпуска после закалки от 650 $^{\circ}$ С

составлено авторами

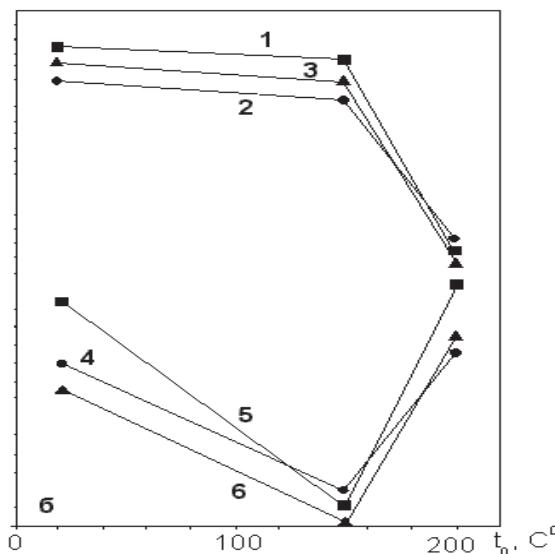


Рисунок 3 – Зависимость скорости коррозии V , мм/год и потенциала E , В сталей 12ХНВ2А (кр. 1, 4), 38ХН3МФА (кр. 2, 5) и ХВГ (кр. 3, 6) от температуры отпуска после закалки от 900 $^{\circ}$ С

составлено авторами

Трактовка коррозионного поведения затруднена не только неясностью металловедческих аспектов, но и очень большой разницей в скорости коррозии,

определенной по потере массы, поляризационному потенциалу и току коррозии (Таблица 2).

Таблица 2 – Скорость коррозии, определённая разными методами [5]

Сталь	Предварительная обработка	Скорость коррозии, мм/год		
		По потере массы	По поляризационному сопротивлению	По току коррозии
ХВГ	Отжиг при 930 °C	5,45	4,61	5,23
	Закалка от 930 °C	6,58	29,4	82,9
38ХН3МФА	Отжиг при 930 °C	5,24	4,40	16,51
	Закалка от 930 °C	6,29	16,54	33,01
12ХНВ2А	Отжиг при 930 °C	19,55	7,28	16,51
	Закалка от 930 °C	6,7	13,25	20,79
Ст 20	Осадка на 70%	2,94	14,28	17,76

Заключение

В результате проведенного исследования установлено, что независимо от процентного содержания углерода и легирующих элементов оптимальной с точки зрения снижения скорости коррозии инструментальных и конструкционных сталей является температура отпуска 180 °C.

Резкое снижение коррозионной стойкости различнолегированных сталей после отпуска 390 °C может быть причиной вероятного превращения в железе ниже A₁. Таким образом, коррозионные испытания могут быть одним из методов выявления превращений в железе в подкритическом (ниже A₁) интервале температур, которым пока нет даже названий.

Литература

1. Ermakov S.B., Ermakov B.S. Investigation of Material Properties for Cryogenic Products // Produced by Additive Manufacturing Techniques. Metallurgist. 2023. 67(5-6). pp. 644-651.
2. Lavrinenko V.Yu., Lavrinenko Yu.A. Materials for Manufacturing Automotive Industry High-Strength Fasteners // Metallurgist. 2020. Vol. 63. № 9. pp. 960-966 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00913-0>.
3. Litvinenko V.S., Dvoynikov M.V. Methodology for determining the parameters of drilling mode for directional straight sections of well using screw downhole motors // Journal of Mining Institute. T. 241. (105) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.105>.
4. Peregudov A.K., Vologzhanina S.A., et al. Materials and Construction III. (2021) 887. pp. 242-246.
5. Petkova A.P., Gorbatyuk S.M. Selection of materials and technologies for the electrochemical synthesis of sodium ferrate. Metallurgist. 2024. 68(3). pp. 449-459.

6. Popov G.A., Bolobov V.I. Development of the Kinetic Equation of the Groove Corrosion Process for Predicting the Residual Life of Oil-Field Pipelines Energies. 2023. 16(20). 7067. pp. 23-25.
7. Pryakhin E.I., Sharapova D.M. Repair ability of low-alloyed steel strength of k70 (x90) class // Key Engineering Materials. 2020. Vol. 836. pp. 131-135.
8. Shakhnazarov K.Yu, Pryakhin E.I. Rationale for signs of transformation in iron near 200 °C // Letters on Materials. 2022. Vol. 12. № 4. pp. 298-302 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2022-4-298-302>.
9. Shakhnazarov K.Yu., Pryakhin E.I. 630 °C±30 °C-nodal (Critical) temperature of iron and carbon steel // Materials Science Forum. 2021. 1040 MSF. pp. 191-199.
10. Syrkov A.G., Prokopchuk N.R. et al. Academician N.S. Kurnakov as the founder of physico-chemical analysis – the scientific base for the development of new metal alloys and materials // Tsvetnye Metally. V. 2021. pp. 77-83. DOI: 10.17580/tsm.2021.01.09.
11. Vasilyev A.A. Investigation and modeling of the effect of pre-deformation of austenite on the kinetics of ferritic transformation // Письма о материалах. Т. 11 № 1(41). pp. 90-94. DOI: 10.22226/2410-3535-2021-1-90-94.
12. Алексеев В.И. Химическая неоднородность как фактор повышения прочности сталей, изготовленных по технологии селективного лазерного плавления // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 191-196. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.191.
13. Бажин В.Ю. Современный взгляд на аномалии в группах металлов Периодической системы Д.И. Менделеева // Записки Горного института. 2020. Т. 239. С. 520-527.
14. Бажин В.Ю., Исса Б.М. Влияние термической обработки на микроструктуру стальных змеевиков нагревательной трубчатой печи // Записки Горного Университета. 2021. Т. 222. С. 393-400 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/issue/view/742>.
15. Баум Б.А., Хасин Г.А. и др. Жидкая сталь. М.: Металлургия, 1984. 208 с.
16. Богданов В.И. Особенности роста зерен austenита в металле поковки из крупного слитка конструкционной // Письма о материалах. 2019. Т. 9. № 3. С. 304-309. DOI: 10.22226/2410-3535-2019-3-304-309.
17. Гудремон Э. Специальные стали. В 2-х т. Т. 1. М.: Металлургиздат, 1959. 952 с.
18. Давыдов С.В. Низкотемпературный распад перлита в железоуглеродистых сплавах по реакции перитектоидного превращения // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2021. № 2 (116). С. 3-13. DOI: 10.30987/2223-4608-2021-2-3-13.
19. Еланский Г.Н., Кудрин В.А. Строение и свойства жидкого металла – технология плавки – качество стали. М.: Металлургия, 1984. 239 с.
20. Ершов Г.С., Позняк Л.А. Микронеоднородность металлов и сплавов. М.: Машиностроение, 1985. 214 с.
21. Корнилов И.И. Состояние и перспективы исследования в области металлидов // Сб. «Материаловедение». Материалы симпозиума по металургии и металло-

- ведению, посвященного 100-летию открытия Д.К. Черновым полиморфизма железа. М.: Наука, 1971. С. 246-257.
22. Курганов Ю.А. Влияние дискретной добавки оксида алюминия на структуру и свойства алюминиевого // Записки Горного института. 2020. Т. 228. С. 717-721.
23. Минкевич Н.А. Свойства, тепловая обработка и назначение стали и чугуна. Под ред. проф. Н.А. Минкевич. Москва, Ленинград: Госмашметиздат, 1932-1936. Т. 2. 344 с.
24. Обергоффер П. Техническое железо. М., Л.: Металлургиздат, 1940. 535 с.
25. Окишев К.Ю. Расчет диаграмм изотермического распада аустенита в конструкционных сталях // Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. 2020. Т. 22. № 2. С. 82-89. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.2.10.
26. Пириайнен В.Ю., Никитина Т.Ю. Новое в изготовлении литых броневых пластин шаровых мельниц // Литейное производство. 2020. № 3. С. 36-41.
27. Самарин А.М., Федотов С.Г., Федотов И.П., Синодова Е.П. Структура и свойства сплавов железа с углеродом // Сб. «Металловедение». Материалы симпозиума по металлургии и металловедению, посвященного 100-летию открытия Д.К. Черновым полиморфизма железа. М.: Наука, 1971. С. 231-235.
28. Чернов Д.К. Письмо редактору «Журнала Русского Металлургического общества» // Журн. Русского Металлургического общества. 1916. Часть 1. № 3-4. С. 189-200.

УДК 677.4

Изучение теплозащитных свойств многослойных эластичных композитов для возможного применения в качестве противопожарных полотен

Сергей Владимирович Фролов, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой механики и инженерной графики,
Владимир Владимирович Абразумов, доктор технических наук, профессор кафедры механики и инженерной графики,
Ольга Владимировна Токарева, доцент кафедры механики и инженерной графики,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Академия государственной противопожарной службы МЧС России»
(АГПС), г. Москва

В статье приводится обзор отечественных и зарубежных огнестойких тканей, интумесцентных покрытий и аэрогелей на основе диоксида кремния с низкой теплопроводностью, которые могут применяться при изготовлении многослойного теплостойкого эластичного композита в противопожарных целях. Изучены отдельные теплозащитные характеристики композитов на основе огнестойких тканей с различными вариантами чередования внутренних слоев заданного интумесцентного состава. Показан преимущественный вариант композиции из рассмотренной совокупности для возможного дальнейшего применения при изготовлении противопожарных полотен.

Огнестойкая ткань, композит, интумесценция, аэрогель.

Study of thermal protection properties of multilayer elastic composites for possible application as fire-fighting cloths

Sergey Vladimirovich Frolov, candidate of physical and mathematical sciences, head of the department of mechanics and engineering graphics,
Vladimir Vladimirovich Abrazumov, doctor of technical sciences, professor of the department of mechanics and engineering graphics,
Olga Vladimirovna Tokareva, associate professor of the department of mechanics and engineering graphics,
Federal State Budgetary Educational Institution Higher education
«Academy of State Fire Service EMERCOM Russia» (AGPS), Moscow

The article provides an overview of domestic and foreign fire-resistant fabrics, intumescents coatings and silica-based aerogels with low thermal conductivity, which can be used in the manufacture of a multilayer heat-resistant elastic composite for fire-fighting purposes. Individual heat-shielding characteristics of composites based on

fire-resistant fabrics with different versions of alternating inner layers of a given intumescence composition have been studied. An advantageous version of the composition from the considered set for possible further use in the manufacture of fire cloths is shown.

Fire resistant fabric, composite, intumescence, aerogel.

Введение

Техногенные и природные пожары сопровождаются высокой интенсивностью тепловых потоков, действие которых приводит порой к уничтожению зданий, сооружений, техники, и, соответственно, к угрозе безопасности для личного состава пожарных подразделений. Для защиты от теплового излучения объектов различного назначения широко применяются теплозащитные экраны, противопожарные преграды, как стационарные, так и передвижные, отличающиеся принципом действия и конструктивными особенностями.

Для огнезащиты жестких конструкций активно применяются методы пассивной огнезащиты, в основе действия которых лежит свойство материалов претерпевать структурные превращения при нагреве с образованием новых структур, обладающих высокими теплозащитными свойствами. Теплозащитную функцию в этих случаях выполняют огнезащитные композиционные материалы на полимерной или минеральной основе, огнестойкие покрытия в виде красок, эмалей, паст и герметиков. Эти покрытия являются одновременно защитным слоем поверхности материала. Полимерные, деревянные и металлические материалы обладают достаточно хорошей адгезией с данными покрытиями. Они водостойки и долговечны. В качестве примера можно привести пасту огнезащитную водоэмulsionционную ВПМ-2.

К вариантам пассивной защиты относится и применение других интумесцентных (вспучивающихся) покрытий соответствующих составов. При воздействии высокой температуры терморасширяющиеся покрытия стремительно увеличиваются в объеме, достигая увеличения в десятки и даже сотни раз, что значительно снижает теплопроводность защитного слоя и придаёт ему высокую огнестойкость. Эффективность этих материалов дополнительно усиливается тем фактом, что для обеспечения пожарной безопасности достаточно применять очень тонкие покрытия, варьирующиеся от долей миллиметра до нескольких миллиметров.

Кроме того, в настоящее время получило развитие применение нового класса теплоизоляционных материалов – аэрогелей, представляющих собой материал – гель, в которых жидкая фаза замещается газообразной. Аэрогели обладают исключительно низкой теплопроводностью и высокой огнестойкостью, что позволило найти им применение в качестве компонентов для улучшения теплофизических свойств огне- и теплозащитных композиций.

При изготовлении противопожарных костюмов, одежды, палаток, «одеял», накидок, полотен применяются соответствующие огнестойкие эластичные тканые материалы.

Так, в качестве коллективного средства спасения в условиях лесных по-

жаров применяются отечественные защитно-спасательные сооружения и укрытия (из эластичной базальтовой ткани) вместимостью от 6 (УЛ-6) до 18 человек (Лес-6), которые легко переносятся одним человеком.

Примером зарубежных индивидуальных средств защиты является пожарное одеяло «Fire Blanket», представляющее собой плащ-палатку, выполненную из керамоволокна и имеющую поверхность с высокой отражательной способностью.

Такая палатка имеет вес всего 3,2 килограмма и способна противостоять температуре ~1600 градусов по шкале Цельсия. Такие специальные противопожарные «одеяла» можно применять и для защиты от огня техники и строений.

К основным направлениям разработки эластичных средств защиты (покрывал, полотен, «одеял») личного состава и пожарной техники следует отнести в первую очередь подбор оптимального сочетания укладки слоев многокомпонентной огне- теплостойкой композиции, включающей внешний слой из огнестойкой ткани с металлизированным покрытием из жаропрочных материалов и внутренних слоев из:

- суспензий сложного интумесцентного состава с низким значением коэффициента теплопроводности – для полотен и покрывал одноразового использования;
- теплостойких материалов аэрогельного типа – для полотен и покрывал многоразового использования.

Огнестойкость наружного слоя может быть обеспечена на основе применения тканей из тугоплавких оксидных волокон. Для этих целей могут быть использованы волокна на основе аморфного диоксида кремния, карбида кремния, оксидов алюминия и циркония. Так, кремнеземное волокно может применяться при нагреве до 1150 °C, волокно из карбида кремния до 1350 °C, а волокна на основе оксида алюминия и оксида циркония более 1600 °C. Разрабатываются технологии получения непрерывных волокон на основе двойных систем $Al_2O_3-SiO_2$ и более, что позволяет изготовить высокотемпературные теплозащитные ткани с их использованием [1, 2].

Поскольку в данной работе исследовались огне- и теплостойкие эластичные многослойные композиции с различными сочетаниями внутренних слоев интумесцентных составов и слоев аэрогельного типа, которые располагались между кремнеземными или базальтовыми тканями, в статье приведен обзор физико-химических свойств этих материалов.

Огнестойкие ткани

Значительная часть огнестойких тканей формируется из волокон, изготовленных из следующих исходных веществ: кварц, кремнезем, базальт, арамид.

Кварцевые ткани

Волокна из кварца производятся из расплавленных потоков кварцевого стекла при температуре 2300 °C. Сверхчистые кварцевые волокна содержат не менее 99,95% диоксида кремния (SiO_2) и получают их методом сухого формования из раствора жидкого стекла. Эти волокна безопасны для человека и сохраняют свою структуру, и свойства в течение долгого времени при температурах до 1200 °C.

Сверхчистые кварцевые волокна активно применяются в аэрокосмической отрасли, производстве специальной одежды благодаря высокой термостойкости, прочности и стойкости к химикатам.

Кремнезёмные ткани

Термостойкая ткань на основе кремнезема изготавливается путем переплетения кремнеземных волокон с использованием полотняного или сатинового метода. Она представляет собой экологически чистый, многофункциональный материал, обладающий термозащитными свойствами. В качестве сырья используется кварцевый песок, содержащий 90-99,5% кремнезема [3]. Этот минерал включает двуокись кремния с температурой плавления более 1700 °С.

У кремнеземной ткани высокие защитные, теплоизоляционные, и диэлектрические характеристики, выдерживающие высокие температуры с коэффициентом теплопроводности равным ~ 0,22 Вт/м·К. Качество такого материала определяется отсутствием посторонних примесей.

У тканей на основе кремнезема более низкое содержание оксида кремния (не более 95%) по сравнению с кварцевыми тканями. Они защищают от огня до температур 1000 °С, а кратковременные воздействия могут достигать до 1200 °С [4]. Материал безопасен для здоровья и широко используется для фильтров и огнеупорных покрытий. Для повышения таких свойств, как эластичность и водонепроницаемая защита, ткани подвергаются различным обработкам и пропиткам.

Базальтовая ткань состоит из нитей базальта, которые соединяются методом ровинга в жгут. Изготавливается путем полотняного плетения по типологии «сатин» с прошитой кромкой на замасливателе, совместимом с эпоксидной смолой. Предназначена ткань для выполнения работ по термической изоляции, создания теплоизоляционных барьеров, защищающих поверхности с высокой температурой, формирования огнезащитного рубежа вблизи каминов, печей и иных пожароопасных объектов.

Исходным сырьем для производства вышеуказанной продукции служит магматическая горная порода – базальт. Волокна на основе базальта и изготовленная из них ткань характеризуются следующими показателями:

- высокоуровневыми как химическими, так и физико-механическими данными;
- сверхстойкостью в агрессивной среде;
- стабильностью вне зависимости от продолжительности и условий эксплуатации;
- высокой степенью адгезии к основаниям различных типов.

Области применения и предназначение базальтовой ткани:

- тепловая изоляция объектов, оборудования, конструкционных узлов, оказывающих термическое воздействие на внешнюю среду, выполнение изоляционных тепловых работ обеспечивающих безопасное функционирование печей, трубопроводов и рекуператоров;
- для изготовления фильтрующего слоя, удерживающего вредные вещества отходящих газов;
- в качестве фильтрующего слоя сточных вод;

- как элемент при изготовлении композиционных материалов;
- в роли дополнительного слоя армировки, что придает конструкциям каркасного типа добавочную прочность и устойчивость.

Достоинства и преимущества группы тканей на основе базальта:

- безупречная экологическая чистота. Отсутствие каких-либо веществ относящихся к канцерогенам;
- идеальный материал для теплоизоляции;
- высокая степень термостойкости, неподверженность к процессу горения, температурный порог непрерывного применения – до 700 °C;
- минимальный срок службы от 50 лет, гарантированная долговременность использования;
- стабильная устойчивость при воздействии щелочной или среды;
- невосприимчивость к воздействию вибрации, что делает возможным применение данной продукции при изоляции турбин;
- материал не подвержен деструктивным процессам, связанным с действием микроорганизмов или плесени.

Арамидные ткани

Арамид представляет собой высокомолекулярное химическое волокно, которое состоит из бензольных колец, объединенных в длинные молекулярные цепи с помощью прочных амидных связей, которые и обеспечивают уникальные свойства: малую плотность, высочайшую прочность, устойчивость к возгоранию и воздействию высоких температур, химическую стойкость и экологическую безопасность.

Арамидное волокно может поставляться в виде порошка, пряжи и тканей [4]. Ткань из данного волокна легкая, что делает ее идеальным материалом для пошива спецодежды.

Теплозащитные покрытия интумесцентного типа

Теплозащитные интумесцентные (вспучивающиеся) покрытия, обладающие свойством вспучивания, являются сложными многокомпонентными композициями. Для того чтобы обеспечить высокую эффективность их вспенивания, крайне важно не только наличие определенных функциональных элементов, но и правильное соотношение их концентраций.

Чтобы сформировать надежный слой пенококса, необходимо включение компонентов, ответственных за полимеризацию. В этом процессе используются полимерные вещества в виде различных водных дисперсий, а также неорганические соединения на основе синтетических смол.

Образующийся в результате химических реакций разложения компонентов пенококсовый слой блокирует проникновение теплового потока от огня к защищаемой поверхности конструкции и предохраняет ее от быстрого нагрева.

Интумесцентные материалы наносятся на защищаемую поверхность в виде тонкослойных покрытий.

Образование прочного «скелета» пенококса требует использования карбонизирующихся соединений – источников углерода, в качестве которых в классических составах применяется пентаэритрит и др.

Фосфорсодержащие соединения, обычно полифосфаты аммония, выполняют функцию катализатора процесса коксообразования. Для получения высокопористого пенококсового слоя используются соединения, выполняющие задачу газообразования (меламин, мочевина и др.).

Для повышения эффективности процесса, который тормозит распространение теплового потока, в состав вводят различные виды водосодержащих наполнителей (гидроксиды алюминия и магния, борат цинка), галогеносодержащие добавки, например, хлорпарафин, выполняющий одновременно функцию вспенивания и карбонизатора.

Минеральные наполнители (каолин, мраморная крошка, слюда и др.) позволяют повысить термостойкость и химическую стойкость, улучшить огнестойкость [4].

Особенностью интумесцентной системы является зависимость процесса коксообразования от качественного и количественного содержания одновременно действующих ингредиентов.

Формирование вспучивающегося слоя, обладающего оптимальными защитными характеристиками при воздействии высоких температур, в значительной мере зависит от соотношения количеств компонентов, состава огнезащитной пропитки, а также от химических реакций, происходящих в процессе образования пенококса.

Наиболее распространенный состав терморасширяющейся системы на основе органики и водной основе представлен в таблице 1 [5].

Таблица 1 – Состав современных огнезащитных покрытий

№ п/п	Компонент	Концентрация, % масс., компонентов состава	
		на органике	на воде
1	Растворитель	26,3	-
2	Вода	-	18,0
3	Полифосфат аммония	25,5	24,0
4	Меламин	8,5	8,0
5	Пентаэритрит	8,5	8,0
6	Смола (связующее)	10,5	25,5
7	Диоксид титана	9,5	11,5
8	Хлорированный парафин	4,5	-
9	Прочие добавки	6,7	5,0

Роль пентаэритрита (химическая формула – $C_5H_{12}O_4$ или $C(CH_2OH)_4$), представляющего собой кристаллическое тонкодисперсное химическое вещество, сводится к образованию углеродного каркаса и выделению паров воды, влияющих на скорость формирования пенококсового слоя [6].

Основная функция меламина (химическая формула $C_3H_6N_6$), как пенообразователя, заключается в выделении достаточного количества негорючих газов (аммиак, вода и углекислый газ) при его горении, которые формируют пенистую

структуру [7], обладающую хорошими теплоизолирующими свойствами.

С целью улучшения свойств герметика дополнительно в состав вводился терморасширяющийся полифосфат аммония, который представляет собой неорганическую соль фосфорной кислоты. Полифосфорная кислота при нагреве распадается с образованием летучего аммиака и паров воды, которые выполняют функцию замедлителя горения и пенообразователя, заставляющего герметик вспучиваться и образовывать слой пены [8].

Теплозащитные покрытия на основе окисленного терморасширяющегося графита

Получение высоких огнезащитных свойств материалов может быть достигнуто не только использованием химических компонентов (полифосфат аммония, полизеритрит, меламин), но и высокоуглеродистых твердых наполнителей, обладающих эффектом существенного терморасширения в твердом состоянии под воздействием температуры – окисленного терморасширяющегося графита.

Окисленный терморасширяющийся графит представляет собой химическое вещество, которое является аллотропной модификацией углерода со специфической слоистой структурой [4].

Графит является одной из самых стабильных полиморфных модификаций углерода, обладающей способностью при высокотемпературном нагреве образовывать углекислый газ и поэтому не поддерживать горение.

Слоистая структура графита позволяет внедрить в межслойное пространство атомы или молекулы другого компонента (интеркалята), в качестве которого могут быть использованы как чистые химические элементы, так и их соединения.

В процессе быстрого нагрева окисленного графита до высоких температур происходит мгновенное испарение интеркалята, вследствие чего под действием давления паров слои атомов начинают сильно расширяться, что приводит к вспучиванию графита.

Процесс вспучивания начинается уже при температуре 140...150 °C. При высокотемпературном нагреве окисленный графит в составе огнезащитного покрытия увеличивает собственный объем в сотни раз и образует толстый слой пены, которая в свою очередь предотвращает распространение огня и тепла в защищаемую поверхность [9].

Теплоизоляционные материалы аэрогельного типа

В последние годы появилось большое количество материалов аэрогельного типа. Эти материалы обладают исключительно низкой теплопроводностью и высокой огнестойкостью и широко применяются в качестве компонентов для улучшения теплофизических свойств огне- и теплозащитных композиций.

Аэрогель (лат. aeg – воздух и gelatus – замороженный) – твердый высокопористый материал, полученный в результате полного замещения жидкой фазы геля газообразной и известный как самый легкий твердый материал в мире. Аэрогели относятся к мезопористым материалам и характеризуются рядом уникальных свойств:

– высокой пористостью (до 99%) и удельной поверхностью (200...1000 м²/г);

- малым размером нанопор (1...10 нм);
- чрезвычайно низкой плотностью (1,9 кг/м³ – всего в 1,5 раза тяжелее воздуха) и теплопроводностью (0,013...0,025 Вт/(м·К));
- высокой звукопоглощающей способностью, нередко оптической прозрачностью.

Температура плавления кварцевого аэрогеля составляет до 1200 °С.

В зависимости от исходных материалов для получения жидкого геля аэрогели делятся на три группы: неорганические, органические и композитные. Наибольшее распространение получил кремнеземный аэрогель, полученный на основе диоксида кремния SiO_2 , производство которого во всем мире освоено в промышленных масштабах.

Структура аэрогеля образована наноразмерными частицами диоксида кремния размером 2...3 нм, которые формируют сложный трехмерный каркас, поры которого заполнены неподвижными молекулами воздуха.

Объем каркаса диоксида кремния составляет всего 3%, поэтому теплопередача через него очень низкая. Основную часть объема составляют нанопоры, заполненные неподвижным воздухом. Чрезвычайно низкая теплопроводность аэрогеля объясняется действием эффекта Кнудсена, заключающегося в том, что зажатые стенками каркаса молекулы воздуха находятся в неподвижном состоянии, поэтому исключается их свободное перемещение и передача тепла конвекцией.

Благодаря такой структуре кремнеземный аэрогель имеет очень низкую теплопроводность при нормальной температуре (коэффициент теплопроводности около 0,016 Вт/(м·К)), что существенно меньше даже по сравнению с воздухом (0,025 Вт/(м·К)) [10].

На основе аэрогелей создаются композиционные материалы, которые обладают механической прочностью и эластичностью при незначительном снижении теплопроводности.

Аэрогель сохраняет свои механические и теплоизоляционные свойства при нагреве до ~ 700 °С.

Методическое сопровождение испытаний

Тепловые испытания подготовленных образцов проводились на базе муфельной нагревательной печи SNOL, с помощью которой создавался тепловой поток и направлялся на фронтальную поверхность опытного образца (рис. 1).

Мощность теплового потока устанавливалась регулятором температуры, поддерживалась на заданном уровне автоматически и визуально контролировалась по электронному индикатору.

Нагрев фронтальной поверхности образца производился в основном инфракрасным излучением нагретых стенок печного пространства и частично конвективным воздушным потоком.

Для изучения зависимости температуры образца от времени теплового воздействия использовались термопанель, предназначенная для установки испытуемого образца в печное пространство и термодатчик для измерения температуры на его «холодной» стороне.



Рисунок 1 – Муфельная нагревательная печь SNOL

Термопанель служит аналогом дверцы муфельной печи и выполнена из инновационного газосиликата. Ее поверхность покрыта специальным огнеупорным материалом, созданным на основе шамотной глины и жидкого натриевого стекла, что обеспечивает теплоизоляционные свойства и долговечность. В центре термопанели предусмотрено отверстие диаметром 120 мм, предназначенное для установки испытуемого образца. Внутренняя стенка термопанели дополнена экраном в виде полированной фольги из нержавеющей стали [9], который отражает тепловой поток, оптимизируя процесс нагрева и обеспечивая равномерное распределение температуры.

В крышке под термоизоляционным слоем закрепляется термопара, которая соединяется с электронным измерителем температуры ТМ-902С, позволяющему измерять температуру с точностью ± 1 $^{\circ}\text{C}$.

Общий вид экспериментальной лабораторной установки в режиме измерения температуры на обратной («холодной») стороне нагреваемого тепловым потоком образца из термостойкого композиционного материала представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Общий вид лабораторной установки в рабочем режиме

Образцы для испытаний представляли собой композиты с многослойной структурой, состоящей из:

- фронтального слоя алюминиевой фольги, предназначенного для отражения инфракрасного излучения;
- огнестойкой кремнеземной или базальтовой ткани;
- огнезащитного и термостойкого покрытия (ОТП);
- огнестойкой кремнеземной или базальтовой ткани;
- теплоизолятора (кремнеземный аэрогель).

Алюминиевая фольга толщиной 0,05 мм фиксировалась на огнестойкой ткани kleem на основе жидкого стекла [9].

В качестве огнестойкой ткани использовались кремнеземная ткань марки КТ-11-30К и базальтовая ткань марки ТБК-100.

Теплоизоляционный слой (с тыльной «холодной» стороны) был выполнен из аэрогеля марки EVERGEL на основе стеклохолста.

В качестве связующего для компонентов огне- теплозащитного покрытия (ОТП) использовалась поливинилацетатная дисперсия (ПВАД), которая относится к группе экологически чистых полимеров.

Многослойные композиционные образцы круглой формы имели различное сочетание компонентных слоев. Для условного обозначения составляющих и последовательности их расположения в композите приняты следующие буквенные обозначения:

- АФ – алюминиевая фольга;
КТ – кремнеземная ткань;
БТ – базальтовая ткань;
ОТП – огне- и теплозащитное покрытие;
ТИ – теплоизолятор (аэрогель);
ПВАД – поливинилацетатная дисперсия.

Последовательность расположения компонентов в композиционных образцах принята в направлении теплового потока, например:

АФ – КТ – ОТП – КТ – ТИ.

Основную функцию отражения инфракрасного излучения выполняет алюминиевая фольга, которая способна отражать до 90% излучения. Так как температура плавления алюминия составляет 660 °С, то при высоких значениях тепловых потоков фольга теряет отражательную способность, что приводит к нарушению достоверности измерений. В реальных условиях для защитной одежды пожарных применяется металлизированное покрытие на основе титановых сплавов.

Необходимость использования двух слоев огнезащитной ткани вызвана тем, что таким образом формируется своеобразный пакет, в котором происходит терморасширение огнестойкого и термозащитного покрытия. В целом пакет и препятствует передаче тепловой энергии от открытого пламени к защищаемой поверхности.

Предварительные исследования теплозащитных покрытий показали, что для более эффективной тепловой защиты требуется дополнительный теплоизо-

лятор на тыльной стороне используемой кремнеземной ткани, в качестве которого и был выбран современный теплозащитный материал – аэрогель марки EVERGEL.

Для приготовления огне- и теплозащитных покрытий использовались следующие компоненты: полифосфат аммония KYLIN APP201, меламин TIAN FU, пентаэритрит технический микронизированный (ТУ 2422-038-00203803-2014), графит окисленный терморасширяющийся EG 350-50(80).

Составы опытных огнестойких покрытий представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Составы огнестойких покрытий (ОТП)

Наименование компонентов	Содержание компонентов в ОТП, %				
	Номер ОТП				
	1	2	3	4	5
Полифосфат аммония (ПФА)	11,4	16,0	24,3	–	11,3
Пентаэритрит (ПЭ)	3,1	15,0	4,0	–	3,1
Меламин (М)	11,1	10,0	14,3	–	11,0
Интеркалированный графит (ИГ)	18,8	15,0	–	31,8	18,6
Связующее	55,6	54,0	57,4	68,2	56,0

Вместе с указанными огнестойкими покрытиями испытывался противопожарный терморасширяющийся герметик «Огнеза-ГТ» от официального торгового представителя ООО «Огнеза».

На вырезанные из огнестойкой ткани заготовки Ø 100 мм наносился огнезащитный состав, после чего на «горячую» фронтальную сторону термостойким kleem фиксировалась алюминиевая фольга.

Подготовка огнезащитного состава заключалась в следующей последовательности:

- взвешивание компонентов, представляющих собой тонкодисперсные порошки, на электронных весах с точностью до 0,01 г;
- тщательное перемешивание их в сухом виде с помощью миксера;
- добавление в смесь необходимого количества связующего компонента;
- окончательное перемешивание огнезащитного состава для получения консистенции требуемой вязкости.

Подготовленный пакет с огнезащитным составом поворгался сушке при температуре 60 °C в течение 1 часа.

В термопанель устанавливался образец и теплоизолятор, на «холодной» поверхности которого крепился термодатчик. Затем собранный образец фиксировался на термопанель крышкой. Термодатчик подключался к электронному измерителю температуры модели ТМ-902С.

Термопанель устанавливалась в муфельную печь, нагретую предварительно до требуемой температуры, включались секундомер для отсчета продолжительности нагрева и измеритель температуры. Данные измерений заносились в таблицу наблюдений, по которым с помощью программы Excel выполнены графические зависимости в координатах **температура – время**.

Предварительные исследования теплозащитных покрытий показали, что для более эффективной тепловой защиты требуется дополнительный теплоизолят на тыльной стороне используемой кремнеземной ткани, в качестве которого и был выбран современный теплозащитный материал аэрогельного типа.

Результаты исследования теплозащитных свойств многослойных эластичных композитов

Ниже представлены результаты тепловых испытаний восьми партий образцов. Каждая партия имела свою индивидуальную укладку слоев. Опытные образцы подвергались испытаниям при температурах нагрева 600 °C, 700 °C и 800 °C.

Партия № 1: состав образцов: АФ – КТ – ОТП – КТ – ТИ (рис. 3).

Толщина покрытия – 0,15 мм;

Толщина кремнеземной ткани (КТ) – 0,3 мм;

Толщина теплоизолятора (ТИ) – 5 мм;

Температура нагрева – 600 °C, 700 °C, 800 °C;

Связующее – ПВАД;

Состав покрытия – ОТП № 1.

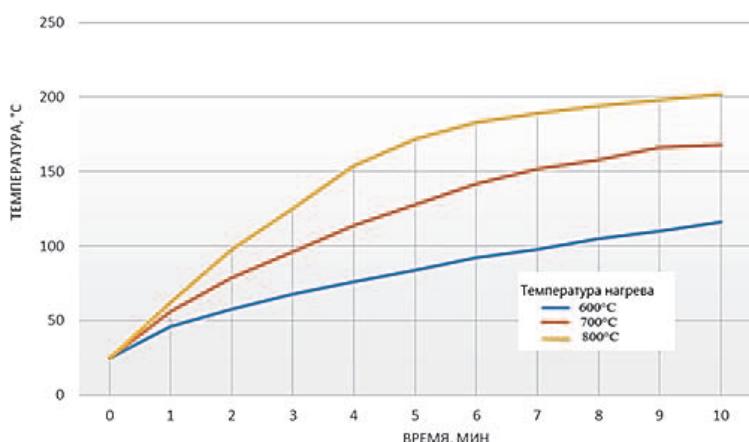


Рисунок 3 – Влияние температуры на теплозащитные свойства покрытия на кремнеземной ткани

Партия № 2: состав образцов: АФ – БТ – ОТП – БТ – ТИ (рис. 4).

Толщина покрытия – 0,15 мм;

Толщина базальтовой ткани (БТ) – 0,2 мм;

Толщина теплоизолятора (ТИ) – 5 мм;

Температура нагрева – 600 °C, 700 °C, 800 °C;

Связующее – ПВАД;

Состав покрытия – ОТП № 1.

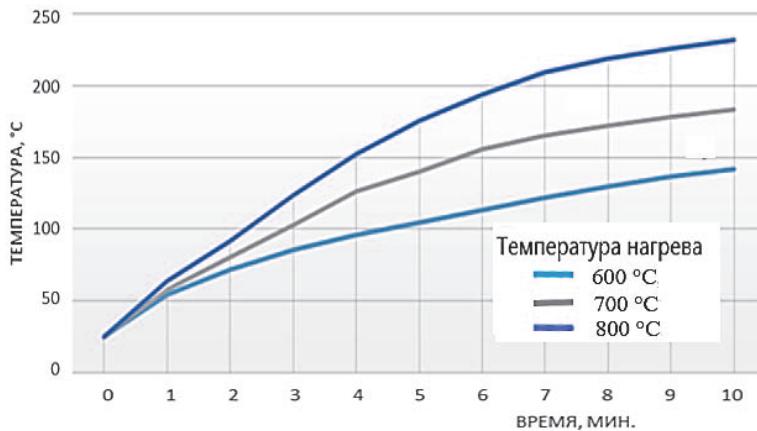


Рисунок 4 – Влияние температуры на теплозащитные свойства покрытия на базальтовой ткани

Партия № 3: состав образцов: АФ – КТ – ОТП – КТ – ТИ (рис. 5).

Толщина покрытия – 0,15 мм; 0,5мм;

Толщина кремнеземной ткани (КТ) – 0,3 мм;

Толщина теплоизолятора (ТИ) – 5 мм;

Температура нагрева – 600 °C;

Связующее – ПАВД;

Состав покрытия – ОТП № 2.

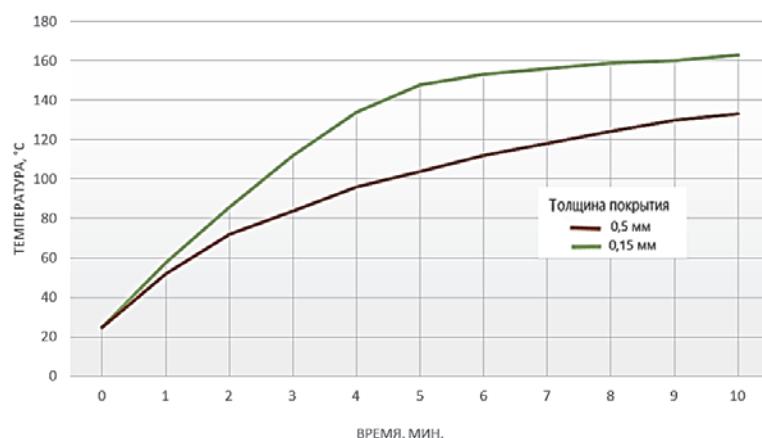


Рисунок 5 – Влияние толщины покрытия на теплозащитные свойства

Партия № 4: состав образцов: АФ – КТ – ОТП – АФ – ОТП – КТ – ТИ (рис. 6).

Толщина одного слоя покрытия – 0,15 мм;

Толщина кремнеземной ткани (КТ) – 0,3 мм;

Толщина теплоизолятора (ТИ) – 5 мм;

Температура нагрева – 600 °C, 700 °C, 800 °C;

Связующее – ПВАД;

Состав покрытия – ОТП № 2.

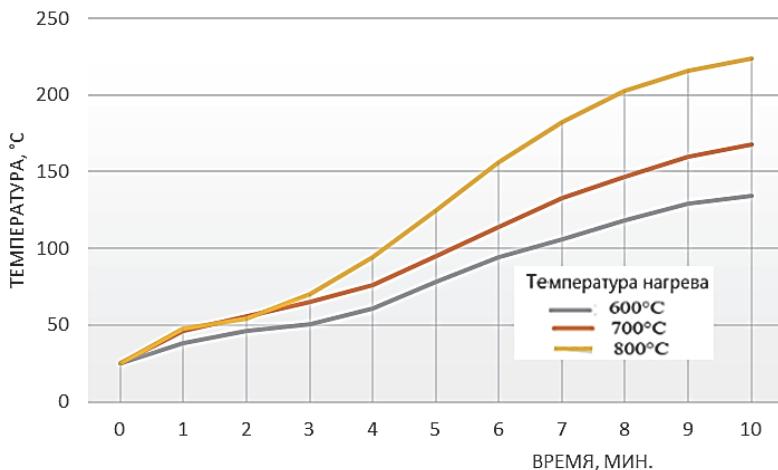


Рисунок 6 – Влияние температуры на теплозащитные свойства покрытия на кремнеземной ткани

Партия № 5: состав образцов: АФ – КТ – ОТП – КТ – ТИ (рис. 7).

Толщина покрытия – 0,3 мм;

Толщина кремнеземной ткани (КТ) – 0,3 мм;

Толщина теплоизолятора (ТИ) – 5 мм;

Температура нагрева – 600 °C;

Связующее – ПВАД;

Состав покрытия – ОТП № 3, ОТП № 4, ОТП № 5.

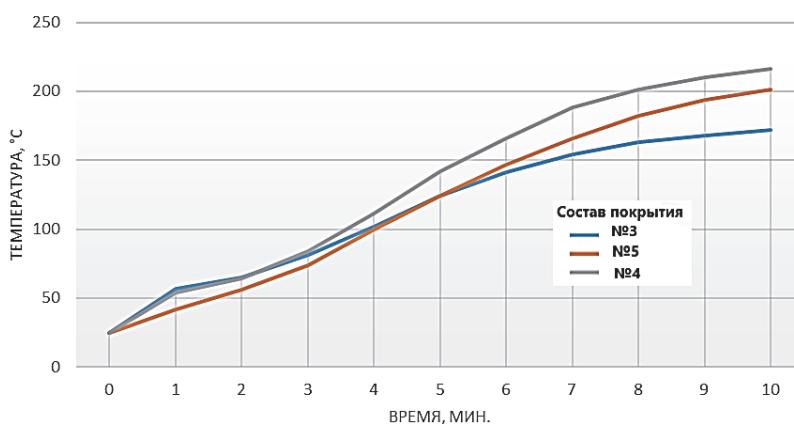


Рисунок 7 – Влияние состава покрытия на теплозащитные свойства ткани

Партия № 6: состав образцов: АФ – КТ – ТИ – КТ – ТИ (рис. 8).

Толщина кремнеземной ткани (КТ) – 0,3 мм;

Толщина теплоизолятора (ТИ) – 5 мм;

Температура нагрева – 600 °C, 700 °C, 800 °C.
Состав покрытия – ОТП (ТИ).

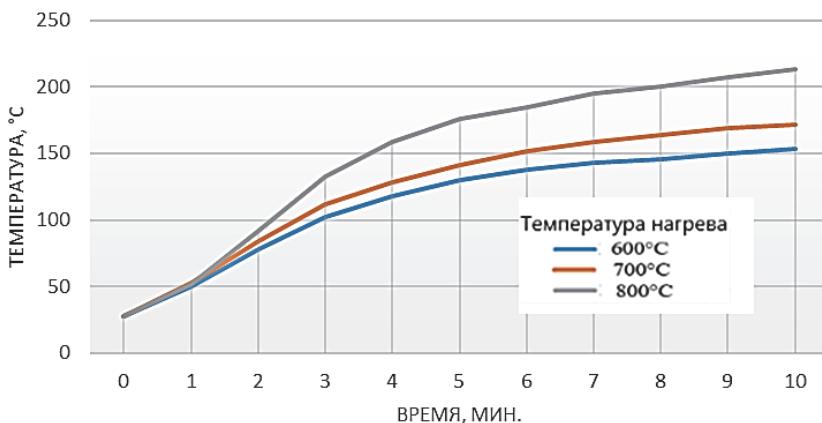


Рисунок 8 – Зависимость теплозащитных свойств композита с ОТП аэрогельного типа толщиной 5 мм от температуры испытаний

Партия № 7: состав образцов: АФ – КТ – ТИ – ТИ – КТ – ТИ (рис. 9).

Толщина кремнеземной ткани (КТ) – 0,3 мм;

Толщина теплоизолятора (ТИ) – 5 мм;

Температура нагрева – 600 °C, 700 °C, 800 °C.

Состав покрытия: ОТП (ТИ-ТИ).

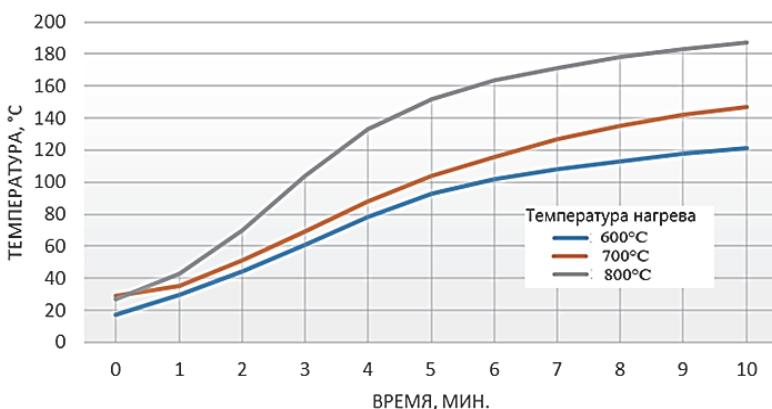


Рисунок 9 – Зависимость теплозащитных свойств композита с ОТП аэрогельного типа толщиной 10 мм от температуры испытаний

Партия № 8: состав образцов: АФ – КТ – ОТП – КТ – ТИ (рис. 10).

Толщина покрытия – 0,3 мм;

Толщина кремнеземной ткани (КТ) – 0,3 мм;

Толщина теплоизолятора (ТИ) – 5 мм;

Температура нагрева – 600 °C;

Связующее опытного покрытия – ПВАД
Состав покрытия – ОТП № 2, ОТП («Огнеза-ГТ»).

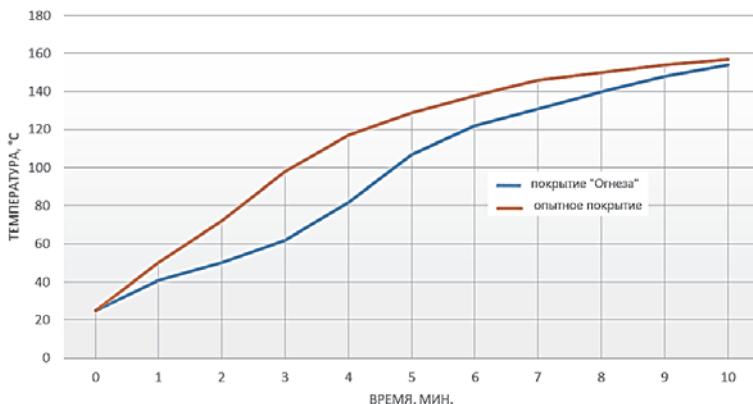


Рисунок 10 – Теплозащитные свойства опытного покрытия ОТП № 2 и ОТП («Огнеза-ГТ»)

Анализ результатов исследований

Для сравнительного анализа результатов испытаний различных образцов принята интенсивность нарастания и максимальная температура на «холодной» стороне, которая фиксируется в конце десятой минуты испытаний. Как правило, у всех образцов в течение определенного периода времени происходит стабилизация или незначительный рост температуры, величина которой находится на разном уровне. Поэтому сравнительная оценка теплозащитных свойств рассматривалась на одинаковом 10-минутном временном интервале.

Основной вклад в исходящий от нагревателя печи тепловой поток вносит инфракрасное излучение, поэтому для защиты от него использовался теплоотражающий слой в виде алюминиевой фольги.

Предварительные опыты показали, что без металлизированного слоя на поверхности образца наблюдается интенсивное нарастание температуры в течение 2-3 минут до 200 °C и выше, поэтому фольга использовалась на всех испытываемых образцах. Эффективность отражающих свойств фольги снижалась при температурах 800 °C из-за ее деформации и частичного оплавления, которая вносила некоторую погрешность в абсолютные значения температуры, но оставалась для всех образцов величиной постоянной.

Результаты испытаний образцов, имеющих различный химический состав огне- и теплозащитного покрытия (покрытия с интумесцентными свойствами, партия № 5, рис. 7), показали, что лучшую теплостойкость продемонстрировал классический триадный состав (на основе полифосфата аммония, пентаэритрита и меламина). При этом выбор количественного соотношения компонентов в составе был сделан на основе анализа данных источников литературы сторонних исследователей. Проверка эффективности теплозащиты различных пропорций составов указанной триады в данной работе не изучалась.

Огне- и теплозащитное покрытие (ОТП № 4), содержащее только один

вспучивающийся компонент – интеркалированный графит, хотя и имеет существенно более высокую терморасширяемость при нагревании (кратность до 150 °С), обнаружило меньшую теплостойкость по сравнению с покрытием классического триадного состава (рис. 7). Это можно объяснить более высокими значениями (на порядок) коэффициента теплопроводности терморасширенного графита по сравнению с соответствующим коэффициентом (0,03-0,1 Вт/м·К) для вспученного пенококсового слоя покрытия классического триадного состава. Изучение совместного использования двух терморасширяющихся составов (ОТП №5, рис.7) показало промежуточный результат по теплостойкости, что объяснимо спецификой структуры формирующегося вспученного слоя. Так, терморасширяющийся графит «навязывает» пенококсу свою структуру, подавляя при этом вспенивание органоfosфатного состава.

Влиянием типа огнезащитной ткани (КТ или БТ) на теплозащитные свойства композиционного материала можно пренебречь, поскольку основное их назначение – защита от открытого огня. Здесь преимущество за кремнеземными тканями, поскольку в проведенных экспериментах при температуре испытаний 800 °С происходило обугливание базальтовой ткани.

Результаты сравнительных испытаний ОТП № 2 и ОТП на основе огнезащитного герметика «Огнеза-ГТ» показали практически одинаковые конечные результаты, за исключением интенсивности нагрева на начальном этапе, которая для ОТП № 2 существенно выше (партия № 8, рис. 10).

Композитные образцы партий № 6 и № 7 (рис. 8, 9), где в качестве ОТП (теплоизоляции между слоями ткани) использовался аэрогель разной толщины, показали преимущественные теплоизоляционные свойства и, тем самым можно считать, что они являются более предпочтительными для изготовления индивидуальных средств защиты личного состава и техники при пожарах. Это объяснимо, учитывая технологические трудности изготовления монолитного композита со сложным многослойным терморасширяющимся теплоизоляционным покрытием, к тому же являющимся «одноразовым» (в отличие от аэрогельного) при применении в условиях высоких температур.

Выводы

Таким образом, из представленной исследованной выборки композиций различного состава преимуществом по теплоизоляционным свойствам обладают многослойные покрытия с аэрогельной теплоизоляцией. Они более предпочтительны для их возможного дальнейшего использования при изготовлении средств защиты личного состава и техники в условиях пожаров. Для изучения оптимизации составов и технических характеристик композиционных покрытий требуются дополнительные системные исследования.

Литература

1. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, 2013. 544 с.

2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 8. С. 7-17.
3. Кремнеземная ткань: характеристики и применение [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://izol.pro/stati/kremnezemnaya-tkan-ee-harakteristiki-tipy-i-primenenie> (дата обращения: 10.01.2025).
4. Абразумов В.В., Фролов С.В., Токарева О.В. Изучение возможностей применения композиционных покрытий с интеркалированным графитом на кремнеземной основе для средств защиты при пожарах // Информационно-технологический вестник. 2024. № 1(39). С. 144-157.
5. Сабирзянова Р.Н., Красина И.В. Современные тенденции в производстве огнестойких текстильных материалов // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 8. С. 75-79.
6. Хомко Е.В., Кузина Н.Г., Машляковский Л. Н. Авторское свидетельство № 1513003 А1 СССР, МПК C09D 3/66. Композиция для получения лаковых покрытий. 08.05.1987.
7. Борат цинка [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://teh-imprex.ru/primenenie/primenenie-borata-cinka> (дата обращения: 13.01.2025).
8. Абразумов В.В., Фролов С.В., Зюзина А.А. Разработка огнезащитного герметика на основе окисленного графита // Надежность и долговечность машин и механизмов. Сборник материалов XIV Всероссийской научно-практической конференции. 2023. С. 3-8.
9. Абразумов В.В., Фролов С.В. Разработка огне- теплозащитного материала для противопожарных экранов с повышенным пределом огнестойкости // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2024. С. 70-76.
10. Абразумов В.В., Фролов С.В., Токарева О.В., Прохоров В.Ю. Перспективные огне- и теплозащитные материалы аэрогельного типа // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2022. Том 2. С. 10-13.

УДК 669.017.3

Влияние температуры отпуска на параметры кристаллической структуры и коррозионную стойкость крепежа из стали 03Х11Н8М2Ф (ДИ 52) и α -железа (0,008% С)

Карэн Юрьевич Шахназаров, доктор технических наук,
профессор кафедры материаловедения и технологии
художественных изделий,

Артур Русланович Рафиков, ассистент кафедры
материаловедения и технологии художественных изделий,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,
г. Санкт-Петербург

В данной работе исследовано влияние температуры отпуска на кристаллическую структуру и коррозионную стойкость крепежных изделий из стали 03Х11Н8М2Ф (ДИ 52) и α -железа (0,008% С). Проведен анализ кристаллической структуры методом рентгеновской дифракции и коррозионные испытания в растворах HCl. Результаты исследования показали, что структура кристаллической решетки и количество остаточного austенита в стали 03Х11Н8М2Ф существенно изменяются в зависимости от температуры отпуска, достигая минимума при температуре около 210 °С, что соответствует максимальной коррозионной стойкости.

Температура отпуска, кристаллическая структура, коррозионная стойкость, сталь, α -железо.

**Effect of tempering temperature on crystal structure parameters
and corrosion resistance of fasteners made
of 03Х11Н8М2Ф steel (DI 52) and α -iron (0,008% C)**

Karen Yurievich Shakhnazarov, Doctor of Technical Sciences,
Professor of Materials Science and Technology of Artistic Products,

Artur Ruslanovich Rafikov, assistant of Materials Science
and Technology of Artistic Products,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg

In this paper the influence of tempering temperature on the crystal structure and corrosion resistance of fasteners made of 03Х11Н8М2Ф steel (DI 52) and α -iron (0,008% С) is investigated. The crystal structure was analysed by X-ray diffraction and corrosion tests in HCl solutions were carried out. The results of the study showed that the lattice structure and the amount of residual austenite in 03Х11Н8М2Ф steel change significantly depending on the tempering temperature, reaching a minimum at

about 210 °C, which corresponds to the maximum corrosion resistance.

Tempering temperature, crystal structure, corrosion resistance, steel, α -iron.

Введение

В связи с особыми условиями эксплуатации крепежных деталей в морской технике, необходим регулярный контроль в процессе их работы ввиду риска выхода из строя последних, что может повлечь проведение плановых ремонтов морской техники [1, 4].

Крепеж из углеродистых и экономнолегированных сталей характеризуется достаточным уровнем механических свойств, однако их применение ограничено из-за низкой коррозионной стойкости в морской воде, а также низким порогом хладноломкости [21, 26].

Коррозионностойкие мартенситостареющие стали являются перспективным материалом для изготовления крепежных изделий, одной из таких сталей может являться сталь 03Х11Н8М2Ф (ДИ 52ВД), которая обеспечивает необходимый уровень механических свойств, а также является стойкой к коррозионному растрескиванию под напряжением и межкристаллитной коррозии [17, 25].

Совместное исследование тонкой структуры стали и железа (0,008% С) обусловлено тем, что в стали 03Х11Н8М2Ф четыре пятых атомов железа. Их вклад в формирование свойств низколегированных сталей установлен экспериментально [13, 24].

Цель работы

Провести совместное рентгеноструктурное исследование железа (0,008% С) и стали 03Х11Н8М2Ф для оценки влияние атомов железа, которых в стали большинство (до 80%), на степень перераспределения атомов легирующих элементов при термической обработке.

Материал и методика исследования

Химический состав исследуемой стали представлен в таблице 1. Коррозионные испытания и рентгеноструктурный анализ стали (03Х11Н8М2Ф) и α -железа проводились после закалки от 950 °C и 1050 °C и отпуска в диапазоне от 100 °C до 290 °C через каждые 40 °C. Экспериментальные данные представлены в таблицах 2 и 3 [7, 9].

Таблица 1 – Химический состав исследуемой стали [2, 5]

Содержание элементов, % (масс)											
C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	V	Mo	Cu	W	Ti
0,018	0,36	0,26	0,004	0,008	8,30	11,60	0,10	2,47	0,08	0,03	0,12

Результаты эксперимента

Таблица 2 – Параметры тонкой структуры стали 03Х11Н8М2Ф в зависимости от температуры отпуска [3, 19]

N п/п	Режим термической обработки	B_{110} , град	B_{220} , град	a , А°.	$A_{осм}$, %	V , мм/год
1	Закалка 950 °С, вода.	0,176	0,393	2,8767	34,1	0,306
2		0,195	0,329	2,8761	28,9	2,027
3	Закалка 950 °С, вода, Отпуск 100 °С, 4 часа.	0,178	0,402	2,8775	28,5	0,316
4		0,202	0,420	2,8775	26,3	0,311
5	Закалка 950 °С, вода, Отпуск 140 °С, 4 часа.	0,180	0,406	2,8765	35,9	1,116
6		0,177	0,377	2,8766	32,3	0,230
7	Закалка 950 °С, вода, Отпуск 180 °С, 4 часа.	0,182	0,388	2,8754	28,9	0,618
8		0,188	0,446	2,8761	33,7	0,235
9	Закалка 950 °С, вода,	0,181	0,346	2,8712	20,8	0,004
10	Отпуск 210 °С, 4 часа.	0,214	0,428	2,8755	23,7	0,007
11	Закалка 950 °С, вода, Отпуск 250 °С, 4 часа.	0,199	0,389	2,8780	6,61	0,004
12		0,178	0,345	2,8769	12,2	0,093
13	Закалка 950 °С, вода, Отпуск 290 °С, 4 часа.	0,221	0,387	2,8746	27,1	0,001
14		0,188	0,384	2,8762	18,8	0,003

Таблица 3 – Параметры тонкой структуры железа (0,008%) в зависимости от температуры отпуска [10, 16]

N п/п	Режим термической обработки	B_{110} , град	B_{220} , град	a , А°.	V , мм/год
1	Закалка 1050 °С, вода.	0,132	0,293	2,8698	0,331
2		0,171	0,333	2,8655	1,143
3	Закалка 1050 °С, вода, отпуск 100 °С, 4 часа.	0,176	0,309	2,8712	0,314
4		0,175	0,357	2,8686	0,430
5	Закалка 1050 °С, вода, отпуск 140 °С, 4 часа.	0,146	0,282	2,8677	0,204
6		0,171	0,263	2,8682	0,274
7	Закалка 1050 °С, вода, отпуск 180 °С, 4 часа.	0,148	0,348	2,8664	0,318
8		0,144	0,314	2,8671	0,239
9	Закалка 1050 °С, вода,	0,166	0,344	2,8638	0,407

N п/п	Режим термической обработки	B_{110} , град	B_{220} , град	$a, \text{ \AA}$	$V, \text{ мм/год}$
10	отпуск 210 °C, 4 часа.	0,161	0,320	2,8667	0,340
11	Закалка 1050 °C, вода, отпуск 250 °C, 4 часа.	0,159	0,326	2,8636	0,237
12		0,153	0,344	2,8647	0,303
13	Закалка 1050 °C, вода, отпуск 290 °C, 4 часа.	0,213	0,327	2,8680	0,389
14		0,154	0,348	2,8680	0,649

Анализ данных таблиц 2 и 3 показывает, что параметры кристаллической структуры в двух параллельных экспериментах имеют соизмеримые величины. При оценке влияния температуры отпуска на эти параметры использовалось их усредненное значение.

По мере увеличения $T_{\text{отп}}$ параметр кристаллической решетки стали 03Х11Н8М2Ф и α -железа изменяется неравномерно (Рисунки 1 и 2). В обоих случаях наблюдается четко выраженный минимум при температуре отпуска более 200 °C [2]. Для стали 03Х11Н8М2Ф минимальное значение параметра решетки соответствует температуре 210 °C. Кроме того, эта зависимость имеет два максимума при $T_{\text{отп}}$ соответственно 100 °C и 250 °C [5, 20]. В свою очередь, для α -железа минимум соответствует 250 °C, а единственный максимум наблюдается, аналогично стали, при 100 °C [11, 14].

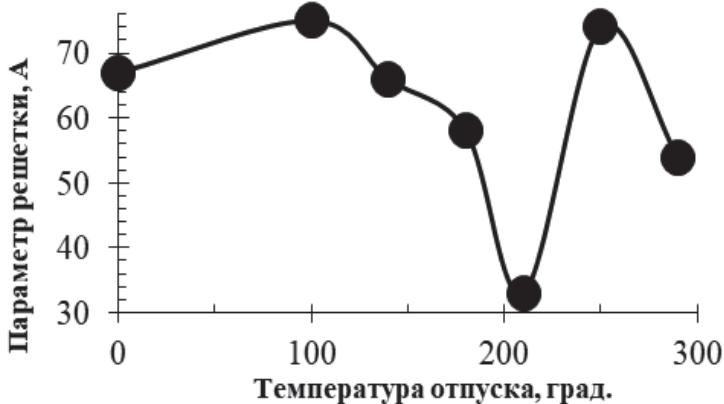


Рисунок 1 – Зависимость параметра кристаллической решетки α -фазы от температуры отпуска для стали 03Х11Н8М2Ф
составлено авторами

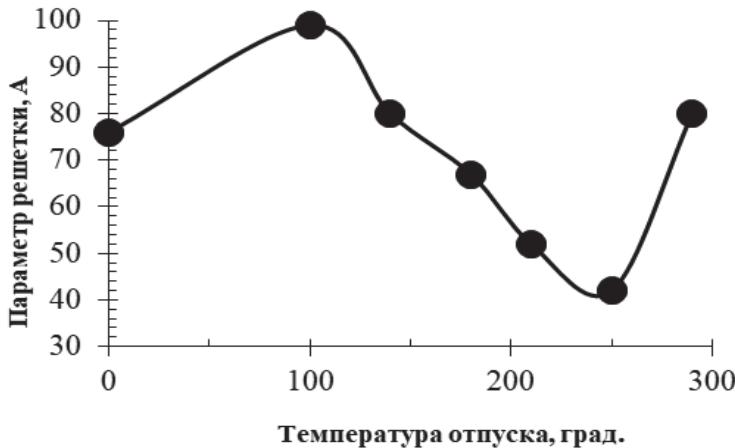


Рисунок 2 – Зависимость параметра кристаллической решетки от температуры отпуска для α -железа
составлено авторами

Изменение температуры отпуска также оказывает влияние на количество остаточного аустенита, только для стали 03Х11Н8М2Ф, относительную ширину профиля рентгеновских линий, ответственных за микронапряжения и на скорость коррозии [23, 12].

Зависимость содержания остаточного аустенита от $T_{\text{отп}}$ (Рисунок 3) содержит два минимума: при 100 и 250 °С. Содержание остаточного аустенита при 250 °С (9,42%) соответствует второму максимуму значения параметра решетки α -фазы стали 03Х11Н8М2Ф (Рисунок 1).

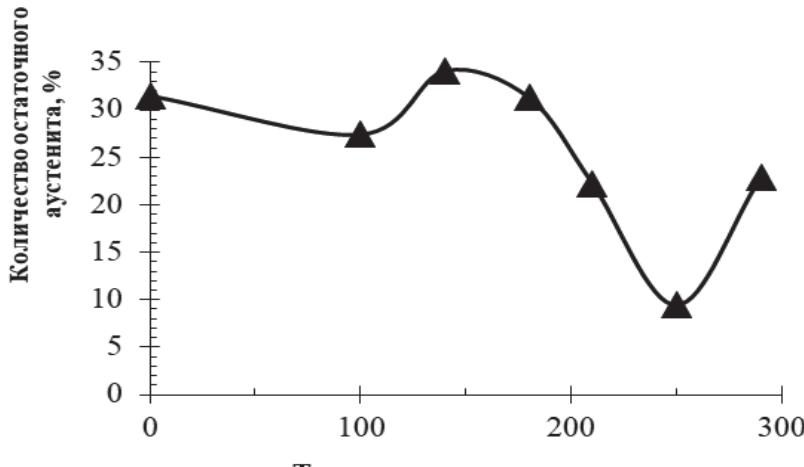


Рисунок 3 – Зависимость количества остаточного аустенита от температуры отпуска, сталь 03Х11Н8М2Ф
составлено авторами

Относительная полуширина рентгеновских линий, ответственных за мик-

ронапряжения с ростом температуры отпуска изменяется по качественно единой схеме, как для стали 03Х11Н8М2Ф, так и для α -железа [22, 15] (Рисунки 4 и 5).

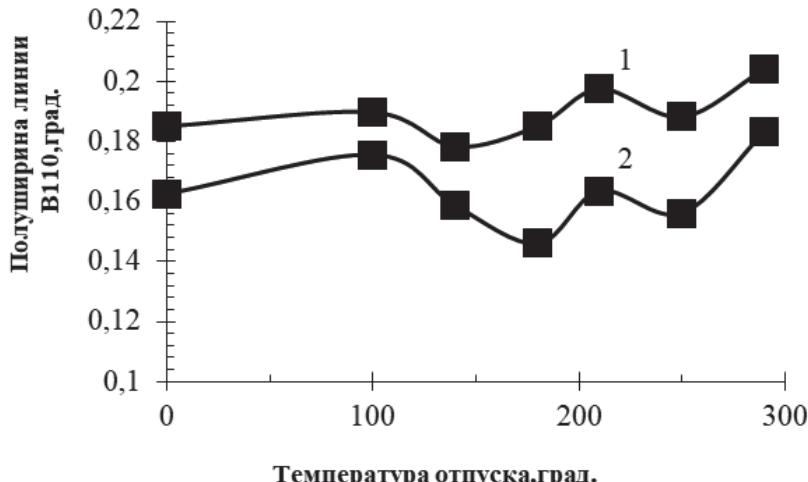


Рисунок 4 – Зависимость полуширины рентгеновской линии B_{110} от температуры отпуска, 1 – сталь 03Х11Н8М2Ф; 2 – α -железо
составлено авторами

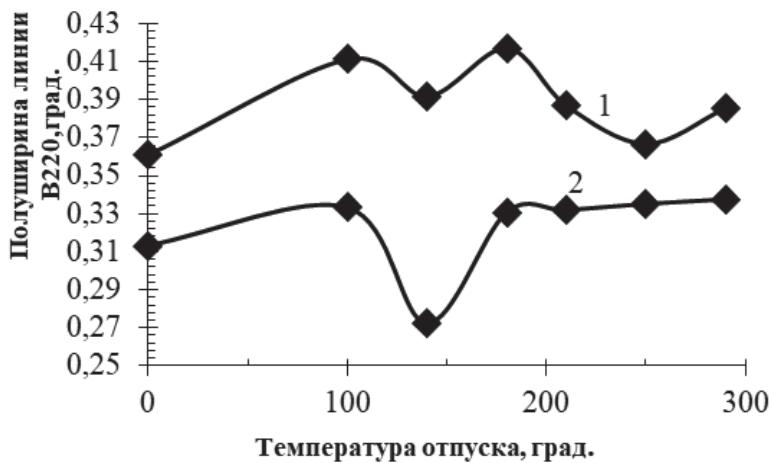


Рисунок 5 – Зависимость полуширины рентгеновской линии B_{220} от температуры отпуска 1 – сталь 03Х11Н8М2Ф; 2 – α -железо
составлено авторами

В целом, рост температуры отпуска оказывает незначительное влияние на относительное уширение рентгеновских пиков. Этот факт показывает, что проведенная термическая обработка не вызывает значительной неоднородной деформации кристаллитов [27, 6].

Независимо от других факторов скорость коррозии стали при температуре отпуска 180 °С резко снижается. Скорость коррозии по мере увеличения температуры отпуска снижается как для стали 03Х11Н8М2Ф, так и для α -железа.

Анализ кривых, представленных на рисунке 6, демонстрирует четко выраженные экстремумы скоростей коррозии как для стали 03Х11Н8М2Ф, так и для α -железа.

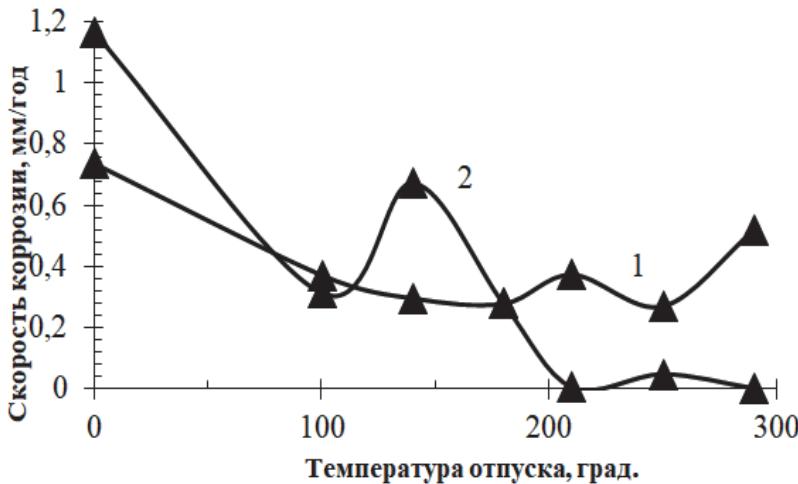


Рисунок 6 – Зависимость скорости коррозии от температуры отпуска,
1 – α -железо; 2 – сталь 03Х11Н8М2Ф
составлено авторами

Заключение

Наблюдается корреляция зависимости коррозионной стойкости стали 03Х11Н8М2Ф от температуры отпуска с зависимостью содержания остаточного аустенита от температуры отпуска. Сталь 03Х11Н8М2Ф является стойкой ($V = 0,006$ мм/год) в 0,1 М растворе HCl после отпуска при температуре 210 °С и выше.

Для стали 03Х11Н8М2Ф и α -железа наблюдается соответствие минимальных значений параметра кристаллической решетки максимальной коррозионной стойкости после отпуска 210 и 250 °С. Это указывает на то, что оптимальные значения параметров кристаллической решетки могут играть важную роль в обеспечении высоких антакоррозионных характеристик материалов, что особенно актуально для применения в условиях агрессивных сред.

Независимо от предшествующей закалки, максимальное значение параметра кристаллической решетки наблюдается при температуре отпуска 100 °С как для стали 03Х11Н8М2Ф. Это явление отмечено также для α -железа, что свидетельствует о схожести физических процессов, происходящих в этих материалах при данной температуре.

Заметной связи между изменениями относительной полуширины рентгеновских линий, ответственных за микроискажения, и скоростью коррозии стали

03Х11Н8М2Ф и α -железа не наблюдается. Следовательно, максимум скорости коррозии стали 03Х11Н8М2Ф не связан с неоднородностью деформаций в пределах зерна. Таким образом, факторы, влияющие на коррозионные свойства этого сплава, следует изучать с учетом других механических и химических характеристик.

Литература

1. Alyami S.H. et al. Impact of location and insulation material on energy performance of residential buildings as per Saudi Building Code (SBC) 601/602 in Saudi Arabia // Materials. 2022. Vol. 15. № 24. P. 9079.
2. Biondini F. et al. Life Cycle of Structures and Infrastructure Systems. CRC Press, Taylor & Francis Group. 2023. P. 293.
3. Cao A. et al. Study on stress corrosion properties of 1Cr17Ni2 stainless steel // Advances in Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 2022. № 1. P. 2435238.
4. Daniel E.F. et al. Insights into the characteristics of corrosion products formed on the contact and exposed regions of C1045 steel bolt and nut fasteners exposed to aqueous chloride environments // Journal of Materials Science & Technology. 2023. Vol. 135. P. 250-264.
5. Gong C., Frangopol D.M. Time variant hull girder reliability considering spatial dependence of corrosion growth, geometric and material properties // Reliability Engineering & System Safety. 2020. Vol. 193. P. 106612.
6. GUO Q. et al. Effect of high temperature ageing on microstructure and creep properties of S31042 heat resistant steel // Acta Metall Sin. 2020. Vol. 57. № 1. P. 82-94.
7. Hang P. et al. Effect of Heat Treatment on Crevice Corrosion Behavior of 304 Stainless Steel Clad Plate in Seawater Environment // Materials. 2023. Vol. 16. № 11. P. 3952.
8. Huang J. et al. A comprehensive review of loosening detection methods for threaded fasteners // Mechanical Systems and Signal Processing. 2022. Vol. 168. P. 108652.
9. Kostina M.V. et al. High Strength 05Х16Н5АБ Nitrogen Stainless Steel Fasteners: Potential for Import Substitution // Russian Engineering Research. 2023. Vol. 43. № 5. P. 545-551.
10. Lachowicz M.B., Lachowicz M.M. Influence of corrosion on fatigue of the fastening bolts // Materials. 2021. Vol. 14. № 6. P. 1485.
11. Larché N. et al. Crevice Corrosion of High Grade Stainless Steels in Seawater: A Comparison Between Temperate and Tropical Locations // AMPP CORROSION. AMPP. 2022. P. D041S042R010. P. 918.
12. Lavrinenco V.Y., Lavrinenco Y.A., Gonorov V.A. Materials for manufacturing automotive industry high strength fasteners // Metallurgist. 2020. Vol. 63. № 9. P. 960-966.
13. Liang J.W. et al. High strength superplasticity combination of ultrafine grained ferritic steel: The significant role of nanoscale carbides // Journal of Materials Science & Technology. 2021. Vol. 83. P. 131-144.

14. Maznichenko A.N., Sprikut R.V., Goikhenberg Y.N. Investigation of nitrogen containing austenitic stainless steel // Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd. 2020. Vol. 989. P. 152-159.
15. Momber A. Corrosion and Corrosion Protection of Wind Power Structures in Marine Environments: Volume 1: Introduction and Corrosive Loads. Academic Press, 2024. P. 919.
16. Ning D. et al. Carbide precipitation and coarsening kinetics in low carbon and low alloy steel during quenching and subsequently tempering // Materials Characterization. 2021. Vol. 176. P. 111111.
17. Peregov A.A., Vologzhanina S.A., Igolkin A.F. Research of properties of austenitic steels // Key Engineering Materials. 2021. Vol. 887. P. 242-246.
18. Rezayat M. et al. Overview of Surface Modification Strategies for Improving the Properties of Metastable Austenitic Stainless Steels // Metals. 2023. Vol. 13. № 7. P. 1268.
19. Ruszkiewicz B.J., Breidenbaugh E., Simpson G. The Development and Validation of a Novel Thread Forming Fastener for High Strength Steel Applications // International Manufacturing Science and Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2022. Vol. 85819. P. V002T05A006.
20. Shakhnazarov K.Y., Pryakhin E.I., Troshina E.Y. Rationale for signs of transformation in iron near 200 °C // ПИСЬМА О МАТЕРИАЛАХ Учредители: Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук. 2022. Vol. 12. № 4. P. 298-302.
21. Shifler D.A. (ed.). LaQue's Handbook of Marine Corrosion. John Wiley & Sons, 2022. P. 755.
22. Yudin P.E. et al. Investigation of the influence of the steel 20 microstructure on the carbon dioxide corrosion rate // Metal Science and Heat Treatment. 2020. Vol. 62. P. 415-419.
23. Zhao R. et al. Early corrosion behavior of 35CrMo steel for high strength bolt in simulated shallow and deep sea environments // Journal of Materials Research and Technology. 2024. Vol. 28. P. 1198-1214.
24. Zhao R. et al. Effect of cathodic polarization on stress corrosion cracking susceptibility of 35 CrMo steel for Class 12.9 fasteners in seawater // Journal of Materials Research and Technology. 2023. Vol. 24. P. 9339-9355.
25. Бажин В.Ю. и др. Современный взгляд на аномалии в группах металлов Периодической системы Д.И. Менделеева // Записки Горного института. 2019. Т. 239. С. 520-527.
26. Пескишев С.А. Применение мартенситностареющих сталей для повышения надежности высокопрочных крепежных элементов, работающих в морских условиях при низких климатических температурах: дис. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2011.
27. Шахназаров К.Ю., Пескишев С.А., Меркулов А.А., Андреева В.Д., Шахназаров Ю.В. Совместное рентгеноструктурное исследование характеристик тонкой структуры чистого железа и стали 03Х11Н8М2Ф ВД после нагрева при 350-800 °C. 7-я Международная научно-техническая конференция «Современные металлические материалы, технологии и их использование в технике» СПГПУ, 2006.

Адрес редакции:
141070, Королев,
Ул. Октябрьская,10а
Тел. (495)543-34-30 (доб.138),
E-mail: rio-kimes@mail.ru,
Site: www.unitech-mo.ru

Подписано в печать 17.03.2025
Формат В5
Печать офсетная. Усл.печ.л. 8,5
Тираж 500 экз.
Заказ № 101-01
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