

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

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-64098

от 18 декабря 2015 г.

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

ISSN 2409-1650

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

Группы научных специальностей и научные специальности в рамках групп научных специальностей, по которым издание входит в Перечень:
2. Технические науки; 2.2. Электроника, фотоника, приборостроение и связь; 2.3. Информационные технологии и телекоммуникации [2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации; 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей]; 2.5. Машиностроение [2.5.13. Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов]; 2.6. Химические технологии, науки о материалах, металлургия; [2.6.17. Материаловедение]

Подписной индекс в каталоге
«Почта России» ПП1997

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

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

Адрес редакции:
141070, Королев,
Ул. Октябрьская, 10а
Тел. (495)543-34-30 (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, представленных авторами для публикации
Материалы приводятся в авторской редакции.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Герасимов В.А., Шайтура С.В.

СИСТЕМА ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ.....3

Истратова Е.Е., Кожевников А.Н.

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРЕДПРИЯТИЯ ДЛЯ ВНЕДРЕНИЯ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНУЮ ПРОГРАММУ ВЫСШЕГО УЧЕБНОГО ЗАВЕДЕНИЯ.....14

Шульженко С.Н., Перепелица К.А.

МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ В БОЛЬШИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ.....22

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Ковалев И.И., Аббасова Т.С.

ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПРАВИЛ ДОКАЗАТЕЛЬНОЙ АРГУМЕНТАЦИИ.....34

Хорев П.Б., Павлов И.С.

ЭФФЕКТИВНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КРИПТОАЛГОРИТМОВ РОССИЙСКИХ СТАНДАРТОВ НА МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ.....48

Шайтура Н.С., Белова Ю.Н., Феоктистов Е.А.

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ.....64

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Артюшенко В.М., Семенов А.Б.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ПОТОКЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ.....83

Бершадский В.А.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА НАДУВА ТОПЛИВНЫХ БАКОВ РАКЕТНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.....94

Вокин Г.Г., Насибулин М.Ш.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ МАКСИМИЗАЦИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ВАЖНЕЙШИХ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ВСЕХ ЭТАПАХ ИХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА.....102

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. **Стреналюк 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 25.03.2024

Формат В5

Печать офсетная. Усл.печ.л. 13,0

Тираж 500 экз.

Заказ № 97-01

Отпечатано в типографии

ООО «Научный консультант»

г. Москва

Хорошевское шоссе, 35, корп. 2

Лобанов И.Е.

**ТЕОРИЯ ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ
С ДИАФРАГМАМИ В ЛАМИНАРНОЙ
И ПЕРЕХОДНОЙ ОБЛАСТЯХ ПРИ ТЕЧЕНИИ
ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ ДЛЯ
ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.....115**

Стреналюк Ю.В., Соколова Д.А.

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРИМЕНЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНОГО ОБЛАЧНОГО
ОФИСА ДЛЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ
ПОДДЕРЖКИ СОЗДАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
ПРИБОРОВ СУ БЛА.....132**

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

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.....144**

Горлов Е.С., Пашковский И.Э.

**ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ ДЕТАЛЕЙ
ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ ВОДОРОДНОГО
ИЗНАШИВАНИЯ.....158**

Скрябин М.Л.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВОК ИЗ СТАЛИ 35ХГСЛ
И МЕТОДЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРОЦЕСС
КРИСТАЛЛИЗАЦИИ.....168**

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

**РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ НА ЛОПАСТИ
В ПОТОКЕ СРЕДЫ МЕТОДОМ КОМПЛЕКСНОГО
ПОТЕНЦИАЛА.....176**

УДК 004.8, 004.9

**Система искусственного интеллекта для оптимизации
информационных систем**

Василий Александрович Герасимов, аспирант второго года обучения
кафедры «Информационных технологий и управляющих систем»,
Сергей Владимирович Шайтура, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информационных технологий и управляющих систем»,
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

В статье представлено исследование искусственного интеллекта с точки зрения оптимизации информационных систем. Поставлена проблема актуальности создания искусственной нейронной сети для поддержки принятия решения в решении задач оптимизации информационных систем. Описана концепция универсальной системы искусственного интеллекта для развертывания на предприятии для решения задач оптимизации цифровой экосистемы компании. Исследованы возможные проблемы в работе разрабатываемой нейронной сети и представлены варианты их решения. Представлен метод коэффициентов в качестве одного из основного вектора обучения нейронной сети для ее работы в сфере оптимизирования информационных систем. В ходе исследования сформированы ряд экспериментов, которые продвинули исследование и разработки темы.

Искусственный интеллект, искусственные нейронные сети, оптимизация, системы оптимизации информационных систем.

Artificial intelligence system for optimization of information systems

Vasiliy Alexandrovich Gerasimov, graduate second year
of the Department of Information Technology and Control Systems,
Sergey Vladimirovich Shaitura, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Information
Technologies and Control Systems,
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

The article presents a study of artificial intelligence from the point of view of optimizing information systems. The problem of the relevance of creating an artificial neural network to support decision-making in solving information system optimization problems is posed. The concept of a universal artificial intelligence system for deployment in an enterprise to solve the problems of optimizing the company's digital ecosys-

tem is described. Possible problems in the work of the developed neural network are investigated and solutions are presented. The method of coefficients is presented as one of the main learning vectors of a neural network for its work in the field of information systems optimization. In the course of the research, a number of experiments have been formed that will advance the research and development of the topic.

Artificial intelligence, artificial neural networks, optimization, information systems optimization systems.

Введение

Современные системы искусственного интеллекта выполняют множество различных задач, которые выполнял ранее человек. В доступе сегодня множество различных слабых систем искусственного интеллекта, которые обучены решать узкие задачи такие как: генерация изображений, вести диалог с пользователем, диагностировать болезни у пациентов и т.п.

Современные исследования и развитие систем искусственного интеллекта (далее – ИИ) еще не дают перейти науке на вторую ступень ИИ (сильные ИИ), но некоторые системы интересны в плане исследования (например, ChatGPT от компании OpenAI или GigaChat от Сбер). Интересны данные системы тем, что, относясь к чат-ботам, они способны решать различные задачи от простого диалога с пользователем до генерации изображений или помощь в решении любых задач.

Одной из трудоемких задач является оптимизация. Оптимизация сложный процесс, касаясь как оптимизация процессов или действий, заканчивая системами, механизмами. Оптимизация включает в себя большой объем работы и колоссальных данных. Системы ИИ способны обрабатывать большой объем данных и давать результат на основе их обработки, поэтому данные технологии могут быть крайне полезны в решении вопросов по оптимизации.

В научной среде существуют исследования, связанные о возможности применения систем ИИ для решения задач по оптимизации. Существуют опыт внедрения ИИ в сферу оптимизации бизнес-процессов. Однако, практически нет никого исследования о внедрении системы ИИ для оптимизации информационных систем. Почему же речь идет об оптимизации информационных систем? Оптимизация данных систем является актуальной темой, так как на каждом предприятии существуют свои информационные системы, а их оптимизация является неотъемлемой частью развития, эффективности и экономического процветания организации.

Целью данного научного исследования является определить возможность концепции универсальной системы ИИ, которая направлена на оптимизацию информационных систем.

Проблемы оптимизации ИС

Задача оптимизации является довольно узкоспециализированной задачей. Во многом основное на что стоит обратить внимание со стороны трат человеческого ресурса:

1. Огромные объемы данных, которые необходимо обработать специалисту для определения и локализации оптимизации ИС.

2. Локализация проблемы, верная локализация проблемной области с целью оптимизации трудоемкая задача и требует большого количества времени специалисту.

3. Формирование стратегии оптимизации – стратегия оптимизации, формирование этапов оптимизации максимально важный этап всего процесса оптимизации, который затрагивает все причастные стороны. Тут решается и экономический вопрос, и вопрос человеческого ресурса, и технический вопрос оптимизации. Основное для специалиста определить максимально эффективный путь оптимизации системы, учитывая абсолютно все аспекты, которые затрагивают оптимизация.

ИИ способен заменить человека данных этапах и быть эффективнее, либо быть как помощником специалисту, где при симбиозе решения задачи оптимизации будет намного быстрее, а шанс неточности, ошибки, менее эффективных итогов оптимизации значительно меньше.

Концепция ИИ по оптимизации ИС

Не стоит отрицать факт, что сейчас существуют системы ИИ, которые способны помочь в оптимизации ИС, даже упомянутые ранее системы, способны помочь в оптимизации. Однако, концепция состоит на основе универсальной системы, которая способна эффективно решать вопросы оптимизации информационных систем.

Связано это со следующим:

1. Хотя и современные чат-боты (например, одна из самых продвинутых ChatGPT) и являются универсальными системами, которые могут дать результат в разных задачах, которые относятся к разным сферам от разных пользователей, с точки зрения оптимизации этого недостаточно.

2. В разных компаниях существуют различные информационные системы. Есть и более общие системы или более специализированные. Для всех необходим единая система, которая будет способна каждую из них обработать, понять, дать свои результаты по оптимизации. Это позволит дать более гибкую систему для рынка, при которой нет необходимости адаптировать под каждую организацию, под каждую систему, что даст более быстрый старт системы на входе.

3. Универсальность системы позволит удешевить стоимость итоговой системы, так как не будет задачи адаптировать код системы под конкретную организацию или информационную систему. Это позволит системе укрепиться на рынке и стать более востребованной.

Архитектура системы должна быть исключительно гибридной, для создание большей гибкости итоговой системы. Использование связки нескольких топологий нейронных сетей, позволит достичь более эффективной работы. Если говорить о конкретных топологиях, которые должны объединиться в гибридную сеть, то выбор должен остановиться на:

- Сети долгой краткосрочной памяти (LSTM).
- Сравнительно новая архитектура Transformer.

Выбор двух архитектур нейронных сетей совместно позволит взять их сильные стороны и использовать в гибриде для оптимизации [2].

Как пример такого гибрида может быть следующий:

LSTM используется для нахождения и извлечения важных признаков из данных, в то время как Трансформер используется для генерации связанного текста для выдачи подробного результата своего анализа или использоваться в более глубоких задачах оптимизации за счет своей глубокой архитектуры и схеме действия.

На данный момент времени нет достаточных экспериментов и исследований, которые могут дать подробную схему и принцип работы подобного гибрида в отношении задач оптимизации. Однако, готовятся ряд экспериментов, результаты которых должны показать объективную эффективность гибрида в различных конфигурациях.

Важным аспектом в системе является ее память. Память не в привычном представлении и понимании. В данном случае «память» системы – хранилище данных, где собраны важные действия системы во время решения задач оптимизации и ее результаты, вне зависимости от положительных или отрицательных реакций со стороны специалистов. Все решения нейронной сети переходят в одно хранилище для хранения.

Это необходимо для:

1. Сохранения истории работ, которые были проведены в системах.
2. Возможность нейронной сети исследовать собственные результаты и пути решения для переобучения или изучения старого опыта для новых решений.
3. Даже при отсутствии доступа в глобальную сеть для поиска ответов, система способна обратиться к своей «памяти» для исследования и поиска ответов.

Один из трудных вопросов в данной концепции является метод обучения. С одной стороны, система должна изучить большой объем данных, который может быть не последовательным и не систематическим. В данном случае обучение с учителем не столько подходит, сколько обучение без учителя. Однако, системе необходимо принимать решения и обосновывать их, а также взаимодействовать с окружающей средой (другими информационными системами), поэтому наиболее эффективный метод обучения с подкреплением. Систематизируя данные факты, можно сделать вывод, что использование одного конкретного метода обучения не позволит достичь эффективного обучения нейронной сети.

Решением может стать использование гибридного метода обучения для достижения максимальной результативности.

Гипотетически гибрид обучения без учителя и обучение с подкреплением позволит достичь нужного эффекта. Так как нейронная сеть сможет воспринимать и обучаться на данных, которые не имеют определенного верного ответа, что и преобладает в ситуациях оптимизации. Заранее невозможно определить верный путь оптимизации системы. Обучение с подкреплением, в свою очередь, позволит нейронной сети обучиться правильно взаимодействовать с окружающей средой, не только изучать информационные системы в своей среде, но и

научиться принимать свои решения, обосновывать их и представлять полные результаты для специалиста.

Как стало ранее уже понятно, нейронную сеть необходимо интегрировать в цифровую экосистему. Без внедрения нейронная сеть не будет иметь полных и необходимых данных для оптимизации, не будет возможности мониторинга систем, а также нет объекта работы, что не будет удовлетворять правильному выполнению задачи по оптимизации. Это вызывает некоторые сложности в виде создания вычислительных мощностей компании для развертывания нейронной сети и вопросы безопасности. Аспект безопасности будет рассмотрен в следующих разделах исследования. Аспект вычислительных мощностей более прост и реализуем в масштабах организации.

Стоит вновь отметить важный факт – концепция данной нейронной сети рассматривается не в качестве самостоятельной «единицы», системы, а в качестве инструмента для специалиста, занимающегося вопросами оптимизации. Иными словами, концепция рассматривается как связка работы человека и искусственного интеллекта совместно. В большей степени исследуемая система должна забирать на себя рутинные задачи такие как:

- Мониторинг цифровой экосистемы организации.
- Обработка и исследование запросов от сотрудников, которые работают в информационных системах.
- Возможность решать простые ошибки и сбои, возникающие в работе информационных систем.
- Сообщать человеку-специалисту о возможных работах по оптимизации информационных систем.

Более сложные задачи в сфере оптимизации выполняются совместно с человеком-специалистом и ИИ, что позволяет добиться более эффективных результатов проделанных работ, а также в несколько раз ускорит выполнения задач.

Резюмируя все выше, можно отобразить работы системы в виде схемы, отображенной на рисунке 1.

В итоге выстраивается полноценная система нейронной сети, способная к решению трудоемкой и актуальной задачи оптимизирования информационных систем.

Рассматривая положительные стороны исследуемой системы можно выделить следующее:

А) Система является универсальной, так как обучение и исследование ИС происходит внутри цифровой экосистемы компании.

Б) Система является инструментом для человека-специалиста, то есть нет вопроса о замене человеческого ресурса на ИИ, а комбинацию работы человека и машины.

В) Система способна повысить скорость решения задач и эффективность результата проделанных работ

Г) При вложении к развертыванию системы, организация способна повысить свою экономику за счет более быстрого решения задач оптимизации.

Д) Система позволяет расширить исследования систем ИИ в сфере опти-

мизирования и интеграции в работу с человеком.

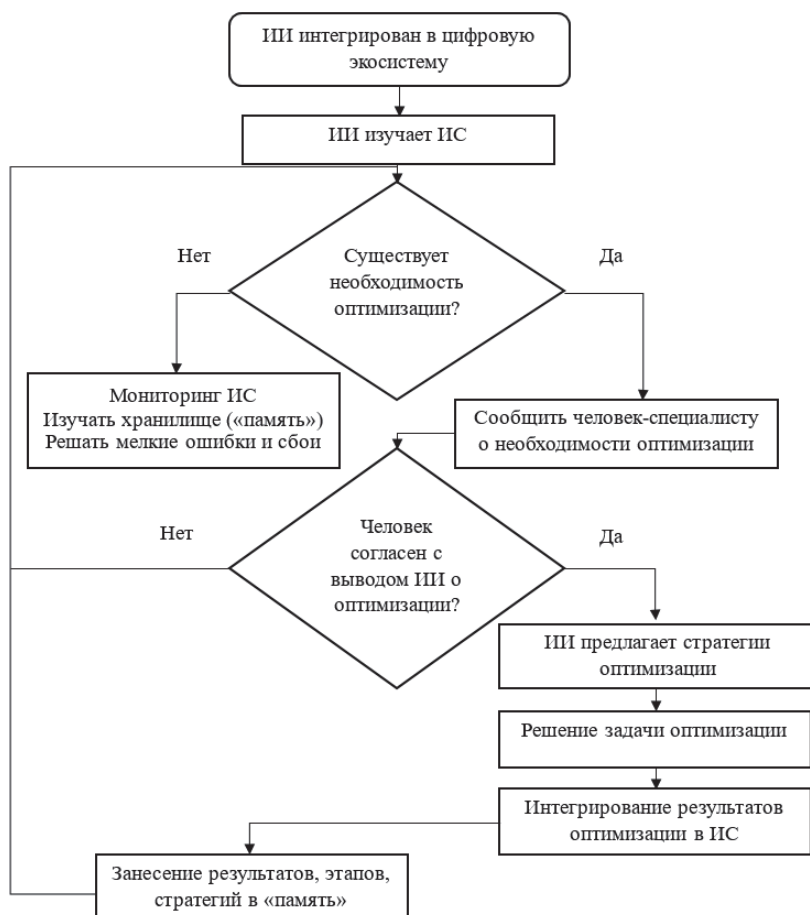


Рисунок 1 – Схема концепции ИИ для оптимизации ИС

Наряду с положительными сторонами есть и отрицательные, которые на моменте концепции уже наблюдаются и требуют дополнительных исследований и экспериментов для их решения:

- А) Проблема безопасности цифровой экосистемы.
- Б) Проблема согласования ИИ (проблема выравнивания ИИ).
- В) Зацикливание системы на самообучении и оптимизации самой себя.
- Г) Человек-специалист, который способен взаимодействовать с системой.

Проблема безопасности

Отрицательные стороны исследуемой концепции системы ИИ в совокупности можно отнести к проблеме безопасности. Речь идет не только об информационной безопасности, но и о безопасности функционирования компании и ее систем в целом. Стоит более подробно остановиться на каждом пункте, чтобы актуализировать возможные проблемы в концепции системы и варианты решения данных проблем.

1. Безопасность цифровой экосистемы.

Система ИИ будет иметь доступ ко всем ИС компании, с точки зрения решения задач оптимизации – это неотъемлемая часть успешного выполнения задачи. С точки зрения информационной безопасности – это повышение угрозы несанкционированного доступа или утечки информации, в том числе конфиденциальной. Потенциальный злоумышленник может проникнуть в цифровую экосистему через систему ИИ при помощи взлома системы, а дальше по цепочке получить доступ к остальным информационным системам [4].

Второй вариант получения информации может быть в виде запросов ИИ, где система может передать внутреннюю информацию, которая не должна оказываться во внешней среде.

2. Проблема согласования ИИ

Проблему согласования ИИ или проблема выравнивания ИИ можно сформулировать следующим образом – проблема обеспечения систем ИИ так, чтобы соответствовать человеческим ценностям и целям.

Проблема согласования – это неопределенность, поскольку невозможно точно предсказать как поведет себя система ИИ при решении задачи, которая будет ей поставлена.

Невозможно не согласиться, что проблема согласования больше относится к продвинутым системам ИИ, то есть от сильных ИИ. Однако, даже при современных достижениях в области ИИ стоит поднимать решение данной проблемы. В масштабе концепции исследуемой системы ИИ проблема согласования можно охарактеризовать следующими вопросами:

- Может ли возникнуть разногласие между ИИ и человеком-специалистом при согласовании необходимости оптимизации ИС?
- Может ли система ИИ пойти на хитрость или обман для достижения положительного результата своей работы?
- Возможен ли случай, при котором система ИИ будет предлагать решение или стратегию оптимизации избыточную или невозможную?

Все эти вопросы связаны с тем по какой логике работают нейронные сети. Разногласия между ИИ и человеком могут возникнуть при ситуации, когда ИИ решит, что ее предложение решения задачи будет максимально оптимальным и она (система) получит максимальную награду для себя, а не штраф. С другой стороны, человек-специалист может посчитать предложение ИИ слишком избыточным и на повторный запрос поиска другого пути система не сможет предложить иного пути решения вопроса, что приведет в тупик весь процесс.

Другой возможный пример можно описать как обман системы.

Пример: Система производит мониторинг систем, где обнаруживает возможность провести оптимизацию, однако для нее становится невозможным провести расчет стратегии оптимизации по ряду причин (невозможно просчитать стратегию из-за недостаточности данных или нет прошлого опыта, на основе которого можно произвести расчет стратегии). Для того, чтобы не получить штраф, система ИИ может пойти на обман и сообщать о том, что ИС в порядке и не требуют оптимизации.

Последний вопрос связан с потенциальной схемой ее работы. Система ИИ может заиклиться на своем самосовершенствовании и модернизации. Так как объективно система станет частью цифровой экосистемы она будет само-

стоятельно изучать и себя саму со стороны возможной оптимизации. Подобное заикливание может привести к проблемам в других ИС, которые не будут исследованы ИИ.

Какое решение данных проблем возможно?

1. Сервер, на котором развернута система ИИ должна быть дополнительно защищена от внешних угроз и попыток ее потенциального взлома. Доступ к ИИ должен быть разграничен и предоставлен только специалистам, которые будут с ней работать и работают с цифровой экосистемой компании.

Также в саму систему ИИ можно внедрить систему идентификации и (или) авторизации, где система сама или дополнительный модуль безопасности будет давать полноценный доступ к работе.

2. Решение проблемы согласования требует больше комплексного и тонкого подхода. Вариантом решения данного вопроса может являться введение в работу системы коэффициентов для принятия решения в вопросах оптимизации. Это позволит как ИИ, так и человеку-специалисту принимать более взвешенные решения и предлагать оптимальные стратегии оптимизации ИС. Помимо этого, предлагается системе ИИ ограничить в рамках самообучения. Создать для ИИ условия при котором система не выходит за рамки исследования и обучения своих результатов, которые хранятся в «памяти». При этом, если человек-специалист определить, что ИИ зашел в цикл своего самообучения, то реализовать инструмент, при котором он сможет остановить этот цикл для остановки данного процесса внутри ИИ.

В итоге решение описанных проблем выделено в таблице 1.

Таблица 1 – Проблемы и их пути решения в концепции ИИ

Проблема	К чему может привести	Путь решения
Безопасность цифровой экосистемы	Несанкционированный доступ к ИС компании. Утечка данных	1. Создание защиты от внешних угроз. 2. Создание внутри ИИ системы аутентификации и идентификации
Проблема согласования ИИ	Неэффективность работы системы. Невозможность решения исходных проблем оптимизации. Экономические потери компании	1. Создание системы коэффициентов в работе оптимизации. 2. Контроль за состоянием ИИ человеком-специалистом.
Проблема заикливания самооптимизации ИИ	Бесконечный цикл самообучения и самомодификации ИИ. Отсутствие работ по оптимизации остальной цифровой экосистемы. Неработоспособность системы ИИ.	1. Ограничение (изоляция) системы ИИ внутри цифровой экосистемы. 2. Создание инструмента отключения цикла вечного исследования системы ИИ самой себя

Система коэффициентов для решения задач оптимизации

Метод коэффициентов не новая идея и применяется во многих практических и научных сферах. Оптимизация ИС по сути является задачей многокритериальной оптимизации. Существует множество альтернатив (стратегий оптимизации) из которых необходимо найти рациональный путь или альтернативу. То есть мы имеем классическую постановку задачи многокритериальной оптимизации [6].

Система ИИ необходимо обучить, основываясь на решении многокритериальной оптимизации. Система самостоятельно или в самом запросе к ИИ будут отображены аспекты или критерии, к которым необходимы коэффициентные значения. Это дает более прозрачное решение проблемы и нахождения наиболее оптимального пути. Как ИИ будет проще, работая с коэффициентами, определить правильный путь решения задачи и обосновать свое решение человеку-специалисту. Помимо этого, сам человек-специалист может ввести свои коэффициенты на важные критерии, чтобы система имела больше определенных данных для формирования стратегии оптимизации ИС. Фактически на выходе будут предложены N стратегий оптимизации, к которой будут прикреплены коэффициенты на важные критерии (аспекты), при помощи которых будут приняты окончательное решение по задаче оптимизации. Примером подобной системы коэффициентов может быть такой, которая указана в таблице 2.

Таблица 2 – Коэффициенты стратегий оптимизации

Критерии	Стратегия 1	Стратегия 2
Экономический критерий	0,874	0,358
Затраты времени	0,25	0,54
Затраты человеческих сил	0,1112	0,658
Возможность возникновения ошибок	0,32	0,45

На основе подобной системы коэффициентов результат исследования будет более прозрачным и понятным для понимания и просчета итоговой стратегии оптимизации.

Заключение

В проведенном исследовании можно выявить несколько результатов:

1. Большинство современных систем ИИ, которые доступны рынку предлагают решение множество различных трудоемких задач. Однако универсальных систем для оптимизации ИС, который является актуальным в XXI веке, на общем рынке нет.

2. Представлена концепция подобной системы ИИ, которая способна интегрироваться в различные цифровые экосистемы и эффективно работать в любой конфигурации компании.

3. Предложены решения возможных проблем в результате функционирования подобного ИИ в масштабе работы в компании и определенных цифровых экосистем.

4. Дальнейшее исследование и разработка системы ИИ позволит расши-

рять исследование и использование искусственных нейронных сетей в разных сферах производства и науки.

5. Исследования подобных систем могут привести к созданию новых архитектур и интегрирование в оптимизацию не только ИС, но и других областей.

Литература

1. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Анализ математических моделей информационных параметров сигналов, обрабатываемых радиолокационными устройствами наблюдения ближнего действия // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2014. № 5. С. 14-20.
2. Бородин Г.Д. Краткий обзор и классификация искусственных нейронных сетей // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 11. С. 45-53.
3. Гаврилова В.В., Шайтура С.В. Естественный и искусственный интеллект // Славянский форум. 2014. № 2(6). С. 24-27.
4. Менисов А.Б., Ломако А.Г., Дудкин А.С. Метод защиты нейронных сетей от компьютерных бэкдор-атак на основе идентификации триггеров закладок // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. № 4. С. 742-750.
5. Панарин В.М., Гришаков К.В., Маслова А.А., Гришакова О.В., Архипов А.В. Применение искусственных нейронных сетей в инженерно-технических и экологических разработках // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. № 4. С. 278-284.
6. Пиявский С.А. Метод универсальных коэффициентов при принятии многокритериальных решений // Онтология проектирования. 2018. № 3(29). С. 449-468.
7. Ракицкий С.Н., Данилова Е.И., Евглевская Н.В. Контроль системы безопасности инфотелекоммуникационных систем на основе функционирования искусственных нейронных сетей // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. № 7. С. 525-528.
8. Сочнев А.Н. Применение искусственной нейронной сети для решения задач оптимизации производства на основе цифровых двойников // Приборостроение. 2021. № 9. С. 750-766.
9. Тормозов В.С. Адаптация модели нейронной сети LSTM для решения комплексной задачи распознавания образов // Программные продукты и системы. 2021. № 1. С. 151-156.
10. Частикова В.А., Аббасова С. С. Аспекты применения сверточных нейронных сетей при обнаружении скрытой информации в изображениях // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. 2021. № 1(276). С. 57-61.
11. Черепанов Н.В., Буслаев С.П. Проблемы и задачи развития искусственного интеллекта на машиностроительном предприятии // Инновации и инвестиции. 2021. № 7. С. 175-179.
12. Чупакова А.О., Гудин С.В., Хабибулин Р.Ш. Разработка и обучение модели искусственной нейронной сети для создания систем поддержки принятия ре-

шений // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 3. С. 61-73.

13. Шайтура С.В. Автоматизация управления проектами // Конструкторское бюро. 2019. № 1(138). С. 9-34.
14. Шелухин О.И., Шариков А.Ю. Имитация поведения компьютерной системы с помощью искусственных нейронных сетей // T-Comm. 2021. № 5. С. 29-37.

УДК 004.942

**Разработка цифрового двойника информационной системы
предприятия для внедрения в образовательную программу высшего
учебного заведения**

Евгения Евгеньевна Истратова, кандидат технических наук,
доцент кафедры автоматизированных систем управления,
Алексей Николаевич Кожевников, кандидат технических наук,
доцент кафедры прочности летательных аппаратов,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Новосибирский государственный
технический университет», г. Новосибирск, Новосибирская область

В статье представлены результаты разработки и исследования цифрового двойника информационной системы предприятия, предназначенного для внедрения в учебный процесс технического вуза. Эффективность работы была оценена путем сравнения результатов измерения напряженно-деформированного состояния балки несколькими методами. Полученные результаты были сопоставлены с данными натурных испытаний. Наиболее точно эксперимент описывает цифровой двойник, что объясняется учетом влияния факторов окружающей среды при разработке математической модели, в результате расхождение с реальным процессом составило менее 5%.

Цифровой двойник, математическое моделирование, технический университет, образование, учебная программа.

**Development Of A Digital Twin Of The Enterprise Information System
For Implementation In The Educational Program Of A Higher
Educational Institution**

Evgeniya Evgenievna Istratova, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Automated Control Systems Department,
Alexey Nikolaevich Kozhevnikov, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Aircraft Strength,
Federal State Budgetary Educational Institution higher education
«Novosibirsk State Technical University», Novosibirsk, Novosibirsk region

The article presents the results of the development and research of a digital twin of an enterprise information system, intended for implementation in the educational process of a technical university. The performance efficiency was assessed by comparing the results of measuring the stress-strain state of the beam using several methods. The results obtained were compared with data from field tests. The digital twin describes the experiment most accurately, which is explained by taking into account the influence of environmental factors when developing a mathematical model;

as a result, the discrepancy with the real process was less than 5%.

Digital twin, mathematical modeling, technical university, education, curriculum.

Введение. Как новая технология в эпоху Индустрии 4.0, цифровой двойник привлекает беспрецедентное внимание из-за его возможностей оптимизации проектирования процессов, контроля качества, мониторинга состояний систем и здоровья, принятия решений и многого другого за счет комплексного моделирования физического мира как группы взаимосвязанных цифровых моделей [1]. Помимо этого, наряду с применением информационных технологий нового поколения в промышленности и в образовании, наступает эра производства, управляемого большими данными. Однако, несмотря на то, что можно получить значительные объемы данных на протяжении всего жизненного цикла производства, включая проектирование, производство и обслуживание продукции, текущие исследования по-прежнему сосредоточены на физических процессах, а не на виртуальных моделях [2]. Интерес к технологии цифровых двойников растет в научных кругах и промышленности. Это проявляется в растущем количестве опубликованных исследований и патентов, касающихся их разработки, а также различных промышленных применений. Однако в литературных источниках нет достаточного объема информации о сильных и слабых сторонах данной концепции применительно к вопросу образования. В статье [3] были проанализированы известные подходы, связанные с развитием цифровых двойников, была предложена основа для их сопоставления относительно областей исследований, технологий и моделей, используемых в цифровом двойнике, а также используемых методов проверки. На основе данной структуры были выделены аспекты эффективного применения цифровых двойников в образовательном процессе.

Концепция цифровых двойников в последнее время стала довольно популярной в области перерабатывающей и обрабатывающей промышленности для повышения производительности и оценки остаточного срока службы изделий [4]. При исследовании окружающей среды, поведение которой постоянно меняется, сложно производить моделирование в режиме реального времени. В качестве примера решения данной проблемы в статье [5] показан способ применения цифрового двойника для мониторинга окружающей среды с использованием точечных источников посредством методов гибридного моделирования и оптимизации. Для неразрушающего контроля концепция цифровых двойников может использоваться как для проектирования и оптимизации аппаратного и программного обеспечения системы контроля, так и для выбора и адаптации наиболее рационального решения или для повышения эффективности контроля, обеспечивая повышение уровней качества, скорости и стоимости одновременно [6]. Таким образом, цифровой двойник, являясь виртуальным представлением конкретного физического актива, обладает огромным потенциалом для реализации управления обслуживанием жизненного цикла практически любой системы, в том числе в образовании.

Цель исследования заключалась в разработке цифрового двойника промышленной информационной системы и адаптации ее к образовательному про-

цессу технического вуза для повышения эффективности обучения.

Разработка методики внедрения цифрового двойника в образовательный процесс. В качестве инициатора запуска концепции цифрового двойника в техническом вузе должна выступать профильная организация или несколько предприятий производственной отрасли. Это объясняется тем, что именно производственная среда может сформулировать актуальные востребованные кейсы для решения их студентами. На основании данных практических заданий преподаватели, в свою очередь, могут полностью реализовать образовательные компетенции, указанные в профессиональных стандартах, а также наладить междисциплинарные связи внутри вуза [7]. Схема взаимодействия всех участников реализации цифрового двойника в образовательном учреждении приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Схема реализации цифрового двойника в образовательной среде технического вуза

Курсовые и выпускные квалификационные работы студентов, выполненные ими с помощью цифрового двойника в дальнейшем могут стать основой для формирования междисциплинарных проектных или научных коллективов и решения актуальных производственных задач [8]. Для внедрения в учебный процесс цифрового двойника информационной системы необходимо задействовать такие виды ресурсов, как кадровые, включающие квалифицированных специалистов для сопровождения цифрового двойника, а также преподавателей, осуществляющих проверку работ студентов; материальные, к которым можно отнести следующие компоненты: технические средства; сетевая инфраструктура; аппаратное и программное обеспечение [9]. Внедрение цифрового двойника в образовательный процесс подразумевает выполнение нескольких этапов: установки, подготовки и начала работы с цифровым двойником [10]. Первый этап заключается в установке серверной и клиентской частей, а также необходимых для их полноценной работы инструментов и оборудования. Этапы подготовки и начала работы связаны с подбором специалистов для сопровождения цифрового двойника, а также с обучением работе с ним всех участников процесса. Таким образом, применение цифрового двойника в образовательной программе позволяет студентам получить опыт практической работы в области прочностных испыта-

ний различных изделий и технических конструкций, а преподавателям повысить эффективность обучения за счет применения методов неразрушающего контроля.

Разработка цифрового двойника. Проектирование объекта исследования помимо аналитического расчета включало расчет с помощью численного метода, в качестве которого был использован метод конечных элементов. Актуальность и широкое применение данного метода обусловлены его универсальностью, основанной на использовании вариационных и разностных методов, а также сравнительной простотой и высокой точностью при работе с объектами, имеющими сложную форму. Процесс создания конечно-элементной модели для исследуемой балки может быть представлен в виде двух последовательных этапов, первый из которых связан с определением геометрической модели изделия и разделением ее на определенные части заданного размера, а второй – с расчетом величины напряженно-деформированного состояния для каждой такой части. Алгоритм работы цифрового двойника включает следующие этапы: разбиение балки геометрической сеткой на конечные элементы; расчет центра масс для каждого конечного элемента; расчет напряженно-деформированного состояния балки для центра масс каждого конечного элемента; расчет максимального значения напряженно-деформированного состояния балки и определение номера конечного элемента; аппроксимация значений напряженно-деформированного состояния балки по результатам полного факторного эксперимента и метода конечных элементов. В качестве конечного элемента геометрической сетки был определен объемный шестигранник, имеющий форму куба с заданной длиной грани. Нумерация элементов осуществляется от левого верхнего угла заделки. Исходя из этого, номер каждого конечного элемента определяется тремя координатами i, j, k . Таким образом, проектирование геометрической сетки можно разделить на два последовательных этапа, связанных с реализацией сначала двухмерной, а затем и трехмерной моделей. На первом этапе для плоского конечного элемента задаются размеры квадрата с указанием координат его вершин: $A(i_{\min}; j_{\min})$, $B(i_{\min}; j_{\max})$, $C(i_{\max}; j_{\max})$, $D(i_{\max}; j_{\min})$. При этом, если данный квадрат необходимо разделить на более мелкие конечные элементы, то этот процесс осуществляется за счет рекурсии. Разделение выполняется на четыре одинаковых элемента. В процессе создания геометрической сетки проверяются две гипотезы. Первая из них заключается в проверке того, пересекаются ли контур объекта и контур конечного элемента. Вторая гипотеза проверяет, принадлежит ли точка, расположенная внутри конечного элемента, объекту исследования. Для этого рассчитываются площади треугольников, образованных сторонами конечного элемента и точкой объекта исследования. Если все компоненты вектора площади положительны, то это характеризует, что точка принадлежит объекту. Если же они неотрицательны, то это означает, что точка лежит внутри конечного элемента или на его границе. Реализация трехмерной модели на основе двухмерной производится путем экструзии плоских элементов путем задания им координаты, графически выражающей ребра куба. С точки зрения алгоритма реализуется цикл, включающий следующую последовательность действий: создание плоского конечного элемента с заданной длиной грани; копирование двухмерного конечного элемента; смещение двухмерного конечного элемента на шаг; проверка гипотез, при

которой положительный результат означает переход к следующему пункту, а отрицательный – возврат в начало цикла; создание ребер у плоского элемента с длиной, равной; копирование двухмерного конечного элемента; смещение двухмерного конечного элемента на шаг; преобразование двух двухмерных элементов в один трехмерный; копирование ряда трехмерных конечных элементов.

Для проведения расчетов необходимо знать координату конечного элемента по оси абсцисс для определения величины плеча действия силы при расчете изгибающих моментов. Согласно принципу нумерации, оси абсцисс соответствует i -координата элемента. Для каждого куба центр тяжести находится на пересечении его диагоналей. Расчет значения напряженно-деформированного состояния для конечных элементов включает следующие операции: определение величины реакции опоры; определение изгибающего момента, возникающего под действием распределенной нагрузки; расчет суммарного значения изгибающего момента; определение напряжения в конечном элементе. Из всех полученных значений изгибающих моментов, рассчитанных для всех конечных элементов балки, выбирается максимальное значение.

В результате проведения полного факторного эксперимента было получено уравнение регрессии, характеризующее зависимость величины напряженно-деформированного состояния объекта от таких факторов, как нагрузка, температура и влажность воздуха. Подставив в данное уравнение исходные параметры, можно получить величину напряженно-деформированного состояния балки под действием нагрузки с учетом параметров микроклимата. Данное значение аппроксимируется со значением, полученным в результате применения метода конечных элементов, что позволяет повысить точность определения итоговой величины напряженно-деформированного состояния балки за счет учета не только геометрических особенностей объекта исследования, но и параметров окружающей среды.

Исследование полученного цифрового двойника. Для исследования эффективности работы готового программного продукта было проведено сопоставление результатов, полученных при помощи цифрового двойника, а также другими методами. В качестве сравниваемых методов были рассмотрены: аналитический метод, расчет при помощи пакета программ Ansys. Полученные результаты измерения напряженно-деформированного состояния балки были сопоставлены с данными натурных испытаний.

Согласно произведенному аналитическому расчету, максимальная величина изгибающего момента составляет $1061.8 \cdot 10^2$ кгс·см. Площадь сопротивления сечения балки равна 108.7 см^3 . Максимальное значение напряжения, появляющегося в сечении двутавра составляет 96 МПа.

Среди современных программных продуктов, применяемых для инженерных и прочностных расчетов, особое место занимает решение ANSYS Mechanical, отличающееся высокой точностью выполняемых расчетов. Первым этапом работы с инструментом Ansys является определение конечного элемента. При выполнении сравнительного анализа рабочая поверхность двутавра была разделена на 1350 стандартных элемента типа SOLID45, имеющих размер 60 мм. Следующим этапом работы является задание граничных условий и выбор нагрузки. Для этого было выполнено закрепление всех созданных узлов, образуя-

щих торцевое сечение, после чего за счет формирования поля силы тяжести было произведено нагружение объекта. Заключительным этапом выступает получение поля значений напряжений, эквивалентных тем, которые образуются на реальном промышленном объекте под действием нагрузки. На рисунке 2 приведен результат определения напряженно-деформированного состояния балки, выполненный в Ansys.

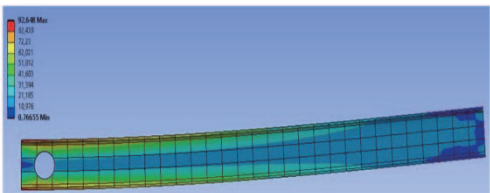


Рисунок 2 – Результаты реализации метода конечных элементов в Ansys

Максимальное значение напряженно-деформированного состояния двутавровой балки было зафиксировано в месте закрепления ее в консоли и его величина составила 92.67 МПа. На рисунке 3 детально показаны зоны действия максимальной нагрузки, рассчитанные в пакете Ansys.

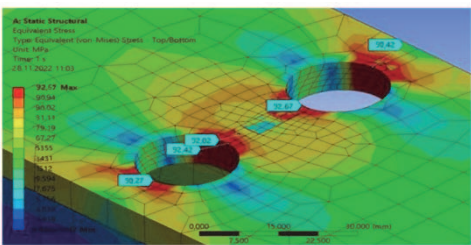


Рисунок 3 – Значения напряженно-деформированного состояния в зоне отверстий

Полученные при проектировании в Ansys значения были сопоставлены с аналитическим расчетом, с экспериментальными данными и с данными, полученными при помощи цифрового двойника. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты сравнительного анализа данных, полученных различными способами

№ датчи-ка	Значение напряженно-деформированного состояния балки, МПа			
	Аналитический рас-чет	Расчет в Ansys	Экспери-мент	Цифровой двойник
2	95.81	92.42	96.07	96.06
4	95.81	92.67	96.13	96.12
10	95.81	92.40	96.04	96.05
12	95.81	92.64	96.10	96.10

Как видно из таблицы, результаты аналитического расчета и натурных испытаний совпадают. Кроме того, наиболее точно экспериментальные данные описывает цифровой двойник, а не пакет программ Ansys, что вероятно связано с тем, что при разработке математической модели было учтено действие факторов окружающей среды, то есть микроклимата помещения, на напряженно-деформированное состояние объекта исследования. Полученные результаты испытания цифрового двойника были сопоставлены с реальным процессом, расхождение составило менее 5%.

Заключение. Проведение достаточного числа прочностных испытаний изделий связано с существенными финансовыми расходами, поэтому зачастую получить результаты путем реализации физических экспериментов является экономически затратно, а в ряде случаев просто невозможно. В связи с этим, для обучения целесообразно использовать точные распределенные динамические математические и программные модели объектов, то есть цифровые двойники. В результате выполнения работы был реализован цифровой двойник информационной системы предприятия. Разработанная информационная система позволяет студентам изучать динамику изменения напряженно-деформированного состояния балки под действием нагрузки и формировать отчеты за счет определения точки на изделии, на которую приходится максимальная нагрузка, а также величины напряжения в ней без проведения натурных испытаний. В настоящее время он тестируется и готовится для передачи в эксплуатацию на кафедру прочности Новосибирского государственного технического университета.

Литература

1. Thelen A., Zhang X., Fink O. et al. A comprehensive review of digital twin – part 1: modeling and twinning enabling technologies. Struct Multidisc Optim 65, 354 (2022) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/s00158-022-03425-4>.
2. Tao F., Cheng J., Qi Q. et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. Int J Adv Manuf Technol 94, 3563–3576 (2018) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>.
3. Данилаев Д.П., Маливанов Н.Н. Особенности взаимодействия предприятий и вузов в условиях цифровой экономики // Инфокоммуникационные технологии. 2022. Т. 17. № 1. С. 122-30.
4. Куликов Г.Г. Подход к применению концепции цифровых двойников для трансформации корпоративной информационной системы под требования Industry 4.0 // Вестник УГАТУ. 2019. № 4(86). С. 154-160.
5. Alnowaiser K.K., Ahmed M.A. Digital Twin: Current Research Trends and Future Directions. Arab J Sci Eng 48, 1075–1095 (2023) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s13369-022-07459-0>.
6. Волокитин Ю.И. Цифровые двойники знаний и онтологии для высшего технологического образования / Ю.И. Волокитин, О.В. Гринько, В.П. Куприяновский // International journal of open information technologies. 2021. № 1. С. 128-144.

7. Wei Y., Hu T., Yue P. et al. Study on the construction theory of digital twin mechanism model for mechatronics equipment. Int J Adv Manuf Technol (2022) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09144-w>.
8. Hollenbeck D., Chen Y. A Digital Twin Framework for Environmental Sensing with sUAS. J Intell Robot Syst 105, 1 (2022) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s10846-021-01542-8>.
9. Маврина А.С. Перспективы применения концепции цифровых двойников в учебном процессе при взаимодействии вуза с предприятием / А.С. Маврина, А.А. Кузнецов // Национальные тенденции в современном образовании: III Всероссийская научно-практическая конференция, Омск, 2021. С. 116-122.
10. Vrana J. The Core of the Fourth Revolutions: Industrial Internet of Things, Digital Twin, and Cyber-Physical Loops. J Nondestruct Eval 40, 46(2021) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s10921-021-00777-7>.

УДК 004.056.55, 003.26

Методика управления рисками в больших информационных системах

Сергей Николаевич Шульженко, доктор технических наук,
профессор кафедры «Информационных технологий и управляющих систем»,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

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

Кирилл Алексеевич Перепелица, аналитик,
АО Тинькофф Банк, г. Королев, Московская область

В настоящее время с увеличением объёмов информации в делопроизводстве различных организаций и предприятий необходимо эффективное управления рисками, возникающими на всех этапах деятельности. В статье рассматривается методика управления этими рисками при помощи как автоматического сбора, так и ручной передачи информации об ошибках и просчетах в больших информационных системах.

Эксперты, управления рисками, сценарный анализ, причинно-следственный анализ, баг репорт, обратная связь.

Methodology for risk management in large information technologies

Sergey Nikolaevich Shulzhenko, doctor of technical sciences, 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,

Kirill Alekseevich Perepelitsa, analyst,
Tinkoff Bank, Korolev, Moscow region

Currently, with an increase in the volume of information in the office work of various organizations and enterprises, it is necessary to effectively manage risks that arise at all stages of activity. The article discusses the methodology for managing these risks using both automatic collection and manual transmission of information about errors and miscalculations in large information systems.

Experts, risk management, scenario analysis, causal analysis, bug report, feedback.

При создании и использовании большой информационной системы возникает риск неучета многих ситуаций. Как правило полный анализ на все возможные ошибки не представляется возможным, поскольку занимает крайне много времени и других ресурсов.

При создании и использовании большой информационной системы воз-

никают риск неучета многих ситуаций [2]. В классической теории таких рисков применима классификация, представленная на рисунке1.



Рисунок 1 – Классическая классификация рисков

Как правило полный анализ на все возможные ошибки не представляется возможным, поскольку занимает крайне много времени и других ресурсов. Но и не отслеживать, как потенциальные, так и уже случившиеся ошибки нельзя, поскольку существует риск, что система перестанет работать, или полностью не сможет покрывать те задачи, для которых она создавалась [3]. Но как покрыть данные риски, если не перед запуском процессов или сервиса, то хотя бы во время его использования?

Как один из методов борьбы с данными рисками можно использовать метод «Bug report».

Данный метод можно использовать, как в автоматическом, так и в ручном режиме, путем создания отчета ошибок или тенденции поведения трудовой деятельности [6]. Но использование данного метода сопряжено со следующими рисками:

- 1) При не грамотной настройки сообщений, есть риск утери сообщений об ошибке или появлению ложных срабатываний.
- 2) При неверно выставленных приоритетах, критическая ошибка может разбираться после менее важных или не быть разобранной вовсе.
- 3) При множестве ошибок, может попасть в разбор ошибка с менее критичного сервиса в случае одного ответственного.
- 4) Большой общий поток ошибок может замедлить решение возникшей проблем из-за неспособности обработать быстро все ошибки ответственным
- 5) Ручная регистрация ошибок может нести ложные или неполные сведения.
- 6) Разные пользователи могут использовать разные стили и форматы для описания проблем. Это может усложнить процесс категоризации и приоритизации ошибок.
- 7) Пользователи могут иногда отправлять дубликаты отчетов об одной и той же ошибке. Это может привести к избыточной нагрузке на команду разработки и замедлить процесс исправления.

8) Некоторые пользователи могут описывать проблемы неясно или с использованием терминов, не являющихся стандартными в технической документации. Это усложняет коммуникацию и может вызвать недопонимание между пользователями и разработчиками.

9) В «Bug report» могут содержаться конфиденциальные данные или информация о безопасности, особенно если ошибка связана с уязвимостью. Необходимо обеспечивать адекватную защиту конфиденциальности при обработке таких отчетов.

Для эффективного использования метода «Bug report» а также минимизации его рисков, необходима тщательная проработка и настройка автоматической системы.

Необходимо проанализировать всю систему и поделить её процедуры и сервисы на следующие группы:

Блокирующие. Ошибки в данной части информационной системы могут полностью остановить работу всего сервиса или процедур. Также в эту категорию попадают ошибки если указана неверная или не полная информация, которая может принести к значительным прямым финансовым потерям организации, и могут нанести значительный репутационный ущерб.

Критические. Ошибки в данной части информационной системы могут частично заблокировать работу сервисов или процедур. Обходных решений при этом не имеется, но полностью работа не блокируется. Также в эту категорию попадают ошибки если указана неверная или не полная информация, которая может принести умеренным прямым фин. потерям организации, и могут нанести умеренный репутационный ущерб.

Важные. Ошибки в данной части информационной систему могут частично заблокировать работу сервисов или процедур. Обходные решения при этом имеются, но увеличивают время обработки запросов, или более дорогие в использовании. Также в эту категорию попадают ошибки если указана неверная или не полная информация, которая может принести малозначительные прямым финансовым потерям организации, и могут нанести незначительный репутационный ущерб.

Обычные. Ошибки в данной части информационной системы не блокируют работу процедур или сервисов, но влекут затруднение использование системы. Также в эту категорию попадают ошибки если указана неверная или не полная информация, которая не приведет к прямым фин. потерям организации, но может нанести незначительный репутационный ущерб.

Из статистического анализа деятельности одного из производственных предприятий можно сделать вывод о достаточно стабильном уровне влияния рассматриваемых групп, составляющих отчеты «Bug report» (рис. 2). Поэтому здесь актуальной задачей является разработка нового метода формирования отчета «Bug report», способствующего снижению рисков деятельности предприятий, с учетом того что необходимо оперировать большими массивами данных в каждом делопроизводстве.

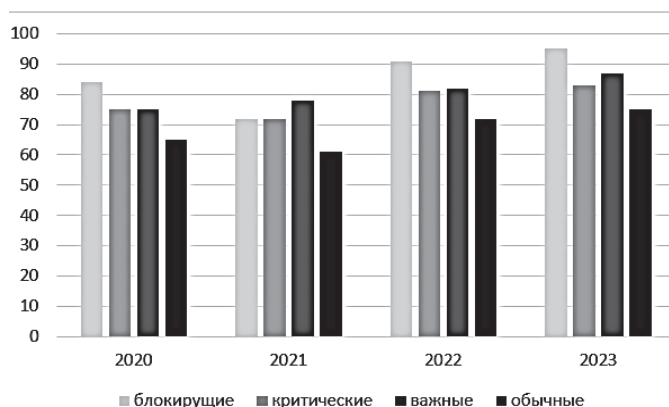


Рисунок 2 – Показатели учета групп рисков в системе на основе статистических экспертных оценок

Для снижения риска, связанного с получением неполной или неверной информации при ручном сообщении, необходимо выработать свод правил оставления сообщения обратной связи. Провести обучение сотрудников с разбором примеров, как наиболее верно оставлять обратную связь по ошибкам. При возможности автоматизировать передачу места ошибки и запись логов, для более простого анализа ответственным. Предоставленные пользователям инструкции по отправке «Bug report» должны быть четкими и простыми. Нужно объяснить, как описывать проблемы, прикладывать скриншоты или видеозаписи, и указывать шаги для воспроизведения.

Необходимо гарантировать конфиденциальность и безопасность данных в «Bug report», особенно если в них содержится конфиденциальная информация.

Также отчеты «Bug report» необходимо регулярно отправлять команде разработки. Чем больше информации будет иметь команда разработки по ошибкам, тем меньше шанс их повторного возникновения при создании и модернизации бизнес процессов в будущем. Не лишним будут и регулярные обзоры наиболее повторяющихся ошибок, или редких, но критически важных [7].

Ручной метод также позволяет снижать риски не полного анализа информационной системы тем, что пользователи могут показывать потенциально уязвимые места и вносить предложение на изменение системы в конкретном случае. Такую обратную связь должны рассматривать прямые ответственные за конкретную часть информационной системы.

Для снижения рисков, с учетом обработки больших массивов информации на предприятии предлагается использовать так называемую простую приоритезацию RICE или ICE [4]. При этом для оценки риска используем составляющие аргументы одноименной функции RICE, которая рассчитывается по формуле (1).

$$\frac{R*I*C}{E} = RICE, \quad (1)$$

где:

R – reach – аргумент влияния результата делопроизводства предприятия на множество людей - пользователей, использующих этот результат в течении определенного периода времени, посредством охвата и измеряется количеством людей за единицу времени. Например, 500 клиентов предприятия регистрируются ежемесячно и выбирают

I – impact – аргумент влияния результата делопроизводства на конкретного человека. Выбирает аргумент влияния из шкалы множественного выбора, по которой минимальное влияния 0,25, максимальное влияние, так называемое массовое 3, промежуточные значения влияния: низкое 0,5, среднее 1, высокое 2. Например выведен новый продукт деятельности предприятия, если он оказывает максимальное влияние на множество людей, то он будет равен 3.

C – confidence – аргумент влияния результата делопроизводства путем процента уверенности, также по шкале множественного выбора: 50% – неуверенность, 80% – средняя уверенность, 100% – высокая уверенность. Например, есть данные для охвата и требуемых усилий над созданием продукции, но в факторе влияния большинство не уверено, такая продукция получает 80% уверенности.

E – effort – аргумент усилий, измеряемый в человеко-месяцах, человеко-днях и т.д., показывающий работу, которую один сотрудник или служащий выполняет над созданием продукции или ее части в единицу времени. На пример по нормативным документам и планам предприятия на создание продукции требуется 1-2 недели на проектирование и 2-4 недели на разработку, в целом выставляется оценка 2 человека-месяца.

В качестве примера расчета используется выборка из трех предполагаемых делопроизводств деятельности предприятия, со значениями, представленными в таблице 1.

Таблица 1 – Расчет функции RICE score

Наименование	Reach	Impact	Confidence	Effort	RICE score
Проект 1	450	3	100%	2	675
Проект 2	2 000	1	80%	4	400
Проект 3	800	2	50%	1	800

Чем выше значение функции RICE score из рассматриваемой выборки, тем менее рискованный проект делопроизводства в деятельности организации. Соответственно расставляются и приоритетность выполнения данных проектов: 3-1-2.

Метод ICE (Impact, Confidence, Ease) – это инструмент для приоритизации задач и проектов, который оценивает каждую задачу по трем критериям: влияние (Impact), уверенность в оценке (Confidence) и легкость внедрения (Ease). Вот как выглядят эти три компонента:

Влияние (Impact): Это измерение того, насколько сильно задача или проект повлияет на цели и стратегии организации. Оценка влияния помогает определить, насколько важно решение данной задачи.

Уверенность в Оценке (Confidence): Это уровень уверенности команды в том, что оценка влияния верна. Если команда имеет большую уверенность в том, что задача имеет высокое влияние, то это может быть учтено при принятии решения.

Легкость Внедрения (Ease): Это измерение того, насколько легко и быстро задачу можно внедрить. Оценка легкости внедрения может помочь определить, насколько эффективно и быстро команда сможет выполнить задачу.

Каждый критерий оценивается по шкале, например, от 1 до 10, где 1 – низкое влияние/уверенность/легкость внедрения, а 10 – высокое. Затем эти оценки умножаются между собой, и полученное число дает приоритет задачи.

Формула ICE (2):

$$ICE = Impact \times Confidence \times Ease \quad (2)$$

Преимущества метода ICE:

Простота использования: Простота и ясность критериев оценки делают метод доступным для команд разного опыта.

Фокус на важных задачах: Метод позволяет выявить задачи с высоким влиянием, которые при этом могут быть легко внедрены.

Быстрота принятия решений: ICE позволяет быстро приоритизировать задачи и сфокусироваться на тех, которые имеют наибольший потенциал.

Недостатки метода ICE:

Отсутствие учета сроков: Метод не учитывает временные рамки и сроки задач, что может быть важным фактором в некоторых проектах.

Субъективность оценок: Оценки влияния, уверенности и легкости внедрения могут быть субъективными и зависеть от индивидуальных точек зрения участников.

Неучет зависимостей между задачами: Метод не учитывает возможные зависимости между задачами, что может влиять на общую эффективность выполнения проекта.

Метод ICE часто используется в гибких методологиях управления проектами и позволяет командам быстро определить приоритеты и сфокусироваться на ключевых задачах.

При использовании метода «Bug Report» использовать метод оценки ICE можно следующим способом:

Влияние (Impact): Оценка влияния бага на продукт и пользователей. Если баг влияет на ключевые функциональности или создает серьезные проблемы для пользователей, его влияние будет высоким.

Уверенность в Оценке (Confidence): Уровень уверенности в том, что баг действительно существует и может быть воспроизведен. Если команда разработчики уверена в наличии бага, это повышает уверенность.

Легкость Внедрения (Ease): Оценка того, насколько легко и быстро баг может быть исправлен. Это включает в себя оценку сложности исправления и возможные зависимости от других компонентов. Основные преимущества этого метода в контексте «Bug report»:

- 1) Приоритизация исправлений: Применение метода ICE для приоритизации исправлений багов. Баги с высоким Impact, высокой Confidence и относительно низкой сложностью исправления могут быть приоритетными.
- 2) Определение критичных проблем: Использование ICE для выделения критичных проблем, которые существенно влияют на пользователей или представляют высокий риск для бизнес-процессов.
- 3) Спланированное исправление: Можно запланировать исправление багов с учетом их оценок ICE. Это поможет распределить ресурсы так, чтобы сначала решались наиболее важные и критические проблемы.
- 4) Обратная связь с пользователями: после совершения исправлений нужно, обеспечить обратную связь пользователям. Это повышает уровень уверенности и может повысить доверие к процессу управления рисками.
- 5) Мониторинг и анализ трендов: Периодически проводится анализ и оценка эффективности метода ICE в контексте управления рисками. Это помогает выявить тренды и адаптировать стратегии управления рисками.

В качестве примера расчета используется выборка из трех предполагаемых ошибок, со значениями, представленными в таблице 2.

Таблица 2 – Расчет функции ICE score

Наименование	Impact аргумент	Confidence аргумент	Easy аргумент	ICE score аргумент
Ошибка 1	7	1	5	35
Ошибка 2	7	2	8	112
Ошибка 3	5	5	3	75

Как видно из примера выше, в первую очередь возьмется в исправление ошибка под номером 2, потом под номером 3 и не смотря на имеющиеся значение impact 7 возьмется в последнюю очередь. Данный метод не подойдет под критические ошибки, из-за субъективной составляющей и возможности пропустить правда важную проблему, но для всех остальных ошибок его также можно использовать.

В случае, когда невозможно точно восстановить путь, приведший к ошибке из имеющихся логов, можно использовать качественные методы исследования такие как: метод мокасин или глубинное интервью.

Метод мокасин называют подход, при котором исследователи шаг за шагом следуют пути пользователя, чтобы подробно изучить его опыт. Это включает в себя анализ каждого этапа, взаимодействия, принятых решений, проблем и удовлетворения.

Ключевые шаги «мокасин исследования» могут включать в себя:

- 1) Идентификация Этапов: Определение всех этапов взаимодействия пользователя с продуктом или услугой.
- 2) Оценка Восприятия Пользователя: Детальное изучение восприятия

пользователя на каждом этапе, включая эмоции, потребности и ожидания.

3) Оценка Интерактивных Элементов: Изучение того, как пользователи взаимодействуют с интерактивными элементами (например, кнопками, формами, меню) и как это влияет на их опыт.

4) Изучение Принятых Решений: Анализ решений, принятых пользователями на каждом этапе, и выявление факторов, влияющих на эти решения.

5) Выявление Проблем и Успехов: Определение проблем, с которыми сталкиваются пользователи, и успешных моментов в их опыте.

6) Сбор Обратной Связи: Получение обратной связи от пользователей в процессе исследования и использование ее для улучшения опыта.

7) Создание Полного Отчета: Формирование подробного отчета, описывающего каждый этап и предоставляющего рекомендации по улучшению.

Пройдя путь пользователя, можно понять в каком именно месте допускается ошибка, понять, что с процессом не так. Это может быть, как непонятный интерфейс в использовании процедуры или сервиса, отсутствие или неполные инструкции данные пользователю, или допущена ошибка в построение логики процедура или сервиса, а также другие, не очевидные причины со стороны разработки. Важно при использовании данного подхода стараться проходить путь пользователя максимально непристрастно, не опираясь на свой личный опыт.

Данный метод количественного исследования можно совместить с другим, под названием «Глубинное интервью».

Глубокие интервью – это метод качественного исследования, направленный на получение более глубокого понимания мнений, взглядов и опыта участников. Он широко используется в социологии, психологии, маркетинге и других областях для изучения сложных тем и получения подробной информации.

Вот основные характеристики метода глубоких интервью:

- 1) Цель: Глубокие интервью проводятся с целью понимания сложных и часто эмоциональных аспектов опыта, мнений, убеждений и отношений.
- 2) Структура: Интервью могут быть полуструктурированными или неструктурированными. Это позволяет исследователю гибко подходить к теме и глубже раскрывать ответы участников.
- 3) Участники: Глубокие интервью обычно проводятся с небольшим числом участников, но эти участники обладают экспертными знаниями или уникальным опытом в отношении исследуемой темы.
- 4) Исследовательская Тема: Тема исследования может быть широкой, и исследователь стремится раскрыть различные аспекты темы в ходе интервью.
- 5) Глубина Разговора: Основное внимание уделяется развернутым ответам, описаниям и переживаниям участников. Исследователь старается выйти за пределы поверхностных ответов.
- 6) Эмпатия и Открытость: Важными чертами проведения глубоких интервью являются эмпатия и открытость исследователя, что способствует доверию участников и более открытым ответам.

- 7) Анализ Качественных Данных: Полученные данные анализируются качественно. Это может включать в себя тематический анализ, кодирование и выявление общих тенденций.

Преимущества глубоких интервью включают богатство информации, получаемой от участников, возможность исследовать сложные темы и генерировать новые гипотезы. Однако, они требуют значительных ресурсов, так как проведение интервью и анализ данных может быть трудоемким. Помимо всего этого необходимо в ходе интервью создать располагающую атмосферу к максимально открытому разговору. Интервьюируемый должен знать, что, если в ходе интервью выяснится, что он совершал ошибки при пользование сервисом, процедурой, он не понесет за это наказания, ведь главная цель интервью – это найти слабые места системы и их исправить, а не искать виноватых. Также будет полезно дать возможность интервьюируемому высказываться о недостатках, не только конкретной части системы, о которой ведет речь интервьюер, а обо всех ошибках, которые он замечал, или предложений по улучшению системы. Благодаря такому подходу можно собрать значительно больше информации, и увидеть новые зоны роста информационной системы, сервиса или отдельной процедуры.

В контексте управления рисками, глубокие интервью могут быть использованы для выявления скрытых или неочевидных рисков, а также для понимания того, как участники воспринимают и реагируют на различные аспекты риска.

Вместе с тем, в больших информационных системах поток обратной связи при выявлении аргументов рассматриваемой функции может быть слишком большим. Ответственный за систему может не справляться с её обработкой. Для этих ситуаций предпочтительно использовать линию технической поддержки сотрудников. Эти сотрудники должны обслуживать всю или часть информационной системы, покрывая сервисы и процедуры нескольких ответственных. На данную линию следует возложить следующий функционал:

Отслеживание количества ошибок. Сотрудники технической линии поддержки должны получать автоматические сообщения по количеству ошибок с заранее настроенными фильтрами. В зависимости от уровня, описанного выше, должны быть настроены фильтры на процент ошибок от запуска того или иного процесса или сервиса

Обработка ручных сообщений от пользователей процессов или сервисов. Разбор и закрытие производится силами технической поддержки за исключением тех случаев, когда им не хватает опыта и компетенций. В этом случае они должны обращаться к ответственным за разъяснением или передачи задачи на ответственного за эту часть информационной системы.

Исправление ошибок, полученных от автоматического сбора системы. Также в случае они должны обращаться к ответственным за разъяснением или передачи задачи на ответственного за эту часть информационной системы.

Благодаря такому разделению, ответственные за систему будут иметь больше времени на свои плановые задачи по улучшению текущей системы и других задач, а обратная связь и проблемы в процессах или сервисах будут решаться быстрее.

Ручные сообщения об ошибках третий и четвертой категории, могут от-

правляться не только на линию поддержки пользователей, но и на прямую ответственному за процедуру или сервис, если не требуется срочного их исправления. Это относится и к предложениям по улучшению системы, при нахождении пользователем потенциальных или текущим проблемам, а также к пожеланиям для большего удобства работы с системой.

Не все улучшения необходимо реализовывать сразу, но те, что будут планироваться для реализации позже, или оставлены как идея для дальнейшей проработки и улучшения информационной системы должны храниться в специальном хранилище. Данное хранилище требуется проверять с выбранной периодичностью с целью валидации обратной связи, удаления уже не актуальной и поиска новых решений для улучшения текущей системы. Наиболее востребовано такое хранилище при применении процессного подхода при построении бизнес процесса. Краткая схему процессного подхода описана на рисунке 3.

Концепция процессного подхода

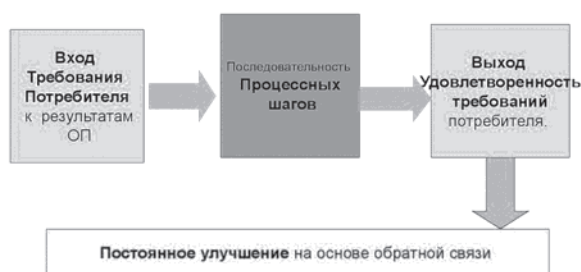


Рисунок 3 – Схема процессного подхода. Роль обратной связи

Процессный подход еще можно описать как – бесконечное улучшение процесса. В контексте управления рисками ключевые аспекты этого подхода:

1) Идентификация рисков. Определение ключевых рисков в бизнес-процессах в организации.

2) Поиск возможностей для оптимизации процессов с целью улучшения эффективности, сокращения времени выполнения и ресурсов или уменьшения рисков.

3) Распределение ролей и обязанностей в рамках каждого процесса. Это способствует повышению эффективности каждого члена команды за счет более ясного понимания своей роли и ответственности.

4) Измерение и оценка каждого возможного риска при его обнаружении. Это позволяет более эффективно распределять ресурсы для предотвращения возможных рисков или их контроля.

5) Реализация системы контроля за выполнением процессов, сервисов и их изменениями.

6) Обучение сотрудников, участвующих в процессах, и обеспечение их развития. Это важно для того, чтобы уровень компетенции соответствовал тре-

бованиям эффективного выполнения процессов.

7) Внедрение культуры постоянного совершенствования, основанной на обратной связи, анализе производительности и инновациях.

И метод «Bug report» отлично позволяет реализовывать данный подход за счет того, что:

Специалисты по управлению рисками могут проводить регулярный анализ полученных сообщений [1, С. 23]. Это включает в себя изучение деталей каждого отчета, включая классификацию риска, комментарии пользователей и другие дополнительные сведения.

На основе анализа отчетов специалисты могут выявлять уязвимости в бизнес-процессах, технических системах или взаимодействиях с клиентами. Это может включать в себя как технические проблемы, так и организационные аспекты, которые могут представлять потенциальные риски.

На основе выявленных уязвимостей специалисты могут предложить конкретные улучшения и меры по снижению рисков. Эти улучшения включает в себя различные процессные изменения, реструктуризацию систем безопасности, а также эффективное обучение персонала и сотрудников предприятия для более детального и определенного управления рисками [5, С. 102].

В необходимых случаях специалисты должны общаться с пользователями, которые отправляют отчеты Risk Reports, с целью уточнений и конкретизации информации. Данное взаимодействие является важнейшим этапом для полноценного и адекватного понимания масштаба потенциального риска.

Приобретенные знания и аналитический опыт анализа Risk Reports используется для улучшения систем мониторинга и реагирования на риски в реальном времени.

При этом эффективная система управления рисками, особенно при больших потоках входящей информации по делопроизводству базируется как раз на этом опыте.

Наглядная информация получается благодаря созданию автоматизированной системы статистической сборки. Она показывает фрагмент той части системы, на которую приходится наибольший объем по отчету сообщений об ошибках и это сигнализирует о необходимости досконального изучения этой части информационной системы и дальнейшей переоценки влияющих факторов.

Для более эффективного управления рисками их классификацию необходимо постоянно пересматривать, получая новые данные. Данное решение в теории рисков принято называть как win-win, когда выигрывают все. При этом заказчики получают качественную продукцию и при этом наблюдают за собственным влиянием на производственные процессы, и это позволяет им активизироваться в значительной степени.

Возможные улучшения части системы при этом приобретаются за счет получения предложений заказчиков. Сотрудники предприятия видят индикацию проблемных мест, что дает возможность прогнозировать возможные зоны роста.

Точный регламент работы при этом очень важен и для сотрудников технической поддержки и для ответственных за производство и сервис. Очень важен своевременный анализ ручных обратных связей для сокращения выявленных и прогнозируемых ошибок в отчетах.

Улучшение коммуникативности между сотрудниками при приеме обратных связей от заказчиков и пользователей продукции предприятия дает возможность вести хронологию с сохранением изменения и исправления ошибок в отчетах [8].

Нельзя сказать, что этот метод полностью универсальный, так как каждый инструмент нужно применять правильно, но при умелом использовании выше перечисленных способов, можно добиться большей устойчивости предприятия к потенциальным рискам.

Также важно уделить внимания развитию сотрудников в качестве экспертов, и создания для этого всех условий. Требуется создать систему обучения, которая сделает данный инструмент наиболее полезным. Обратная связь должна реализоваться таким образом, чтоб пользователи чувствовали свой личный вклад в общее дело.

Результат расчета по предлагаемому методу снижения рисков по алгоритму простой приоритизации RICE для предприятия – представителя позволяет правильно расставить приоритетность выполнения и спланировать очередность, с учетом показателя функции RICE score как результирующие элементы отчета «Bug report». В рассматриваемом примере из значений этой функции: 675, 400 и 800 соответственно по порядку представления исходных данных этих проектов, расставляем очередность 3-2-1, снижая тем самым производственные и информационные риски.

Предлагаемый метод управления рисками помогает найти новые решения при совершенствовании текущих производственных процессов предприятия.

Литература

1. Алиева С.Э. Антикризисное управление рисками в организации // Вестник научных конференций. 2020. № 3-2(55). С. 23-25.
2. Барикаев Е.Н. Управление предпринимательскими рисками в системе экономической безопасности. М.: Юнити-Дана, 2013. 96 с.
3. Волков А.В. Управление рисками в коммерческом банке. М.: Омега-Л. 2019. 320 с.
4. Вяткин В.Н., Гамза В.А., Маевский Ф.В. Риск-менеджмент. М.: Юрайт, 2017. 366 с.
5. Горелова Т.П. Антикризисное управление как драйвер развития предприятия в условиях неопределенности // Проблемы теории и практики управления. 2021. № 2. С. 96-116.
6. Кован С.Е. Антикризисный менеджмент. Антикризисный консалтинг. Решение типовых задач. Практикум: Учебное пособие. М.: Общество с ограниченной ответственностью «Проспект», 2019. 192 с.
7. Тактаров Г.А. Григорьева Е.М. Финансовая среда предпринимательства и предпринимательские риски. М.: Кнорус, 2015. 256 с.
8. Хузиева Э.Ф., Талова А.К. Коммуникации в управлении. Современные тенденции развития. Проблемы в коммуникации // Современная экономика: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XX Международной научно-практической конференции. 2018. С. 11-13.

УДК 004.05

Поддержка принятия решений на основе правил доказательной аргументации

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

Проблемы современных систем поддержки принятия решений состоят в том, что немногие из них решают задачу обнаружения неточности классификации, когда в описании запроса содержится неточная или непоследовательная информация. На основе анализа числовых и текстовых характеристик запросов, а также правил доказательной аргументации, разработан классификатор запросов. Проведена оценка производительности классификации запросов, определена вероятность и степень уверенности признака запроса.

Точность запроса; чувствительность запроса; прецизионность запроса.

Decision support based on rules of evidence-based reasoning

Igor Ivanovich Kovalev, Candidate of technical Sciences, Associate Professor,
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 problem with current decision support systems is that few of them solve the problem of detecting misclassification when the query description contains inaccurate or inconsistent information. Based on the analysis of numerical and textual characteristics of queries, as well as the rules of evidentiary argumentation, a query classifier was developed. The performance of query classification was assessed and the probability and degree of confidence of the query attribute was determined.

Query accuracy; request sensitivity; query precision.

Введение

Из-за сложности телекоммуникационных технологий, когда клиенты жалуются на сбой в обслуживании или программном продукте, появляется много неопределенной или противоречивой информации [2, С.15;3, С.6;4, С.14]. Непо-

следовательная информация в описаниях заявок пользователей сильно влияет на технических специалистов, когда они выносят суждение о причинах рекламации [5, С.6]. Актуальна разработка системы поддержки принятия решений на основе правил доказательной аргументации, чтобы повысить эффективность обработки заявок.

Результаты исследования

Запрос предназначен для выбора информации из базы/хранилища данных/знаний и ее последующей обработки по заданному правилу/правилам.

Рассмотрим схему обработки запросов в СППР на рисунке 1.



Рисунок 1 – Типовая схема обработки запроса

На рисунке 1 приняты следующие обозначения цифрами:

- 1 – формирование текста запроса;
- 2 – формирование параметров запроса для реализации условия отбора при классификации;
- 3 – запуск на выполнение запроса;
- 4 – получение выборки по результатам выполнения запроса;
- 5 – выгрузка результата выполнения запроса;
- 6 – построение сводной таблицы по результатам выполнения запроса.

Для классификации запросов предлагается классификатор, на основе которого строится схема взаимодействия интерфейса пользователя с сервером базы данных (рисунок 2).

Схематично процедуры извлечения и выбора признаков с использованием технологии автоматического машинного обучения представлены на рисунке 3.

У запроса есть числовые и текстовые характеристики [9, С.268]. К числовым характеристикам относятся следующие параметры: интенсивность запросов, время пересылки и обработки запросов, объёмы запросов и ответов на запросы. Методики измерения и оптимизация этих параметров подробно описаны в [1, С.46;6, С.55].

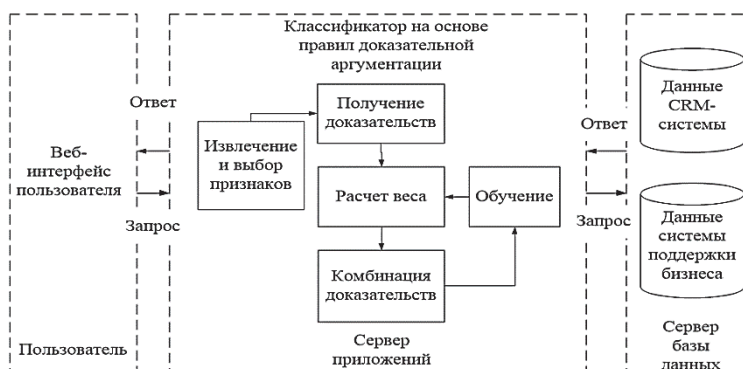


Рисунок 2 – Схема взаимодействия интерфейса пользователя с сервером базы данных с помощью классификатора запросов

На входе классификатора, представленного на рисунке 2, характеристики запросы (числовые и текстовые). На выходе классификатора – прогнозируемые степени уверенности (обычно обозначаются p_{ni}), соответствующие заранее определенному классу запроса.

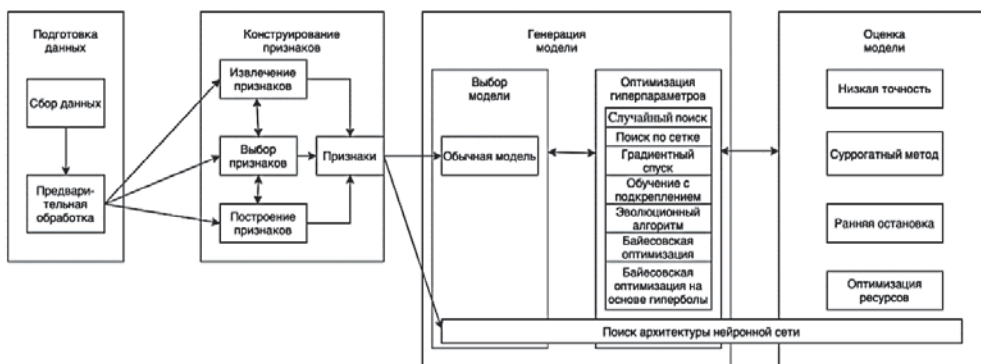


Рисунок 3 – Схема конструирования признаков и генерации модели оптимизации параметров запросов

На рисунке 3 показаны пути оптимизации параметров запросов с помощью классификатора на основе правил доказательной аргументации для повышения производительности обработки.

Для того чтобы охарактеризовать запрос, сначала выбираются текстовые признаки. Отобразить текстовые характеристики запроса в математическом виде можно с помощью математической модели векторного пространства, показанной в геометрической интерпретации на рисунке 4.

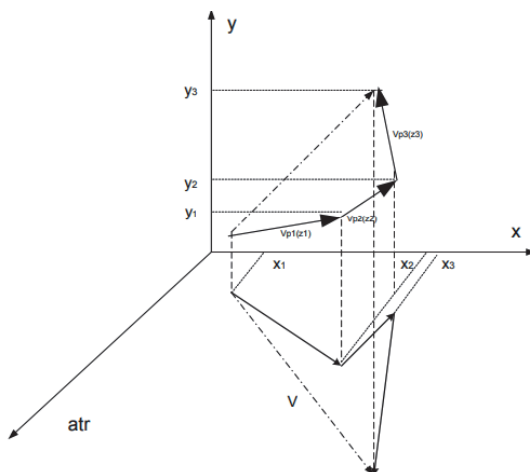


Рисунок 4 – Геометрический смысл векторного представления текста запроса

Модель, представленная на рисунке 4, трехмерная, характеризует координаты x_i и y_i вектора цели; atr – атрибут, который имеет каждая координата. Единицы измерения координат вектора: слова, именные группы, отдельные предложения, смысловые группы предложений, абзацы и т.д. Атрибуты координаты x_1 : atr_x = (во все времена), атрибуты координаты y_1 : atr_y = (одни и те же).

Для определения весов векторов (то есть количества компонент, которые равны 1) применяется метод TF-IDF (от англ. TF – term frequency, IDF – inverse document frequency – статистическая мера, используемая для оценки важности слова в контексте документа) [8, С.488]. Оценка по методу TF-IDF находится в диапазоне значений $[0;1]$.

В правилах доказательной аргументации надежность и вес доказательств определяются отдельно. В подходе доказательной аргументации для многокритериальных задач принятия решений оценка альтернативы по каждому критерию рассматривается как свидетельство, а вес свидетельства равен весу критерия. В результаты классификации вносят больший вклад те доказательства (свидетельства), которые являются более важными [10, С.181].

Доказательство (свидетельство) зависит от значений связанных свойств, его можно представить следующим образом

$$e_\gamma = \{(y_n, p_N), n=1, 2, \dots, N\}, \quad (1)$$

где y_n – класс запроса; p_N ($p_N = 1/N$) – степень доверия (уверенности) в соответствии с определенным признаком; N – количество классов запросов.

Пусть $d_{j\gamma}$ обозначает евклидово расстояние между свидетельством e_j и равномерным распределением e_γ .

$$d_{j\gamma} = d(e_j, e_\gamma) = \sqrt{\sum_{n=1}^N (p_{n,j} - p_N)^2}, j = 1, \dots, L, d_{j\gamma} \in [0,1], \quad (2)$$

где L – количество ссылочных значений A_{ij} ($j=1, \dots, L$).

Из (2) можно сделать вывод, что при $N \rightarrow \infty$ $d_{j\gamma} \rightarrow 0$. Чем больше евклидово расстояние, тем выше важность доказательства e_j . Таким образом, важность доказательства e_j увеличивается, при увеличении евклидова расстояния $d_{j\gamma}$.

Чтобы оценить стоимость признаков запроса, разделяют номинальную стоимость и числовую. Пусть для характеристики запроса x используются M признаков. Если эти признаки номинальные, то каждая характеристика x_i ($i=1, \dots, M$) имеет L ссылочных значений A_{ij} ($j=1, \dots, L$), и можно выделить N возможных классов, которым может принадлежать запрос. Соответственно, имеется $M \cdot L$ доказательств. Определенный образец запроса пользователя x активирует M доказательств e_i ($i=1, \dots, M$).

При определении числовой стоимости для определенного образца запроса пользователя $x = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_M)$ с числовыми функциями, функция x_i активирует два соседних элемента доказательства e_j^i с активированным весом $\alpha_{i,j}$ и e_{j+1}^i с активированным весом $\alpha_{i,j+1}$, если признак x_i принимает свое значение в интервале $[A_{j,j}^i, A_{j+1,j}^i]$. Преобразование информации используется для генерации активированных весов [7, С.28].

$$\alpha_{i,j} = \frac{A_{j+1,j}^i - x_i}{A_{j+1,j}^i - A_{j,j}^i} \text{ и } \alpha_{i,j+1} = 1 - \alpha_{i,j}, \text{ при } A_{j,j}^i \leq x_i \leq A_{j+1,j}^i, i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, L, \quad (3)$$

$$\alpha_{i,j'} = 0, \quad j' = 1, \dots, L, \quad j' \neq j, j + 1.$$

Из (3) следует

$$e_i = \{(y_n, p_{n,i}), n = 1, \dots, N, i = 1, \dots, M\},$$

$$p_{n,i} = \alpha_{i,j} p_{n,j} + \alpha_{i,j+1} p_{n,j+1}, j = 1, \dots, L \quad (4)$$

В (4) p_{ni} – это степень уверенности, с которой класс считается y_n , учитывая, что функция x_i активирует e_j^i и e_{j+1}^i одновременно [11, С.183]. Между тем, вес w_i и надежность r_i доказательства e_i могут быть вычислены как взвешенная сумма таковых двух соседних частей доказательства. То есть

$$w_i = \alpha_{i,j} w_j^i + \alpha_{i,j+1} w_{j+1}^i \text{ и}$$

$$r_i = \alpha_{i,j} r_j^i + \alpha_{i,j+1} r_{j+1}^i, i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, L. \quad (5)$$

Правила доказательной аргументации используют для объединения активированных свидетельств с их с весами соотношение

$$O(x) = \{(y_n, p_{n,e(M)}), n=1, \dots, N\}, \quad (6)$$

где определенная выборка x принадлежит определенному классу y_n , кото-

рый имеет максимальную степень доверия $p_{n,e(M)}$.

Практическое применение исследований: проектирование системы поддержки принятия решений на основе правил доказательной аргументации для оператора сотовой связи. Проведен анализ случаев, когда абоненты опрошенного оператора мобильной связи обращались с жалобами на услуги связи. Различные заявки на определенные услуги классифицированы и переданы для решения в отдел технической поддержки.

Типичный процесс рассмотрения заявок в мобильной связи заключается в следующем. Когда администраторы в центре обслуживания клиентов получают заявку клиента, они записывают ее и решают, является ли заявка действительной, исходя из своего опыта или использования CRM-систем. Если они смогут обработать заявку и разрешить ее самостоятельно, они отправят отзыв непосредственно клиенту. В противном случае они передадут заявку в соответствующие отделы сервисной поддержки. Технические специалисты отделов проанализируют причины жалоб, предложат решения и отправят отзывы клиентам. При вынесении решения о причине жалоб технические специалисты должны эффективно использовать как информацию из систем поддержки бизнеса, так и описания жалоб клиентов. Затем заявки будут разделены на две категории, включая класс качества сети (*NQC*) и класс абонентского терминала (*CTC*) в зависимости от причины жалоб.

Образцы данных включают подробную информацию о запросах пользователей, результатах обработки и соответствующих отзывах клиентов. В запросах исследуемой компании выделено шесть числовых характеристик:

- (1) D – поступает ли заявка из области, где действуют помехи сигнала;
- (2) E – поступает ли заявка из места скопления людей;
- (3) CT – поступает ли заявка в период скопления людей;
- (4) BS – исправное ли рабочее состояние текущей базовой станции;
- (5) B – поступает ли заявка из области со слабым сигналом;
- (6) MP – существует ли проблема совместимости между сетью мобильной связи и терминалом, используемым подающим заявку пользователем.

Все функции представлены тремя ссылочными значениями {ноль, один, неизвестно/ unknown}, где ноль означает «НЕТ», один – «ДА», а unknown представляет отсутствующую или неизвестную информацию.

Из-за того, что полученная информация часто противоречива, техническим специалистам сложно делать точные суждения, что приводит к неточности классификации. Сбор данных включает описания заявок, которые направлены клиентами в отдел технической поддержки телекоммуникационной компании, период – три месяца. Всего после устранения некоторых недействительных заявок получено 1433 записи в качестве выборочных данных. Образцы данных содержат подробную информацию о заявках пользователей, результатах обработки и соответствующих отзывах клиентов. Типичная запись о заявке показывает время и место сбоя обслуживания, описание клиентом восприятия сетевых услуг, таких как медленный доступ в Интернет и/или низкое качество связи.

Поскольку значений шести ключевых характеристик, по которым прово-

дился анализ, может быть недостаточно для технических специалистов для принятия точного решения, текстовые элементы извлекаются из описаний заявки, чтобы охарактеризовать заявку, а затем отбираются для классификации вместе с шестью ключевыми характеристиками, указанными выше. Метод TF-IDF используется для извлечения текстовых функций. В соответствии со значениями коэффициента передачи информации для функций при классификации выбираются десять основных текстовых функций, как показано в таблице 1. Из таблицы 1 видно, что значения TF-IDF этих десяти текстовых функций для каждого описания заявки являются непрерывными, они будут дискретизированы до сбора доказательств. Их ссылочные значения установлены равными $\{0, 0,33, 0,66\}$ в соответствии с интервалом данных.

Доказательства для каждой особенности получены с помощью байесовской статистики. Возьмем, к примеру, функцию D . D указывает, поступила ли заявка из района, где действуют помехи сигнала. Поскольку значение признака D дискретно, его ссылочное значение $A_j^i = \{1, 0, \text{unknown}\}$.

Таблица 1 – Основные текстовые функции

ID функции	Текст	Коэффициент передачи информации
F1	Вечер	0.0108
F2	Веб-страница	0.0104
F3	Функция	0.0103
F4	Открыть	0.0102
F5	Только	0.0101
F6	Начинать	0.0100
F7	Отказ	0.0098
F8	Скорость	0.0098
F9	Данные	0.0097
F10	Вызов	0.0010

Три части свидетельства, относящиеся к признаку D , могут быть описаны следующим образом:

$$e_1^D = \{(NQC, 1), (CTC, 0)\}, \quad (7)$$

$$e_2^D = \{(NQC, 0.4916), (CTC, 0.5084)\}, \quad (8)$$

$$e_3^D = \{(NQC, 0), (CTC, 0)\}. \quad (9)$$

Вероятность c_{nj} и степень достоверности p_{nj} признака D могут быть получены с использованием уравнений (7) и (8), как показано в таблице 2. Это означает, что если значение признака D заявки равно 1, вероятность того, что заявка принадлежит NQC , составляет 100%. В противном случае заявка принадлежит NQC с вероятностью 49,16% и CTC с вероятностью 50,84%.

Если информация об объектах является неполной из-за отсутствия данных в записях, расчет вероятности будет незнанием. В схеме правил доказательной аргументации незнание представлено степенью уверенности, присвоенной атрибуту со значением «неизвестно».

Таблица 2 – Вероятность и степень уверенности признака D

		Референтные значения D		
		1 (e_1)	0 (e_2)	Неизвестный (e_3)
Правдоподобие	NQC	0,033	0,967	0
	CTC	0	1	0
Степень уверенности	MTNQC	1	0,4916	0
	CTC	0	0,5084	0

Возьмем, к примеру, функцию MP . Его ссылочное значение A_j^i является одним из значений в наборе $\{1, 0, \text{unknown}\}$, и свидетельство, связанное с каждым из ссылочных значений признака, выглядит следующим образом.

$$e_{1}^{MP} = \{(NQC, 0.6826), (CTC, 0.3174)\},$$

$$e_{2}^{MP} = \{(NQC, 0.2439), (CTC, 0.7561)\},$$

$$e_{3}^{MP} = \{(NQC, 0.0971), (CTC, 0.9029)\}.$$

Для подтверждения веса и надежности определяется распределение $e_\gamma = \{(y_n, p_N)\}$, $n=1, 2, \dots, 16\}$, которое представляет собой свидетельство без какой-либо возможности классификации. Поскольку всего для классификации используются 10 текстовых и 6 числовых признаков, p_N является константой со значением $1/16$. Вес каждого доказательства определяется уравнением (3). Доказательства, связанные с шестью числовыми характеристиками и их весами, перечислены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики доказательств

Функция	Значение	Свидетельство	NQC	CTC	Вес
D	1	e_1^D	1.0000	0.0000	0.8496
	0	e_2^D	0.4900	0.5100	0.4717
	unknown	e_3^D	0.0000	0.0000	0.2355
F	1	e_1^F	0.2360	0.7640	0.6012
	0	e_2^F	0.6309	0.3692	0.5063
	unknown	e_3^F	0.0000	0.0000	0.2355
CT	1	e_1^{CT}	0.0000	1.0000	0.8498
	0	e_2^{CT}	0.6794	0.3205	0.5354
	unknown	e_3^{CT}	0.0000	0.0000	0.2358
BS	1	e_1^{BS}	0.4912	0.5087	0.4717
	0	e_2^{BS}	0.9004	0.0998	0.7368
	unknown	e_3^{BS}	0.0000	0.0000	0.2358
B	1	e_1^B	0.9600	0.0400	0.8035
	0	e_2^B	0.3295	0.6706	0.5297
	unknown	e_3^B	0.0000	0.0000	0.2357
MP	1	e_1^{MP}	0.6825	0.3172	0.5374

Функция	Значение	Свидетельство	NQC	СТС	Вес
	0	e_2^{MP}	0.2438	0.7562	0.5943
	unknown	e_3^{MP}	0.09712	0.9028	0.7394

Надежность свидетельства изначально устанавливается равной его весу в контексте классификации, а затем обучается на основе выборочных данных. Функция *Fmincon* в наборе инструментов оптимизации Matlab's используется для поиска оптимальной надежности каждой части свидетельства. Эта функция минимизирует евклидово расстояние между реальным выходом и объединенным выходом классификатора на основе правил доказательной аргументации.

После того, как запрос/заявка пользователя поступает в систему поддержки принятия решений, основанную на доказательствах, каждое свидетельство, относящееся к функциям, активируется и объединяется рекурсивной аналитической моделью правил доказательной аргументации. В исследовании используется матрица неточностей для измерения эффективности классификатора на основе правил доказательной аргументации. Матрица неточностей представляет собой таблицу с двумя строками и двумя столбцами, которые представляют количество истинно положительных (*TP*), ложноположительных (*FP*), ложноотрицательных (*FN*) и истинно отрицательных (*TN*) классов заявки, как показано в таблице 4.

Таблица 4 – Матрица неточностей

		Прогнозируемый класс	
		NQC	СТС
Актуальный класс заявки	NQC	Истинно положительный (TP)	Ложноотрицательный (FN)
	СТС	Ложноположительный (FP)	Истинно отрицательный (TN)

Если запрос/заявка, которая фактически принадлежит NQC, прогнозируется как NQC, она засчитывается как истинно положительная; если она классифицируется как СТС, он считается ложноотрицательным. Если запрос/заявка, фактически принадлежащая СТС, классифицируется как NQC, она считается ложноположительной; если он классифицируется как СТС, он считается истинно отрицательным. Введены четыре показателя эффективности: точность A_c , отзывчивость (или чувствительность) S_e , прецизионность P_r и *F*-мера F_m , которые рассчитываются в эксперименте по обработке *M* запросов посредством десятикратной перекрестной проверки.

$$A_c = \frac{TP+TN}{M}, \quad (10)$$

$$S_e = \frac{TP}{TP+FN}, \quad (11)$$

$$P_r = \frac{TP}{TP+FP}, \quad (12)$$

$$F_m = \frac{2}{\frac{1}{Pr} + \frac{1}{Se}}. \quad (13)$$

Точность A_c – это измерение того, насколько часто классификатор верен. Напоминание, известное как чувствительность S_e или показатель истинных положительных результатов, предназначено для измерения того, как часто классификатор предсказывал NQC , когда заявка пользователя фактически принадлежит NQC . Прецизионность P_r , также называемая положительной прогностической ценностью, – это количество NQC , деленное на общее количество элементов, помеченных как принадлежащие NQC . F-мера F_m (или оценка F1) – это мера точности исследования с учетом как прецизионности, так и отзыва. TP – истинно положительные классы запросов. TN – истинно отрицательные классы запросов.

Для эксперимента выбраны десять текстовых и шесть числовых функций. Десятикратная перекрестная проверка проводится для оценки надежности предложенной модели классификации. Модель обучалась и тестировалась соответственно десять раз. Средние значения десятикратной перекрестной проверки (т.е. десять значений) по четырем параметрам производительности, описанным выше, показаны в таблице 5.

Таблица 5 – Средние значения результатов десятикратной перекрестной проверки

	Точность	Прецизионность	Отзыв	F-мера
Обучение	0.8591	0.9259	0.8416	0.8817
Тестирование	0.8527	0.9188	0.8383	0.8762

Эффективность классификации предлагаемого классификатора на основе правил доказательной аргументации может варьироваться в зависимости от количества функций. Чтобы повысить предсказательную способность модели классификации, ниже анализируются характеристики модели с различными текстовыми и числовыми функциями. Сравнение показателей эффективности показано на рисунке 5. Буквой D по оси ординат на рисунке 5 обозначена вероятность и степень уверенности признака.

Количество текстовых функций изменено с десяти до пятидесяти для сравнения. Эксперименты показывают, что классификация шестнадцати функций дает в целом высокую производительность. Это также указывает на то, что необходимо извлекать текстовые элементы из описаний клиентов для лиц, принимающих решения, хотя в описаниях заявок присутствует неопределенная и противоречивая информация.

Для построения классификаторов часто используются классические инструменты вероятностного моделирования, включая логистическую регрессию (LR), байесовские сети (BN) и наивный байесовский алгоритм (NB), а также невероятностные методы, включая опорную векторную машину (SVM) и дерево решений $J48$. Кроме того, для расчета принимаются типичные классификаторы ансамбля, включая случайный лес, упаковку в мешки и бустинг (adaboost).

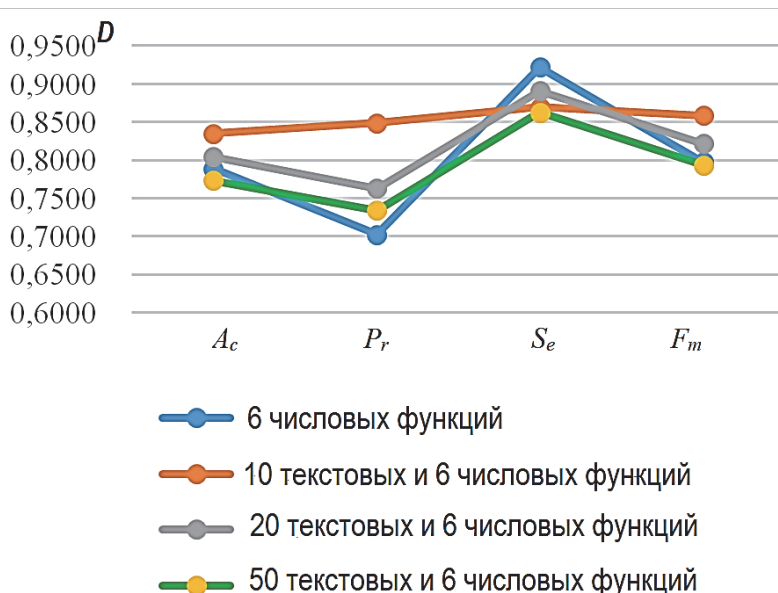


Рисунок 5 – Производительность классификации с разным количеством признаков

Чтобы сравнить эффективность их классификации с производительностью предложенного классификатора на основе правил доказательной аргументации, все девять классификаторов обучаются с использованием одного и того же набора данных. За исключением классификатора на основе правил доказательной аргументации, реализованного в программном обеспечении Matlab, остальные семь классификаторов разрабатываются в программном обеспечении WEKA, инструментарии интеллектуального анализа данных с открытым исходным кодом. Все параметры алгоритмов обучения восьми классификаторов принимают значения по умолчанию в программном обеспечении WEKA.

Эффективность восьми классификаторов с 16 признаками показана в таблице 6. Показатели эффективности указывают на то, что классификатор на основе правил доказательной аргументации имеет конкурентоспособные характеристики по сравнению с другими классификаторами, когда для классификации используются как текстовые, так и числовые признаки. Имеется небольшое улучшение значений точности классификатора на основе правил доказательной аргументации, по сравнению с вероятностным классификатором и с ансамблевым классификатором.

Из сравнительного анализа видно, что предлагаемая СППР на основе доказательной аргументации имеет нижеприведенные преимущества.

Во-первых, она обеспечивает управляемый данными и вероятностный инструмент моделирования, когда все доказательства, их вес и надежность сформулированы на основе реальных данных.

Таблица 6 – Эффективность девяти классификаторов с шестнадцатью характеристиками

	Точность	Прецизионность	Отзыв	F-мера
Классификация на основе правил доказательной аргументации	0.8559	0.9221	0.8400	0.8789
Сеть Байеса	0.8570	0.8570	0.8600	0.8550
Наивный байесовский классификатор	0.8530	0.8530	0.8570	0.8520
Логистическая регрессия	0.8420	0.8420	0.8420	0.8420
Метод опорных векторов	0.8000	0.8000	0.8440	0.7870
Дерево решений (J48)	0.8591	0.8590	0.8751	0.8550
Бустинг (Adaboost)	0.8300	0.8300	0.8310	0.8280
Случайный лес	0.8540	0.8540	0.8751	0.8490

Во-вторых, он может агрегировать противоречивые доказательства в условиях неопределенности для классификации. Свидетельство определяется распределением убеждений по силовому набору структуры различения. Естественная и гибкая форма распределения вероятностей позволяет делать неточные рассуждения на любом уровне абстракции.

В-третьих, его можно использовать для объединения разнородных данных из нескольких источников для принятия решений.

Одним из возможных ограничений является то, что как структурированные данные из систем поддержки принятия решений, так и неструктурированные данные из описаний заявок/запросов должны быть преобразованы в доказательства для принятия решений.

Выводы

Разработана система поддержки принятия решений, основанная на доказательной аргументации, для обработки заявок пользователей в мобильной связи. Неопределенная информация формулируется как распределение убеждений, а роли различных характеристик различаются посредством соответствующих свидетельств с разной степенью надежности и веса.

Предлагаемый классификатор доказательной аргументации, основанный на правилах, снабжен внутренними функциями для обработки недостающих данных без удаления или вменения.

В эмпирическом исследовании выбираются шесть числовых и десять текстовых характеристик, относящихся к качеству связи, для характеристики заявки потребителя мобильной связи. Описан систематический процесс рассмотрения

заявок и выделены входы-выходы предлагаемого классификатора.

Экспериментальные результаты показывают его высокую точность классификации, которая конкурирует с классическими вероятностными моделями. Производительность предлагаемого классификатора на основе правил доказательной аргументации превосходит некоторые классификаторы ансамбля, такие как классификаторы посредством «Мешков» и бустинг (Adaboost).

Предлагаемая интеллектуальная СППР на базе Интернета предоставляет техническим специалистам по телекоммуникациям информативную и основанную на знаниях методологию систематической и автоматической обработки заявок клиентов.

Литература

1. Аббасова Т.С., Артюшенко В.М., Акимкина Э.Э. Повышение эффективности систем поддержки принятия решений на основе многомерных хранилищ данных: монография. Москва-Берлин. Издательство: ООО «Директ-Медиа». 2021. 128 с.
2. Аббасова Т.С., Ганюшина Ю.Н., Ганюшин А.А. Автоматизация делопроизводства организации / Матрица научного познания. 2022. № 5-1. С. 14-27.
3. Аббасова Т.С., Гурин Д.В., Ребрунова А.И., Аббасов Э.М. Построение эластичной промышленной среды на собственных аппаратных ресурсах для облачных приложений // Эволюционные процессы информационных технологий. Сборник научных статей по материалам 8-й Международной научно-технической конференции 4 апреля 2023. Бургас: Изд-во ИГНЭИТ, 2023. С. 4-12 (178 с.).
4. Аббасова Т.С., Златов М.М., Чибисова О.В., Петровская З.В. Исследование характеристик автоматизированного рабочего места сетевого программиста // Эволюционные процессы информационных технологий. Сборник научных статей по материалам 8-й Международной научно-технической конференции 4 апреля 2023. Бургас: Изд-во ИГНЭИТ, 2023. С.13-19 (178 с.).
5. Аббасова Т.С., Чибисова О.В. Разработка модуля клиент-серверного приложения для оптимизации работы оперативно-диспетчерской группы // Информационно-технологический вестник. 2022. № 1(31). С. 3-13.
6. Артюшенко В.М., Акимкина Э.Э. Имитационная модель адаптивной системы поддержки принятия решений // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2018. № 2. С. 46-56.
7. Бурлаева Е.И., Павлыш В.Н. Проект построения алгоритма классификации текстовых документов // Проблемы искусственного интеллекта. 2017. № 4(7). С. 24-31.
8. Егоров Д.П., Егоров А.И., Федотов А.А., Кравченко О.В. Классификация текстовых сообщений с помощью TF-IDF и word2vec // Цивилизация знаний: российские реалии. Сборник трудов XXI Международной научной конференции. 2020. С. 487-490.

9. Кривошеев Н.А., Спицын В.Г. Методы машинного обучения для классификации текстовой информации // Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению «Графикон». 2019. № 29. С. 266-269.
10. Оськина К.А. Оптимизация метода классификации текстов, основанного на TF-IDF, за счет введения дополнительных коэффициентов // Вестник Московского государственного лингвистического университета. 2016. № 15(754). С. 175-187.
11. Янина А.О., Воронцов К.В. Мультимодальные тематические модели для разведочного поиска в коллективном блоге // Машинное обучение и анализ данных. 2016. Т. 2. № 2. С. 173-186.

УДК 004.415.25

Эффективная реализация криптоалгоритмов российских стандартов на мобильных устройствах

Павел Борисович Хорев, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры прикладной математики и искусственного интеллекта,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»), г. Москва,
Иван Сергеевич Павлов, разработчик, ООО «ВБ ТЕХ», г. Москва

Рассматриваются методы эффективной реализации криптоалгоритмов российских стандартов (на примере алгоритма симметричного блочного шифрования «Магма» и алгоритма криптографического хеширования «Стрибог») на мобильных устройствах. Разработаны мобильные приложения для устройств под управлением операционной системы Android, реализующие предложенные методы. Проведено тестирование мобильных приложений на различных устройствах. На основе результатов проведенного тестирования сделаны выводы об эффективности различных методов.

Криптографические алгоритмы, российские стандарты, эффективная реализация, мобильное приложение.

Effective Implementation of Cryptographic Algorithms of Russian Standards on Mobile Devices

Pavel Borisovich Khorev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor of the Department of Applied Mathematics and Artificial Intelligence,
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
(NRU «MPEI»), Moscow,
Ivan Sergeevich Pavlov, Developer, LLC «WB TECH», Moscow

Methods for the effective implementation of cryptographic algorithms of Russian standards (on the example of the symmetric block encryption algorithm «Magma» and the cryptographic hashing algorithm «Stribog») on mobile devices are considered. Mobile applications have been developed for devices running the Android operating system that implement the proposed methods. Mobile applications were tested on various devices. Based on the results of the testing, conclusions are made about the effectiveness of various methods.

Cryptographic algorithms, Russian standards, effective implementation, mobile application.

Введение. В обеспечении информационной безопасности компьютерных систем и сетей важное место занимают криптографические методы и средства защиты данных. Конфиденциальность информации обеспечивается ее шифрованием, а подлинность и целостность данных – с помощью их электронной подписи и криптографического хеширования.

В последнее время в России реализуется политика импортозамещения, в том числе и в области продуктов информационных технологий. Кроме того, российское законодательство требует использования только криптоалгоритмов, определенных в российских стандартах, для защиты некоторых видов информации ограниченного доступа (служебной тайны, персональных данных). Поскольку за последние годы мобильные устройства стали неотъемлемой частью жизни людей, создание программных реализаций российских криптоалгоритмов для таких устройств становится все более и более важной задачей. При этом необходимо учитывать ограниченность вычислительных мощностей мобильных устройств, что приводит к необходимости выбора методов создания эффективных реализаций криптоалгоритмов на таких устройствах.

К основным группам криптографических алгоритмов относятся алгоритмы симметричного и асимметричного шифрования, криптографического хеширования, электронной подписи. Заметим, что алгоритмы вычисления и проверки электронной подписи состоят из алгоритмов криптографического хеширования и асимметричного шифрования, но в настоящей статье будут рассматриваться только алгоритмы симметричного шифрования и криптографического хеширования.

В российском стандарте [3] определены два алгоритма симметричного блочного шифрования – «Магма» (с длиной блока 64 бита) и «Кузнечик» (с длиной блока 128 бит). В стандарте [4] определены режимы работы алгоритмов блочного шифрования: простой замены, гаммирования, гаммирования с обратной связью по выходу, простой замены с зацеплением, гаммирования с обратной связью по шифртексту и выработки имитовставки (этот режим является дополнительным и используется не для шифрования, а для контроля целостности зашифрованных данных).

Алгоритм «Магма» относится к алгоритмам, построенным на основе сети Фейстела [8, С. 21]. Длина ключа шифрования равна 256 битам, количество раундов (итераций) в основной функции шифрования равно 32. Считается, что этот алгоритм устойчив к методам как линейного, так и дифференциального криптоанализ [5]. За счёт использования обратного порядка ключей в последних восьми раундах была обеспечена защита от слайдовых атак [7, С. 27]. В 2011 году несколько исследователей предложили свой вариант атаки, что позволило снизить временную сложность взлома алгоритма с 2^{256} до 2^{228} за счет огромных требований к памяти [21]. На данном этапе развития вычислительной техники криптоалгоритм «Магма» сохраняет практическую криптостойкость.

В алгоритме «Стрибог», определенном в российском стандарте [2], формируется хеш-значение длиной 256 или 512 бит. Количество раундов равно 12, размер блока входных данных равен 512 битам. Алгоритм «Стрибог» использу-

ется в процедурах вычисления и проверки электронной подписи, определенных в российском стандарте [1].

Поскольку блоки хешируемых данных суммируются по модулю 2^{512} и результат суммирования всех блоков подаётся на вход завершающего этапа, криптоалгоритм «Стрибог» защищен от атак удлинения прообраза [9], дифференциального криптоанализа, построения мультиколлизий [11]. В функции сжатия используется конструкция Миагути-Пренели, что может говорить об устойчивости криптоалгоритма к атакам, основанным на фиксированных точках [16]. Затрудняются атаки на основе связанных и разностных связанных ключей [13], атаки скользящего и отражения, так как в каждом раунде вычисления хеш-значения используются различные константы. В [22] была рассмотрена возможность использования интегрального криптоанализа, и авторам удалось получить некоторые положительные, с точки зрения криптоанализа, результаты, однако их недостаточно для эффективного «взлома» криптоалгоритма «Стрибог».

В работе [10, С. 149] были представлены результаты программной реализации алгоритмов «Магма» и «Стрибог» на мобильных устройствах под управлением операционной системы Android, которые показали их недостаточную для практического использования эффективность, что потребовало продолжения исследования для нахождения методов эффективной реализации криптоалгоритмов, определенных в российских стандартах.

Существуют реализации российских криптоалгоритмов, которые используются в различных мобильных приложениях (например, в пакете программ «МойОфис»). Но в открытых источниках нет информации об использованных в таких реализациях методах программирования, что не дает возможности проанализировать их эффективность.

В данной работе анализируются и используются различные методы эффективной реализации криптографических алгоритмов, определенных в российских стандартах, на мобильных устройствах под управлением операционной системы Android.

Методы создания эффективных реализаций криптоалгоритмов на мобильных устройствах. Под эффективно реализованным криптоалгоритмом будем понимать такую его реализацию, которая способна достаточно быстро выполнять определенные в нем операции. Единственным способом оценить скорость реализации криптоалгоритма вне сравнения с другими его реализациями является получение ответа на вопрос «Устраивает ли нас скорость выполнения криптографического алгоритма при решении конкретной задачи». Будем поэтому считать, что программа выполняется достаточно быстро, если в контексте решения конкретной задачи скорость ее выполнения устраивает пользователя.

Хотя мобильные устройства с каждым годом становятся все более и более совершенными с точки зрения их вычислительных ресурсов, этих мощностей все еще не хватает, для того чтобы решать сложные задачи достаточно быстро. Также следует принять во внимание то, что мобильные устройства работают не от электрической сети, а от аккумулятора с ограниченным временем работы до следующей зарядки. Это обстоятельство в случае невозможности оперативной

подзарядки является критическим фактором выбора мобильных приложений, которые потребляют мало энергии аккумуляторной батареи или используют эту энергию наиболее эффективно.

Дополнительно следует исследовать возможность переноса ресурсоемких вычислений на удаленные компьютеры, обладающие большими вычислительными мощностями нежели мобильные устройства. Заметим, что при передаче данных между мобильным устройством и удаленной ЭВМ необходимо выполнить требования к безопасной передаче данных для обеспечения их конфиденциальности и целостности.

Задачей настоящей работы является анализ различных методов эффективной реализации криптоалгоритмов, определенных в российских стандартах, разработка мобильных приложений на основе этих методов, тестирование приложений и оценка эффективности методов на различных мобильных устройствах, работающих под управлением операционной системы Android.

Рассмотрим следующие методы эффективной реализации криптоалгоритмов:

- оптимизация на уровне языка программирования и его кода;
- применение параллельных вычислений;
- перенос криптографических вычислений на удаленное более мощное устройство.

Поскольку данная работа посвящена эффективной реализации криптоалгоритмов на мобильных устройствах под управлением операционной системы Android, рассмотрим языки программирования Kotlin, Java и C++ с точки зрения их возможностей по уменьшению времени выполнения вычислений. Исключим из анализа язык Kotlin, так как Kotlin и Java использует виртуальную машину JVM (Java Virtual Machine), а программы на Java компилируются в более эффективный код, нежели Kotlin [15].

C++ является компилируемым языком: исходный код программы транслируется в машинный код, который может выполняться непосредственно на процессоре. Благодаря эффективности и оптимальности полученного машинного кода достигается максимальное использование возможностей аппаратуры, за счет чего приложения на C++ выполняются быстрее, чем приложения на других языках программирования.

Недостатком данного языка является то, что он не является мультиплатформенным: для каждой определенной архитектуры устройства требуется компиляция программы именно под эту архитектуру. Оптимизированный одним компилятором код может не работать на других процессорах. Также оптимизированный код становится менее понятным, что усложняет сопровождение программы.

Хотя программа на Java выполняется медленнее, чем на C++ (исходный код на Java компилируется в промежуточный байт-код, который далее интерпретируется JVM в машинный код, который выполняется на процессоре), язык Java имеет свои преимущества: при интерпретации байт-код оптимизируется под используемый процессор. Также во время интерпретации байт-кода собирается

статистика о наиболее часто вызываемых частях кода для их оптимизации и вставки в места вызова. За счёт этого происходит значительное ускорение выполнения программы на Java, которая иногда может выполняться быстрее аналогичной программы на C++ [6]. Java является мультиплатформенным языком: полученный после компиляции байт-код может быть интерпретирован JVM на любой архитектуре, для которой эта виртуальная машина реализована.

Завершая сравнение языков C++ и Java, можно сказать, что использование C++ приводит к созданию более быстрого кода, но разработка приложений на C++ отличается большей сложностью, а код на C++ проигрывает в мультиплатформенности.

Существуют технологии совместного использования языков Java и C++ [17], но это может усложнить разработку программ. Например, если нужно в определенном месте программы на Java использовать некоторую функцию, чтобы время ее выполнения было минимальным, эту функцию можно реализовать на языке C++ и «встроить» в код на Java. Однако, для достижения такого выигрыша в скорости работы программы необходимо обладать дополнительными компетенциями в области разработки на C++. Кроме того, в таком случае необходимо также обладать компетенциями в области «встраивания» кода на одном языке в код на другом языке.

Время выполнения программы может существенно зависеть от правильного выбора структур данных, при котором в программе не будет происходить лишних вычислений, потребляющих вычислительные ресурсы. Другим обстоятельством, которое следует принять во внимание, является то, что быстрее выполняется тот код на языке программирования, который после трансляции в машинный код будет иметь меньше процессорных команд. Для получения такого кода необходимо использовать наиболее «примитивные» структуры языка программирования, так как такие структуры кода и данных наиболее подходят для выполнения сформулированного выше условия.

Поэтому для сокращения времени выполнения программы следует использовать приемы программирования, приводящие к созданию более эффективного машинного кода. Например:

- отказ от использования списков в пользу обычных массивов;
- в вычислениях над байтами исключение конвертации данных одних типов в другие и т.п.

Одним из самых эффективных подходов к ускорению программных реализаций любых алгоритмов является их распараллеливание. Современные мобильные устройства обладают достаточной вычислительной мощностью для выполнения различных частей кода одновременно и параллельно за счет использования многоядерных процессоров. Следовательно, это позволит ускорить выполнение некоторых операций при шифровании, расшифровании и хешировании данных.

Но распараллеливание криптоалгоритмов возможно не всегда: такая возможность существует, если в программной реализации можно выделить участки кода, способные выполняться одновременно и независимо друг от друга. Напри-

мер, пусть имеется реализация алгоритма симметричного блочного шифрования в режиме электронной кодовой книги (простой замены), в котором открытый текст перед шифрованием разбивается на блоки, каждый из которых шифруется на одном и том же ключе независимо от других блоков.

В этом случае вместо последовательного шифрования блоков можно шифровать каждый блок параллельно с другими. Сокращение времени шифрования относительно последовательной реализации будет зависеть от того, сколько параллельно обрабатываемых блоков можно выделить, что, в свою очередь, зависит от количества ядер процессора устройства, на котором производятся вычисления.

Но если мы имеем программную реализацию алгоритма симметричного блочного шифрования в режиме гаммирования или гаммирования с обратной связью, то распараллеливание такой реализации практически невозможно из-за того, что каждый очередной блок открытого текста перед шифрованием накладывается на результат шифрования предыдущего блока. Аналогичную ситуацию имеем при попытке создать параллельную реализацию алгоритма криптографического хеширования: на каждой итерации функция сжатия ожидает результат обработки предыдущего входного блока.

К недостаткам параллельных программ при их выполнении на мобильных устройствах следует также отнести более быстрый расход заряда батареи из-за того, например, что устройство в этом случае будет более активно использовать свой процессор. При распараллеливании программы обычно возможны два подхода: распараллеливание на основе примитивов языка программирования и распараллеливание на основе использования автоматических систем распараллеливания программного кода.

Главной особенностью использования примитивов языка при распараллеливании программ является то, что для корректной работы распараллеленной программы необходима корректная синхронизация параллельно выполняющихся потоков для исключения, например, их взаимной блокировки при использовании разделяемых потоками ресурсов.

Для автоматического распараллеливания возможно применение:

- распараллеливания непосредственно компилятором;
- частичного изменения исходного кода специализированной системой, которая вставляет специфичные директивы распараллеливания, соответствующие одному из стандартных интерфейсов, например MPI [12] или OpenMP [14];
- распараллеливание исходного кода на основе специализированной системы с активным диалогом с разработчиком (примерами таких систем являются Tournavitis [23] и ParaWise [19]).

Сегодня практически каждый язык программирования имеет специальные средства для распараллеливания программ. Распараллеливание на основе языковых примитивов должно производиться следующим образом:

1. Выбираются части алгоритма, которые могут быть выполнены параллельно относительно друг друга.

2. Код, реализующий эти части алгоритма, должен выполняться при запуске каждого параллельно выполняющегося потока. При необходимости в код запуска потока помещаются специальные конструкции, специфичные для параллельного программирования и используемые для синхронизации потоков и предотвращения ошибок выполнения параллельного кода.

3. Производится запуск этих потоков из основного потока с возможностью передачи в эти потоки необходимой для выполнения алгоритма информации, подготовленной в основном потоке.

4. После выполнения всех потоков производится синхронизация результатов, а также очистка потоков и планировщиков для освобождения ресурсов.

Главной особенностью использования примитивов языка при распараллеливании программ является то, что для корректной работы программы при порождении потоков программисту необходимо корректно синхронизировать их дальнейшее выполнение, не допуская, например, блокировки из-за конкуренции потоков за разделяемый ресурс. Обычно задача синхронизации потоков является весьма непростой, решение которой требует специальных компетенций в области параллельного программирования.

Автоматическое распараллеливание программ с помощью инструментальных средств обычно заключается в следующем:

1. Проводится анализ исходного кода программы или ее промежуточного (машинного) кода, полученного в результате компиляции и трансляции программы, с целью выявления одного или нескольких видов скрытого параллелизма.

2. Выполняется эффективная реализация выявленного вида параллелизма путем переработки исходного или промежуточного (машинного) кода с внесением в него дополнительных распараллеливающих конструкций.

При анализе кода программы обычно происходит построение графа взаимосвязей отдельных команд кода с выявлением в нем параллельно выполняющихся ветвей, а также определения точек слияния этих ветвей.

Частичная переработка исходного кода программы может выполняться специализированной системой, которая вставляет специфичные директивы распараллеливания, соответствующие одному из стандартных интерфейсов распараллеливания, например, уже упомянутым MPI или OpenMP. Данный способ является весьма удобным для программиста, так как структура кода не претерпевает существенных изменений и полученная параллельная реализация может быть им проанализирована.

Также возможно распараллеливание исходного кода на основе специализированной системы с достаточно активным диалогом с программистом, что позволяет в наибольшей степени выявить потенциально параллельные фрагменты и получить наиболее эффективный код на выходе. Фактически это будет являться полуавтоматическим распараллеливанием. Примерами таких систем могут являться упомянутые выше системы Tournavitis или ParaWise.

Можно комбинировать разные способы на разных этапах разработки про-

граммы: сначала написать программную реализацию алгоритма, распараллелив ее на основе языковых примитивов, после чего применить к программе компилятор, способный выявлять потенциально распараллеливаемые на низком уровне части программы.

При переносе криптографических вычислений на внешнее устройство с более мощными вычислительными характеристиками либо на объединенную сеть таких устройств имеется ряд требующих решения проблем:

1. Необходимость несения дополнительных затрат (на электроэнергию, доступ к сети и т.п.).

2. Необходимость постоянного поддержания внешнего устройства в рабочем состоянии.

3. При обмене данными между мобильным устройством и внешним компьютером необходимо обеспечить безопасность передачи информации между этими устройствами (ее конфиденциальности и целостности).

Таким образом, использование удаленной ЭВМ для выполнения криптографических вычислений требует дополнительных затрат и обладания компетенциями в области программирования серверных частей приложений.

При выполнении криптографических операций на внешнем компьютере потребуется разработка серверного приложения («бэкенда»), которое будет принимать запросы от мобильного устройства, обеспечивать реализацию криптоалгоритма, отправлять результаты на клиентскую сторону. Дополнительно требуется обеспечить доступность этого серверного приложения для всех сетевых клиентов. Размещаемое серверное приложение должно будет включать функции своей настройки и конфигурирования.

Обеспечивать конфиденциальность (шифрование) передаваемых между клиентским мобильным устройством и серверным приложением данных требуется только тогда, когда на стороне сервера выполняются шифрование и расшифрование данных (при хешировании, вычислении и проверке электронной подписи этого не нужно). Если клиентское мобильное устройство и сервер находятся внутри одного периметра безопасности, а передача данных между устройствами происходит по локальной сети, то от использования протоколов безопасной передачи данных можно будет отказаться.

Одним из самых распространенных протоколов безопасной передачи данных в глобальной сети является протокол HTTPS (объединение протокола передачи гипертекста HTTP и протоколов безопасной передачи информации SSL/TLS). Обмен ключами симметричного шифрования, шифрование и вычисление контрольного хеш-значения передаваемых данных происходят в HTTPS с помощью согласованных клиентом (мобильным устройством) и сервером криптоалгоритмов.

Альтернативой использованию протоколов безопасной передачи данных между клиентом и сервером (таких как HTTPS) является применение методов и программных средств компьютерной стеганографии: данные, к которым нужно применить криптографическую операцию или которые являются ее результатом, внедряются в стеганографический контейнер, передаваемый по открытой для пе-

рехвата сети.

Например, можно использовать метод стеганографического скрывания LSB, при котором передаваемая между клиентом и сервером информация внедряется внутрь контейнера, в качестве которого может применяться графический, звуковой или видеофайл. Для дополнительной защиты перед внедрением информация может шифроваться, а после извлечения из контейнера расшифровываться.

Проектирование и разработка мобильных приложений для эффективной реализации криптоалгоритмов. Для экспериментальной проверки методов эффективной реализации криптоалгоритмов были разработаны два приложения для мобильных устройств под управлением операционной системы Android. При разработке использовались среда программирования Android Studio и язык программирования Kotlin. Для разработки серверной части приложений использовались среда разработки IntelliJ Idea [18], язык программирования Kotlin и фреймворк Ktor [20].

Выбор среды разработки Android Studio объясняется удобством разработки из-за обширного функционала среды и тем, что эта среда является официальной средой разработки компании Google. Язык программирования Kotlin выбран, поскольку он является официальным языком разработки приложений для операционной системы Android и обеспечивает высокую скорость разработки за счёт лаконичного и удобного синтаксиса.

Для разработки оптимизированных реализаций криптоалгоритмов, «встроенных» в приложения, использовался язык Java, поскольку код на Java компилируется в более оптимизированные структуры, нежели код на языке Kotlin.

Выбор среды разработки IntelliJ Idea объясняется высокой скоростью разработки по сравнению с другими средами, тем, что эта среда является официальной средой разработки для языка Kotlin от компании JetBrains, а также удобством применения. Фреймворк Ktor создан на основе современных асинхронных технологий, является очень «легковесным» и быстрым инструментом для разработки серверной части приложения, прост в использовании и функционирует на основе языка программирования Kotlin.

Первое приложение поддерживает шифрование и расшифрование выбранного пользователем файла по алгоритму «Магма» в режиме простой замены на основе ключа, выводимого из введенной пользователем парольной фразы. Ключ выводится из парольной фразы посредством применения к ней хэш-функции «Стрибог» с длиной результирующего хеш-значения 256 бит. Вводимая парольная фраза проверяется на соответствие требованиям к ее минимальной длине и сложности.

Выбор файла происходит путем запуска менеджера файлов при нажатии на соответствующую кнопку в создаваемом приложении. Сохранение зашифрованных и расшифрованных файлов происходит в каталоге приложения в папки Encoded и Decoded соответственно. Пользователь должен задать имя для шифруемого или расшифровываемого файла.

Приложение предоставляет пользователю возможность выбора реализа-

ции криптоалгоритма:

- неоптимизированной реализации;
- оптимизированной реализации;
- оптимизированная реализация с распараллеливанием;
- оптимизированной и распараллеленной реализации с выполнением криптографической операции на внешнем компьютере;
- оптимизированной и распараллеленной реализации с выполнением криптографической операции на внешнем компьютере и с применением протокола HTTPS для защиты передаваемых данных.

В неоптимизированной реализации используются операции со строками вместо байтовых преобразований, а вместо байтовых массивов используются массивы целых чисел без знака длиной 1 байт.

В оптимизированной реализации используются только байтовые преобразования, исключая какие-либо операции со строками. Кроме того, используются массивы вместо более высокоуровневых списков. Оптимизированная реализация написана на языке Java.

В оптимизированной реализации с распараллеливанием используется разбиения входных блоков открытого текста или шифротекста для вычислений на разных ядрах устройства. Например, если входной файл имеет размер 32 байта, то одновременно будут производиться криптографические преобразования на четырех ядрах, при этом каждое ядро будет обрабатывать свой блок размером 8 байт. Если количество блоков будет больше, чем количество ядер процессора, то блоки будут вставать в очередь и обрабатываться по мере освобождения вычислительных ресурсов. Эта реализация выполнена на языке Java с использованием классов для многопоточного программирования из стандартной библиотеки `java.util.concurrent`.

Для распараллеленной оптимизированной реализации с выполнением криптографической операции на внешнем компьютере создана программа для развертывания серверной части. Для взаимодействия серверной и клиентской частей используется незащищенный протокол HTTP.

Распараллеленная оптимизированная реализация с выполнением криптографической операции на внешнем компьютере и с использованием протокола HTTPS отличается от предыдущей реализации только тем, что передача данных между мобильным устройством и сервером происходит на основе протокола защищенной передачи информации.

Пользовательский интерфейс приложения приведен на рисунке 1, а. Для работы приложения ему необходимы разрешения на чтение и запись во внешнее хранилище (запрашиваются при запуске приложения).

Для шифрования файла необходимо нажать на кнопку «Выбрать файл», затем в открывшемся файловом менеджере нужно выбрать имя файла. Далее в поля «Парольная фраза» и «Название файла» необходимо ввести соответственно парольную фразу, на которой будет шифроваться файл, и имя зашифрованного файла. Также необходимо выбрать один из пяти режимов работы программы. Далее нужно нажать на кнопку «Зашифровать» и дождаться завершения выполнения криптографической операции.

Для расшифрования, необходимо выбрать один из зашифрованных данной программой файлов, ввести соответствующую парольную фразу и имя файла с расшифрованными данными, выбрать режим работы и нажать на кнопку «Расшифровать».

Если при нажатии на кнопки «Зашифровать» и «Расшифровать» поля «Парольная фраза» или «Название файла» будут пусты, то программа выведет соответствующее предупреждение. Если пользователь ввел слишком простую или слишком короткую парольную фразу, то при нажатии на кнопку «Зашифровать» или «Расшифровать» также будет выведено соответствующее сообщение с предложением изменить парольную фразу.

Второе приложение поддерживает хеширование выбранного пользователем файла по криптоалгоритму «Стрибог». Также поддерживается хеширование текста, введенного пользователем в соответствующем поле. Есть возможность выбрать длину вычисляемого хеш-значения (256 или 512 бит). Пользовательский интерфейс приложения приведен на рисунке 1, б. Для работы приложения необходимо разрешение на чтение внешнего хранилища (запрашивается при запуске приложения).



Рисунок 1 – Пользовательский интерфейс мобильных приложений:
а – с реализациями криптоалгоритма «Магма»,
б – с реализациями криптоалгоритма «Стрибог»

Приложение поддерживает хеширование выбранного пользователем файла по криптоалгоритму «Стрибог». Выбор файла происходит путем запуска менеджера файлов при нажатии на соответствующую кнопку в создаваемом приложении. Пользователь может выбрать длину вычисляемого хеш-значения (256 или 512 бит).

Для хеширования файла необходимо выбрать его имя в файловом менеджере, нажав на кнопку «Выбрать файл». Далее необходимо выбрать размер выходного хеша, выбрать нужную реализацию криптоалгоритма и нажать на кнопку «Получить хеш файла». После завершения выполнения криптографической операции результат хеширования отобразится под соответствующей надписью. Полученное хеш-значение файла может быть затем сохранено пользователем в любом удобном для него месте с помощью буфера обмена.

Если при нажатии на кнопку «Получить хеш файла» пользователем не будет выбран размер выходного хеша, то программа выведет соответствующее предупреждение.

Аналогично первому приложению есть возможность выбора одной из четырех реализаций криптоалгоритма:

- неоптимизированной реализации;
- оптимизированной реализации;
- оптимизированной реализации с выполнением криптографической операции на внешнем компьютере;
- оптимизированной реализации с выполнением криптографической операции на внешнем компьютере и с применением протокола HTTPS для обеспечения целостности передаваемых данных.

Результаты измерения производительности разработанных приложений. Для тестирования разработанных приложений использовался смартфон Xiaomi Redmi 9, работающий под управлением операционной системы Android 10, с восьмиядерным процессором MediaTek Helio G80 с тактовой частотой до 2 ГГц и четырьмя гигабайтами оперативной памяти.

В качестве внешнего компьютера использовался ноутбук Honor Magicbook Pro, имеющий шестиядерный процессор AMD RYZEN 4600H с тактовой частотой до 4 ГГц и 16 гигабайт оперативной памяти.

В таблице 1 приведены результаты тестирования разработанного мобильного приложения для шифрования (расшифрования) данных по алгоритму «Магма» (приведено время шифрования и расшифрования файлов различного типа и размера в секундах). Каждая ячейка таблицы содержит два значения, разделенных символом «/»: первое соответствует времени шифрования файла, а второе – его расшифрования.

Столбцы таблицы соответствуют различным способам реализации криптоалгоритма: неоптимизированной (А), оптимизированной (В), оптимизированной и распараллеленной (С), распараллеленной с выполнением криптографической операции на внешнем компьютере (D), распараллеленной с выполнением криптографической операции на внешнем компьютере и с передачей данных между мобильным устройством и сервером по протоколу HTTPS (E).

Строки соответствуют файлам, на которых проводилось тестирование приложения: изображению формата JPG размером 217 КБ (1), документу формата PDF размером 1,01 МБ (2), видео формата MP4 размером 7,18 МБ (3), видео формата MP4 размером 16,5 МБ (4).

Различия во времени шифрования и расшифрования объясняются разным количеством доступных вычислительных ресурсов в момент выполнения криптографических операций, поскольку в операционной системе Android могут выполняться скрытые системные процессы, которые в разные моменты времени используют разное количество вычислительных ресурсов. Время шифрования (расшифрования) в реализациях с использованием вычислений на внешнем компьютере включает в себя и время соединения с этим компьютером, время передачи данных и другие накладные расходы.

Таблица 1 – Результаты тестирования приложения для криптоалгоритма «Магма»

	Реализация А	Реализация В	Реализация С	Реализация D	Реализация Е
Файл 1	67/65	17/17	5/5	2/2	2/2
Файл 2	714/721	80/82	22/23	4/4	5/4
Файл 3	2831/2771	650/639	153/155	22/23	23/23
Файл 4	Более часа	1284/1266	389/378	44/39	48/50

В таблице 2 приведены результаты тестирования разработанного мобильного приложения для хеширования данных по алгоритму «Стрибог» (приведено время хеширования файлов различного типа и размера в секундах). Каждая ячейка таблицы содержит два значения, разделенных символом «/»: первое соответствует времени хеширования файла с получением хеш-значения 256 бит, а второе – с получением хеш-значения длиной 512 бит.

Столбцы таблицы 2 соответствуют различным способам реализации криптоалгоритма: неоптимизированной (А), оптимизированной (В), оптимизированной с выполнением криптографической операции на внешнем компьютере (С), оптимизированной с выполнением криптографической операции на внешнем компьютере и с передачей данных между мобильным устройством и сервером по протоколу HTTPS (D). Строки соответствуют хешируемым файлам, совпадающим с файлами в таблице 1.

**Таблица 2 – Результаты тестирования приложения
для криптоалгоритма «Стрибог»**

	Реализация А	Реализация В	Реализация С	Реализация D
Файл 1	40/42	3/4	1/1	1/1
Файл 2	260/258	12/11	2/2	2/2
Файл 3	Более часа	83/80	7/7	7/7
Файл 4	Более часа	186/185	13/12	14/14

Дополнительно разработанные приложения были протестированы еще на

пяти мобильных устройствах: Xiaomi Redmi 9 с процессором MediaTek Helio G80 с тактовой частотой 2 ГГц, 8 ядрами и объемом оперативной памяти 4 ГБ (устройство 1), Xiaomi Redmi 5 Plus с процессором Snapdragon 625 MSM8953 (2 ГГц, 8, 3 ГБ (устройство 2), Xiaomi Redmi 10C с процессором Snapdragon 680 (2,4 ГГц, 8, 4 ГБ (устройство 3), Blackview bv6000 с процессором Cortex-A53 (2 ГГц, 8, 3 ГБ (устройство 4), Xiaomi Redmi 7A с процессором Qualcomm Snapdragon 439 (2 ГГц, 8, 2 ГБ (устройство 5).

В таблице 3 приведены результаты тестирования приложения для криптоалгоритма «Магма» на указанных мобильных устройствах на файлах 1 и 3 и на реализациях С и D, аналогичных таблице 1. В каждой ячейке указано время шифрования и расшифрования в секундах (два значения, разделенные символом «/»).

**Таблица 3 – Тестирование приложения для алгоритма «Магма»
на пяти устройствах**

Номер устройства	Файл 1 Реализация С	Файл 1 Реализация D	Файл 3 Реализация С	Файл 3 Реализация D
1	5/5	2/2	153/155	23/24
2	15/14	5/4	565/549	20/20
3	4/4	2/2	127/129	14/13
4	14/15	7/7	592/578	28/29
5	12/12	3/2	350/332	17/17

В таблице 4 приведены результаты тестирования приложения для криптоалгоритма «Стрибог» на указанных мобильных устройствах на файлах 1 и 3 и на реализациях В и С, аналогичных таблицы 2. В каждой ячейке приведено время хеширования с получением хеш-значения длиной 256 и 512 бит в секундах (два значения, разделенные символом «/»).

Таблица 4 – Проверка приложения для алгоритма «Стрибог» на пяти устройствах

Номер устройства	Файл №1 Реализация В	Файл №1 Реализация С	Файл №3 Реализация В	Файл №3 Реализация С
1	3/4	1/1	83/80	7/7
2	5/5	3/2	155/172	11/14
3	2/2	1/1	54/53	6/6
4	5/5	2/2	183/179	6/6
5	4/4	3/4	103/99	12/11

Заключение. Результаты разработки и тестирования мобильных приложений с различными способами оптимизированной реализации криптографических алгоритмов «Магма» (симметричное блочное шифрование и расшифрование в режиме простой замены) и «Стрибог» (хеширование) позволяют сделать следующие выводы:

- все исследованные способы сокращения времени выполнения криптографических операций позволяют многократно сократить это время по сравнению с неоптимизированной реализацией;
- использование распараллеливания при реализации тех криптоалгоритмов, в которых это возможно, сокращает время выполнения криптографической операции в 3-4 раза по сравнению с оптимизированной и последовательной реализацией, что подтверждает эффективность применения параллельных вычислений в криптографических программных средствах для мобильных устройств;
- при использовании для выполнения криптографической операции внешнего компьютера применение для передачи данных между клиентом и сервером защищенного протокола HTTPS не приводит к существенному увеличению времени даже для файлов большого размера, что позволяет рекомендовать этот способ реализации криптоалгоритмов для случаев, когда обеспечение конфиденциальности и целостности передаваемых данных является обязательным (например, при их расшифровании).

Литература

1. ГОСТ Р 34.10-2012. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Процессы формирования и проверки электронной цифровой подписи // М.: Стандартинформ, 2012. 33 с.
2. ГОСТ Р 34.11-2012. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Функция хэширования // М.: Стандартинформ, 2013. 25 с.
3. ГОСТ Р 34.12-2015. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Блочные шифры // М.: Стандартинформ, 2015. 25 с.
4. ГОСТ Р 34.13-2015. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Режимы работы блочных шифров // М.: Стандартинформ, 2015. 42 с.
5. Дифференциальный и линейный криптоанализ [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://r3al.ru/kripto_2/differencialnyj_i_linejnyj_krip.htm (дата обращения: 18.01.2024).
6. Елизаров Р. Java vs C++ на целых числах [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://elizarov.livejournal.com/18486.html> (дата обращения: 18.01.2024).
7. Ищукова Е.А., Богданов К.И., Бабенко Л.К. Слайдовая атака на криптографический алгоритм Магма и ее реализация с использованием технологии параллельного вычисления NVIDIA CUDA // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 1. С. 25-29.
8. Короплясов А.В., Румбешт В.В. История создания и обзор архитектуры сетей Фейстеля // Вестник магистратуры. 2012. № 1. С. 20-22.
9. Криптографические хеш-функции. Стойкость к удлинению прообраза [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://mipt.lectoriy.ru/file/synopsis/pdf/CompTech-InforSecur-M05-Vladim-131005.01.pdf> (дата обращения: 18.01.2024).
10. Павлов И.С. Методы программной реализации российских криптоалгоритмов для мобильных устройств // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тезисы докладов Двадцать восьмой международной научно-технической кон-

- ференции студентов и аспирантов. М.: Общество с ограниченной ответственностью «Центр полиграфических услуг «РАДУГА». 2022. С. 149.
11. Панасенко С. Криптоанализ хэш-функции ГОСТ Р 34.11-2012 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/210684/> (дата обращения: 18.01.2024).
 12. Петров В. Основы MPI [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/121925/> (дата обращения: 18.01.2024).
 13. Пудовкина М. Атаки на основе метода связанных ключей [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.ruscrypto.ru/resource/archive/rc2010/files/02_pudovkina.pdf (дата обращения: 18.01.2024).
 14. Что такое OpenMP? [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://parallel.ru/tech/tech_dev/openmp.html (дата обращения: 18.01.2024).
 15. Ява против Котлина – Часть 2: Байт-код [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://machinelearningmastery.ru/java-vs-kotlin-part-2-bytecode-42b2154f6ae0/#> (дата обращения: 18.01.2024).
 16. Bard Gregory. The Fixed-Point Attack [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/278699697_The_Fixed-Point_Attack (дата обращения: 18.01.2024).
 17. Guide to JNI (Java Native Interface) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.baeldung.com/jni> (дата обращения: 18.01.2024).
 18. IntelliJ IDEA – ведущая IDE для разработки на Java и Kotlin [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.jetbrains.com/ru-ru/idea/> (дата обращения: 18.01.2024).
 19. Johnson S., Evans E., Haoqiang J. The ParaWise Expert Assistant – Widening Accessibility to Efficient and Scalable Tool Generated OpenMP Code // Conference: Proceedings of the 5th international conference on OpenMP Applications and Tools: shared Memory Parallel Programming with OpenMP [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/225815119_The_ParaWise_Expert_Assistant_-_Widening_Accessibility_to_Efficient_and_Scalable_Tool_Generated_OpenMP_Code (дата обращения: 18.01.2024).
 20. Ktor Documentation [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ktor.io/docs/welcome.html> (дата обращения: 18.01.2024).
 21. Nicolas T. Courtois. Security Evaluation of GOST 28147-89 In View Of International Standardisation [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://eprint.iacr.org/2011/211> (дата обращения: 18.01.2024).
 22. Riham AlTawy, Amr M. Youssef. Integral distinguishers for reduced-round Stribog [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://eprint.iacr.org/2013/648> (дата обращения: 18.01.2024).
 23. Tournavitis G., Zheng Wang, Franke B., O’Boyle M. Towards a Holistic Approach to Auto-Parallelization Integrating Profile-Driven Parallelism Detection and Machine-Learning Based Mapping [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://zwang4.github.io/publications/pldi121-tournavitis.pdf> (дата обращения: 18.01.2024).

УДК 519.6

Геоинформационное обеспечение точного земледелия

Наталья Сергеевна Шайтура, кандидат физико-математических наук,
старший преподаватель кафедры высшей математики,
Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва,

Юлия Николаевна Белова, старший преподаватель,
Московский государственный университет технологий и управления
им. К.Г. Разумовского (Первый казачий университет), г. Москва,

Евгений Александрович Феокистов, аналитик,
ООО «Первая экспедиционная компания» г. Москва

Для поддержания сельскохозяйственных ресурсов Земли необходимо использовать интеллектуальные цифровые методы ведения земледелия. Одно из направлений, позволяющих экономно расходовать ресурсы Земли является точное земледелие. В этой статье описана оригинальная методика применения математического и программного обеспечения в точном земледелии. Точное земледелие позволяет повысить урожайность сельскохозяйственных культур посредством более точного внесения удобрений и полива. Точное земледелие включает в себя следующие методы математического и программного обеспечения: геоинформационное картографирование полей, космический мониторинг, мониторинг при помощи беспилотных летательных аппаратов, беспилотное возделывание, сельскохозяйственную технику, позволяющую осуществление точечного внесения влаги и удобрений. Точное земледелие опирается на пространственную информацию и на совокупность аппаратно-технических и телекоммуникационных средств по предоставлению пространственно-распределенной информации. Авторы считают, что осуществление точного земледелия должно основываться на создании, редактировании и использовании интеллектуальной цифровой математической модели поля. В статье описана методика функционирования такой модели. Последовательность работ заключается в первоначальном обследовании поля и участков полей, составление карты поля, оценки особенностей поля, выбора сельскохозяйственных культур для посева и посев при помощи умной сельскохозяйственной техники. Следующий шаг – мониторинг поля при помощи космических снимков и при помощи беспилотных летательных аппаратов. На этом этапе производится анализ всходов для возможного вторичного посева, анализ влажности почвы и полив, анализ и внесение удобрений и пестицидов. Далее по снимкам производится анализ готовности урожая для уборки, предварительный прогноз урожайности. После уборки оценивается урожай по полям и составляются карты урожайности. Планируются следующие посадки с учетом севооборота.

Математическое обеспечение, точное земледелие, цифровые карты полей, глобальное позиционирование, космический мониторинг, беспилотные летательные

аппараты.

Geoinformation support for precision agriculture

Natalya Sergeevna Shaitura, Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Senior lecturer of the Department of Higher Mathematics,

Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after K.A. Timiryazev, Moscow,

Yulia Nikolaevna Belova, senior lecturer,
Moscow State University of Technology and Management them
K.G. Razumovsky (First Cossack University), Moscow,

Evgeny Alexandrovich Feoktistov, analyst,
First Expedition Company LLC, Moscow

To maintain the Earth's agricultural resources, it is necessary to use smart digital farming methods. One of the areas that allows for economical use of the Earth's resources is precision farming. This article describes an original method for using mathematics and software in precision agriculture. Precision agriculture refers to an agricultural management strategy based on observing, measuring, and responding to temporal and spatial variability to improve the sustainability of agricultural production. Precision farming relies on spatial information and a set of hardware, technical and telecommunications tools to provide spatially distributed information. The authors believe that the implementation of precision agriculture should be based on the creation, editing and use of an intelligent digital mathematical model of the field. The article describes the method of functioning of such a model. The next step is field monitoring using satellite images and UAVs. At this stage, seedlings are analyzed for possible secondary sowing, soil moisture analysis and watering, analysis and application of fertilizers and pesticides are carried out. Next, the images are used to analyze the readiness of the crop for harvesting and make a preliminary forecast of yield. After harvesting, the yield of the fields is assessed and yield maps are compiled. The following plantings are planned taking into account crop rotation.

Software, precision agriculture, digital field maps, global positioning, space monitoring, unmanned aerial vehicles.

Введение

Число живущих на земле людей увеличивается, что создает дополнительную нагрузку на сельскохозяйственные территории. Выходом из данной ситуации является точное земледелие, которое позволяет увеличить урожайность, спрогнозировать его объем, собрать и сохранить урожай.

Точное земледелие существует с 1960-х годов, когда министр сельского хозяйства Соединенных Штатов Эрл Батц представил систему, называемую сетчатой посадкой. Сетчатая посадка – это схема посадки, при которой фермы разделены на квадраты, а растения расположены рядами внутри каждого квадрата.

Этот метод позволил фермерам иметь больший контроль над своей землей и максимально эффективно использовать свои ресурсы. С 1960 года популярность точного земледелия продолжала расти. Благодаря более быстрым компьютерам, более доступной электронике и более совершенным инструментам анализа данных, в последние несколько лет она стремительно развивается.

Точное земледелие, или умное земледелие, – это практика использования данных для оптимизации сельскохозяйственного производства. Спутниковые снимки, датчики, метеостанции и другие данные используются для мониторинга и анализа состояния почвы и управления другими ресурсами, такими как вода и удобрения. Это, в свою очередь, позволяет фермеру производить наибольший объем урожая при минимально возможных затратах.

За последние 100 лет многое изменилось в сельском хозяйстве. При принятии решений фермеру предоставляется множество дополнительных источников информации, таких как спутниковые данные, прогнозы погоды и многое другое. Но часто он сам принимает решение, используя зрение и свои знания. Точное земледелие может помочь фермеру в этом процессе принятия решений.

Точное земледелие использует такие методы математического и программного обеспечения, как пространственное позиционирование, дистанционный мониторинг и умную сельскохозяйственную технику, работающую на принципах интернета вещей.

Целью статьи является разработка методики применения методов математического и программного обеспечения в точном земледелии. Данная методика позволяет объединить разрозненные методы воедино и нацелить их на задачи точного земледелия.

Рассмотрим отдельные составные части по отдельности. Вопросами глобального пространственного позиционирования и дистанционного мониторинга занимались ряд известных авторов: Бондур В.Г., Левин Б.А, Розенберг И.Н., Савиных В.П. [4, 5, 6].

Научными коллективами, которыми руководили эти ученые были разработаны принципы и методы мониторинга за пространственными объектами при помощи космических методов.

Вопросами создания и использования умных сельскохозяйственных механизмов транспортных средств занимались такие ученые как: Дорохов А.С., Ерохин М.Н., Водяников В.Т. [2, 8, 9].

В 2007 году в РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева был создан центр точного земледелия [3]. В центре проводились исследования по апробированию методов точного земледелия на опытных полях. Исследования наглядно показали эффективность методов точного позиционирования.

В исследованиях данной статьи авторы взяли за основу геоинформационные методы и предложили методику геоинформационного моделирования данных пространственного позиционирования для использования в точном земледелии.

Цель исследований

Таким образом, целью статьи является разработка методики применения

геоинформационных сервисов в точном земледелии. В рамках достижения этой цели проводится анализ трендов устойчивого развития агробизнеса на основе точного земледелия, произведен сравнительный анализ методов точного позиционирования на основе методов космической навигации и с использованием беспилотных летательных аппаратов. На основе анализа представлена методика мониторинга полей методами геоинформационного сервиса.

Материалы и методы

Исследования проводились на кафедре математики РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева совместно с фирмой «Съемка с воздуха», Московского государственного университета технологий им. К.Г. Разумовского (Первый казачий университет) и Российского государственного университета нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина.

По результатам исследования были написаны монографии [8, 9, 10], учебные пособия [12, 13, 17], ряд статей в журналах, рекомендованных ВАК [20-25]. В этой научной литературе обсуждалась эффективность применения цифровизации и точного земледелия в сельском хозяйстве [26, 27, 28], возможности использования геоинформационных сервисов [22], анализ методов космического мониторинга [17, 19, 21, 28] и возможности применения беспилотных летательных аппаратов [13, 20, 21, 23, 24].

Результаты и обсуждение

Основные понятия, используемые в статье.

Прежде, чем приступить к обсуждению результатов исследования хотелось бы уточнить основные понятия, применяемые в статье.

Якушев В.П. справедливо связывает понятие точного земледелия с понятием умного земледелия [30]. Он так же отмечает связь этого понятия с мониторингом покрова земли из космоса и математическими методами моделирования.

Астахов В.С., Иванчиков Г.О. [1] отмечают, что суть точного земледелия заключается в дифференцированном внесении удобрений.

Осипян В.Г. [15] отмечает что методы точного земледелия охватывают все стадии производства аграрной продукции от планирования посевов, посевной компании, наблюдение за выращиванием, сбором и переработкой сельскохозяйственной продукции.

Мы считаем, что точное земледелие – это совокупность методов, которые позволяют на основе мониторинга сельскохозяйственных полей проводить своевременный уход за ними, внося необходимое количество удобрений и влаги, что повышает устойчивости сельскохозяйственного производства [24]. Основу точного земледелия составляет интеллектуальная цифровая модель поля. Первоначально, она может быть получена с существующих кадастровых карт и планов [4], в дальнейшем она уточняется на основе космического мониторинга [19, 21, 28] или при помощи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [13, 18, 20, 21, 23].

Точное земледелие использует большой объем данных и информации для улучшения использования сельскохозяйственных ресурсов, урожайности и качества урожая [14]. Точное земледелие – передовая инновационная и оптимизиро-

ванная стратегия управления на уровне полей, используемая в сельском хозяйстве и направленная на повышение продуктивности ресурсов на сельскохозяйственных полях. Таким образом, точное земледелие представляет собой новый передовой метод, при котором фермеры предоставляют оптимизированные ресурсы, такие как вода и удобрения, для повышения производительности, качества и урожайности. Для этого требуется огромное количество информации о состоянии или здоровье урожая в вегетационный период с высоким пространственным разрешением. Независимо от источника данных, наиболее важной задачей Точного земледелия является оказание поддержки фермерам в управлении их бизнесом. Такая поддержка осуществляется различными путями, но конечным результатом обычно является сокращение необходимых ресурсов

Современное сельскохозяйственное производство основано на мониторинге состояния урожая путем наблюдения и измерения таких переменных, как состояние почвы, здоровье растений, воздействие удобрений и пестицидов, орошение и урожайность. Управление всеми этими факторами является серьезной проблемой для растениеводов. Быстрое совершенствование точного мониторинга сельскохозяйственного роста и оценки его состояния важно для разумного использования сельскохозяйственных ресурсов, а также для управления урожайностью. Такие проблемы можно решить путем внедрения систем дистанционного зондирования (ДЗ), таких как гиперспектральная визуализация, для создания точных карт биофизических показателей в различных циклах выращивания сельскохозяйственных культур.

Дистанционное зондирование – это быстро развивающаяся технология, применяемая в различных сельскохозяйственных приложениях. В частности, визуализирующая спектроскопия в больших непрерывных узких полосах дает важную информацию для понимания биофизических и биохимических свойств сельскохозяйственных растений. Полезно также выявлять изменения различных физических процессов, которые лучше выявляются с помощью мультиспектрального дистанционного зондирования. Приложения дистанционного зондирования используются в сельскохозяйственных исследованиях, основанных на взаимодействии электромагнитного излучения с почвой или растительным материалом на поверхности Земли. Дистанционное зондирование в сочетании с географическими информационными системами (ГИС) и/или системами глобального позиционирования (GPS) часто используются в точном земледелии. Это позволяет фермерам и другим производителям сельскохозяйственной продукции сокращать затраты и максимизировать рентабельность, используя современные технологии, а не традиционные полевые подходы. В настоящее время для повышения эффективности методов точного земледелия внедряется технология переменной нормы внесения. Переменная норма внесения является жизненно важным компонентом для точного земледелия и становится все более распространенной среди крупных землевладельцев. В переменной норме внесения наборы информации о переменных поля и других входных данных помогают определить подходящие количества химических веществ, необходимых для полей. Следовательно, потребность в точных сельскохозяйственных технологиях, ценных продуктах, точной инфор-

мации данных дистанционного зондирования, а также переменной нормы внесения чрезвычайно возросла.

Геоинформационный сервис.

Рассмотрим понятие геоинформационного сервиса. Под геоинформационным сервисом будем понимать с одной стороны будем понимать профессиональную деятельность по предоставлению услуг на основе пространственной информации, а с другой стороны совокупность аппаратно-технических и телекоммуникационных средств по предоставлению пространственно-распределенной информации [22, 26].

Цифровая модель поля.

Основой точного земледелия является цифровая модель поля. Начальная цифровая модель может быть получена на основе прямой геодезической съемки, с существующих топографических карт, либо по снимкам из космоса или с БПЛА. Цифровая модель поля используется в дальнейшем для управления беспилотной сельскохозяйственной техникой или для пространственного ориентирования операторов сельскохозяйственной техники [16].

Вариаторная сельхозтехника.

Для успешного и эффективного ведения сельского хозяйства необходимо максимально продуктивно использовать имеющийся в распоряжении фермера земельный ресурс, эффективно распределяя вносимые удобрения, воду, пестициды и др. с учетом неравномерности почвы, а также разницы в потребностях выращиваемых сельскохозяйственных культур – этим и занимается точное земледелие. Благодаря качественному анализу собираемых с помощью новейшей высокоточной техники данных можно вести постоянный контроль за состоянием почвы, а также самих растений с момента их посадки и до сбора урожая. Наиболее частые точные измерения состава почвы на всей территории задействованной в выращивании растений, с помощью математических методов, позволяют рассчитать необходимое количество вносимых в нее питательных веществ, а также влаги. Такой частный подход к высчитыванию потребностей каждого отдельного сектора почвы является эффективным способом использования удобрений, улучшения качественных характеристик сельскохозяйственных растений, получения выгодной урожайности, улучшения экологического состояния поля и позволяет избежать лишних трат со стороны фермера.

Система дифференцированного внесения средств от вредителей и удобрений позволяет корректировать расход удобрений и средств защиты практически для каждого растения (Рис. 1). Для коррекции применяется два метода:

- создание карты внесения удобрений или средств защиты;
- использование специальных сенсорных датчиков в режиме онлайн.

Вариаторная сельхозтехника помогает вносить удобрения, химикаты и семена в соответствии с конкретными требованиями региона. Так, точное земледелие требует дифференциальной системы глобального позиционирования (DGPS) и специализированного программного обеспечения.



Рисунок 1 – Дифференцированное внесение удобрений

Вариаторные технологии (ВРТ) бывают двух видов:

ВРТ на основе карты точно определяет количество внесенных удобрений и пестицидов в соответствии с ранее созданной картой местности. В то время как ВРТ на основе датчиков исследует почву с помощью датчиков в реальном времени и может помочь определить дефицит азота. Благодаря ВРТ фермеры могут более эффективно ухаживать за растениями и ресурсами по мере необходимости, чтобы сэкономить деньги и положительно повлиять на окружающую среду, что является самым большим преимуществом точного земледелия.

Точное земледелие

Точное земледелие предоставляет фермерам обширную информацию для:

- создания отчетов о своем хозяйстве;
- улучшения процесса принятия решений;
- улучшения сбыта сельскохозяйственной продукции;
- улучшения качества сельскохозяйственных продуктов (например, уровень белка в хлебной муке).

Точное земледелие – это применение прорывных технологий цифрового земледелия. Уже существуют самоуправляемые тракторы, которые работают на автопилоте. Технологии продвигаются к беспилотным машинам, запрограммированным для внесения удобрений или вспахивания земли с применением данных дистанционного зондирования. Автономность технологии обусловлена острой потребностью в диагностике, которую часто трудно выполнить только с помощью ручной техники, управляемой фермером.

Точное земледелие – это современная сельскохозяйственная практика, в которой передовые технологии, такие как картографирование полей, спутниковые снимки и GPS, используются для повышения эффективности сельского хозяйства, качества урожая и прибыли. Кроме того, точное земледелие оптимизи-

рует использование традиционных сельскохозяйственных ресурсов, таких как вода, семена, топливо и т.д.

Точное земледелие значительно повышает эффективность, снижает первоначальные затраты и увеличивает производительность. Следовательно, точное земледелие полезно как для фермеров, так и для окружающей среды. Более того, эти сферы взаимосвязаны, так как экологическая деградация ухудшает условия для ведения сельского хозяйства.

К преимуществам точного земледелия относятся:

- возможность оперативного сбора информации о переменных, происходящих на полях сельскохозяйственных культур;
- сокращение использования ресурсов и рабочей силы, что приводит к снижению затрат;
- кроме того, повышается качество продукции, так как точно соблюдаются требования сельскохозяйственной культуры;
- более эффективное орошение;
- сокращение углеродного следа за счет меньшего использования агрохимикатов и рационального использования воды;
- раннее оповещение при климатических катастрофах, таких как мороз или дождь.

Технологии в точном земледелии можно разделить на наземные, воздушные и спутниковые. Первый занимается планированием, картографированием, разведкой и управлением машиной. Два последних имеют отношение к решению более глобальных задач, например, удаленному анализу состояния урожайности. Поэтому рекомендуется смешивать технологии, чтобы использовать технику в полной мере.

Средства дистанционного зондирования

При помощи БПЛА и космического мониторинга делают снимки высокого качества.

Методы улучшения сверхвысокого разрешения находят все более широкое применение при наблюдении за болезнями сельскохозяйственных культур с низколетящих самолетов.

Мониторинг землепользования

Мониторинг землепользования является важной задачей в сельском хозяйстве включая контроль продовольственной безопасности, прогнозирования площадей и урожайности, оценки урожая, экспортное планирование. Традиционные системы мониторинга и планирования полей основаны на полевых наблюдениях, которые требуют чрезвычайно больших и непрактичных затрат ресурсов, времени и человеческого труда на измерение полей, интегрирование статистических результатов и устранение пространственно-временных ошибок. Системы мониторинга сельского хозяйства ищут устойчивые решения, начиная с дистанционного зондирования на основе спутниковых данных для дешевого и своевременного картографирования полей.

Существуют источники спутниковых снимков, которые предоставляются бесплатно и предлагают широкий пространственный диапазон на большой гео-

графической территории, охватывают высокое временное разрешение.

Однако существует и ряд проблем. Во-первых, хотя спутниковые снимки охватывают большую географическую территорию, они часто имеют относительно низкое пространственное разрешение, что может привести к неточной оценке урожая на полях. Во-вторых, спутниковые снимки часто страдают от неблагоприятных условий, таких как облачная тень или солнечная радиация. В-третьих, изображения часто создаются полярно-орбитальными спутниками с низкой частотой дискретизации, что затрудняет круглосуточные приложения.



Рисунок 2 – Мониторинг сельскохозяйственных полей при помощи беспилотных авиационных систем

БПЛА, на которых установлены камеры с мониторингом поверхности в различных диапазонах чувствительности видеокамер (рисунок 2), позволяют определять потребности в удобрениях и наличие влаги на протяжении всего цикла выращивания посевов.

Своевременный доступ к информации о состоянии сельскохозяйственных культур помогает принимать оперативные решения на уровне фермерских хозяйств и, таким образом, повышает уровень жизни и благосостояния сельских жителей.

Точная геопропространственная информация является важным способом планирования посевов сельскохозяйственных культур. Площадь полей мелких фермеров как правило, слишком малы, чтобы их можно было обнаружить с помощью доступных спутниковых изображений среднего и низкого разрешения. Площадь участков мелких фермеров составляет около двух гектаров на одного фермера.

Беспилотные летательные аппараты

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) быстро становятся ключевыми компонентами сельскохозяйственных исследований и промышленности,

являясь важным источником информации о ранее недоступных агрометеорологических данных в полевых масштабах.

БПЛА являются основой технологий воздушного управления сельскохозяйственными культурами. Это позволяет фермерам следить за своими полями без разведки. Наиболее распространенным примером является опрыскиватель, уже используемый для полива и посева. Кроме того, к любому сельскохозяйственному самолету можно прикрепить гиперспектральную камеру и записывать данные. Однако это приведет к дополнительной нагрузке на существующие опрыскиватели и в дальнейшем приведет к более быстрому износу устройств и загрязнению окружающей среды. Кроме того, этот способ также требует квалифицированного пилота. На смену самолетам и вертолетам приходят БПЛА.

Использование БПЛА в точном земледелии является более инновационным решением. Они управляются дистанционно и используют меньше топлива. Кроме того, БПЛА в точном земледелии могут тщательно анализировать поле и проводить сложные мультиспектральные, термические и гиперспектральные анализы почвы.

Они открывают возможности для интеграции климатически оптимизированного и точного земледелия в мелкомасштабное земледелие за счет улучшенного мониторинга здоровья сельскохозяйственных культур и управления водными ресурсами в сельском хозяйстве, поскольку они являются источником изображений с высоким разрешением, получаемых с заданным пользователем временным разрешением на малых высотах, достаточных для эффективного мониторинга сельскохозяйственных культур в режиме реального времени. На сегодняшний день их использование в мелких фермерских хозяйствах ограничено отсутствием ресурсов и навыков для приобретения и эксплуатации БПЛА; представление о том, что они дороги, не учитывало преимуществ, которые можно было бы получить за счет их использования в сельском хозяйстве. В частности, мы рекомендуем использовать БПЛА как возможность для расширения участия молодежи в сельском хозяйстве.



Рисунок 3 – Карта сельскохозяйственного поля в различных диапазонах

На сельскохозяйственные БПЛА могут быть поставлены датчики, регистрирующие изображение поля в различных диапазонах светового и теплового излучения (рисунок 3).

Нормализованный разностный индекс растительности представляет собой простой графический индикатор, который можно использовать для анализа измерений дистанционного зондирования, для оценки того, содержит ли наблюдаемая цель живую зеленую растительность. Беспилотные летательные аппараты предлагают анализ NDVI сельскохозяйственных культур с точностью разрешения до 0,05 метра. Индексы водного стресса (WSI) используются для определения влажности почвы.

Космический мониторинг.

Более того, совмещение скаутинга со спутниковым дистанционным зондированием позволяет аграриям наиболее эффективно определять причину отклонений от нормы. Кроме того, они могут использовать спутниковые снимки для более эффективной обработки растений и выбора химикатов. Дополнительным преимуществом этого метода по сравнению с GPS и БПЛА является исключение дополнительных затрат на топливо и рабочую силу.

Районы мелких фермерских хозяйств, как правило, обнаруживаются как одна одно крупное поле и (рисунок 4).



Рисунок 4 – Космический мониторинг

Изображения, полученные с помощью БПЛА, позволяют наблюдать за отдельными растениями, участками и, в конечном итоге, над полями, что невозможно при использовании космических спутниковых изображений. Эти преимущества в сочетании со сверхвысоким пространственным разрешением делают БПЛА незаменимыми в мониторинге сельскохозяйственных полей.

Геоинформационные системы

Геоинформационные системы (ГИС) используют детали объектов и данные о местоположении для создания цифровых карт. Дистанционное зондирование необходимо для разделения фермы на отдельные зоны. Кроме того, ГИС и GPS необходимы, потому что все зоны имеют свои отличительные характеристики. Традиционно эти зоны разделяют по типу почвы, питанию, влажности почвы, уровню pH и зараженности вредителями. ГИС в точном земледелии помогает фермерам просматривать карты почвенной съемки и характеристики растений, традиционно выращиваемых в регионе. В то же время спутниковые снимки и аэрофотоснимки предоставляют дополнительную информацию. Следовательно, еще одной удобной функцией ГИС является анализ нескольких задач фермы путем сравнения и манипулирования слоями данных. Для обработки информации о сельскохозяйственных полях используются геоинформационные системы (рисунок 5).

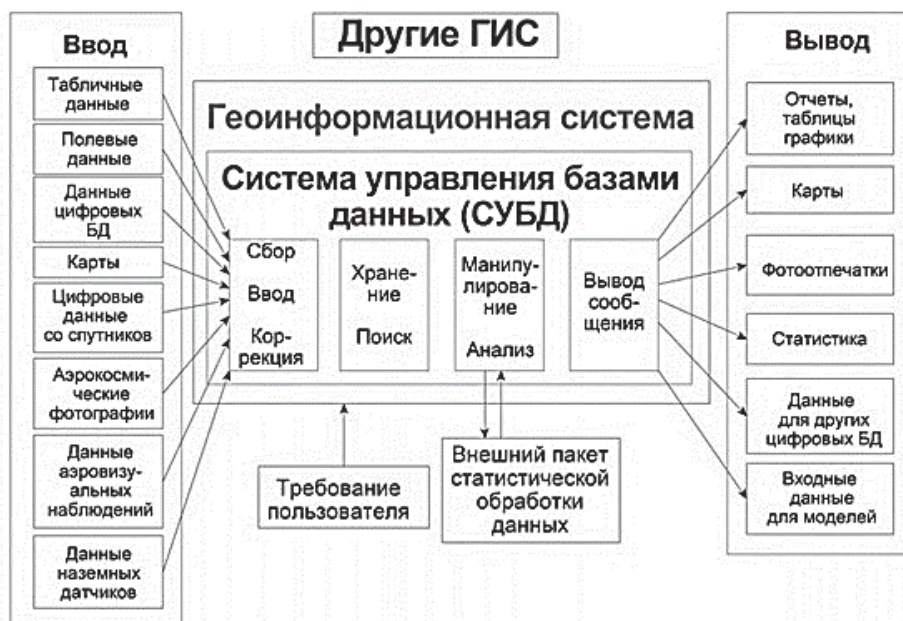


Рисунок 5 – Геоинформационные системы в точном земледелии

Применение геоинформационных сервисов в сельском хозяйстве получило широкое распространение. На входе в геоинформационную систему поступают табличные данные, данные, собранные на поле, данные из цифровых баз данных, оцифрованные карты, цифровые данные со спутников, аэрокосмические фотографии, данные аэровизуальных наблюдений, данные наземных датчиков. Геоинформационные системы производят обработку и хранение этих данных. Они же осуществляют вывод данных по запросам. Данные могут быть как в алфавитно-цифровой, так и в графической форме. На выходе по запросам пользо-

вателей получают отчеты, таблицы, графики, карты полей, статистические данные, полученные в результате обработки.

Методика применения геоинформационных сервисов

В методике применения геоинформационных сервисов можно выделить следующие этапы:

1. Выбор картографической базы исследований, подбор карт и аэрофотоснимков и внесение их в ГИС.
2. Создание базы опытного поля на основе данных предыдущих исследований.
3. Создание базы для текущего мониторинга поля или полей, посев или посадка.
4. Анализ текущего состояния поля и внесение корректировок (внесение удобрений, пестицидов, полив, гребнеобразование).
5. Использование глобального позиционирования для обработки полей.
6. Сбор урожая и составление карт урожайности.
7. Проведение анализа для принятия решения по севообороту.

Геолокация

Геолокация поля позволяет совмещать информацию, полученную в результате анализа почвы, с информацией о предыдущих культурах и удельном сопротивлении почвы (рисунок 6).



Рисунок 6 – Геолокация поля

Почвенные карты могут быть использованы для корректировки полевых затрат.

Математическая обработка данных дистанционного зондирования.

Дистанционный мониторинг сельскохозяйственных полей в период созревания растений позволяет производить их своевременную подкормку и увлажнение [29, 30]. Для выявления экологического состояния поля применяют

методы математической статистики: кригинг метод и бинарную регрессию.

После проведенного предварительного вариограммного анализа, проводится построение модели вариограммы, а затем при помощи метода кригинга вычисляется для прогнозирования урожая [7].

Учет неоднородности поля

Один из важнейших аспектов точного земледелия – неоднородность почвы в разных сегментах поля. Индивидуальный подход к каждому отдельному сегменту помогает повысить урожайность и качество сельскохозяйственных культур, произрастающих на каждом участке, улучшает экологическое состояние поля, а также помогает избежать лишних убытков самому производителю. Однако для того чтобы эффективно распределять, рассчитывать и контролировать точную дозу вносимых удобрений, воды, пестицидов и др. с учетом неравномерности почвы, необходимо точно понимать, как именно происходит процесс переноса вещества в почве.

Мониторинг и картографирование полей в точном земледелии

При создании карты полей учитывается окружающая среда: ландшафт и погода. Здесь на помощь приходят GPS и спутниковое дистанционное зондирование. Функционал точного земледелия позволяет аграриям эффективно контролировать готовность посевов к уборке урожая с помощью вегетационных индексов. Итак, когда листья желтеют и засыхают, так как все соки направляются к плодам, урожай созревает и готов к сбору.

Микроорошение

Система микроорошения позволяет фермерам эффективно планировать орошение, определяя участки с высокой или низкой влажностью почвы.

Кроме того, в орошении используется дифференцированное орошение для оптимизации объема подачи воды для различных участков поля. Такой уровень контроля может значительно повысить эффективность орошения и привести к экономии воды.

Управление сельскохозяйственными культурами с учетом специфики участка (SSCM)

Это концепция управления фермой, основанная на мониторинге, подсчете и реагировании на изменчивость урожая между полями или в пределах одного места. Современные методы SSCM используют точное глобальное позиционирование и измерения на конкретном участке для количественной оценки пространственно-изменяющихся полевых условий. Он может выявить проблемные участки на поле, включая вредителей, сорняки, недостаток влаги и т.д.

Определив участок с отклонениями, производители могут отправить разведчика для составления отчета на основе информации, собранной во время проверки.

Картографирование почвы в точном земледелии

Точное земледелие невозможно без качественного картографирования местности. Фермеры могут оценить свойства почвы, химический состав, питание и многое другое с помощью правильного картографирования. Кроме того, практика картографирования почв существует уже давно, но новейшие технологии

дают еще более точную информацию, что делает новое поколение цифровых карт еще более эффективным.

Интернет вещей в точном земледелии (IoT).

Эта система дает фермерам больше контроля над полем с помощью специальных датчиков, пульта дистанционного управления и программного обеспечения IoT. Точное земледелие на основе Интернета вещей дает фермерам больше контроля над критически важной информацией, от температуры воздуха до состояния почвы. Также все чаще внедряются роботизированные системы, которые могут эффективно сократить ручной труд.

Искусственный интеллект (ИИ)

ИИ и точное земледелие постоянно совершенствуются и предоставляют инновационные инструменты для управления сельскохозяйственным производством. Системы распознавания образов на основе изображений позволяют приложениям регулировать полив и питание растений в соответствии с конкретными требованиями. Например, опрыскиватели, оснащенные искусственным интеллектом, могут распознавать и распылять определенные сорняки, не влияя на выращиваемые культуры.

Проблемы применения концепций точного земледелия

Наряду с широкими преимуществами, этот прорыв в сельскохозяйственных технологиях имеет множество проблем и пробелов, а именно:

- концепция и методы точного земледелия не дают должного эффекта, так как выявить климатические закономерности непросто;
- эта технология упрощает доступ к данным о почве и растениях, но не существует надлежащих решений для управления посевами;
- поскольку это стало возможным благодаря компьютерным технологиям, кибератаки очень распространены. Злоумышленники могут украсть и проникнуть в информацию, если не включены высококласные ключи защиты данных;

Тем не менее, преимущества этой концепции земледелия перевешивают вышеперечисленные проблемы. У фермеров не возникнет трудностей с внедрением этой технологии, если эти проблемы будут каким-то образом решены.

Преимущества точного земледелия

Экономические. При использовании платформ и техники точного земледелия фермер может сэкономить дорогостоящие ресурсы, такие как вода, удобрения, электричество, а также много времени. Чем более точные данные о своем поле есть у фермера, тем лучшие решения он может принять. В результате он может получать более высокие урожаи, тратить меньше на дорогостоящие сельскохозяйственные ресурсы и использовать свое свободное время, чтобы побыть со своей семьей или ухаживать за своей фермой.

Окружающая среда. Самое главное для фермера – это его земля. Его состояние почвы будет контролировать количество урожая. Точное земледелие помогает фермеру ухаживать за своей землей, использовать меньше удобрений, поливать только по мере необходимости, предотвращать заболевания. Когда земля здоровее, вода вокруг нее чище, растения более питательны, и земля может

жить дольше.

Прослеживаемость. Представьте себе ситуацию, когда фермер может вернуться в прошлое и посмотреть, сколько он собрал два года назад, или напомнить себе, когда случилась особенно сильная засуха. Платформы точного земледелия могут собирать эту информацию. Фермерам также становится все полезнее получать помощь от консультантов по растениеводству/агрономов. Консультант по растениеводству может дать фермеру лучший совет, основанный на фактических данных, а не на памяти или знаниях фермера. Кроме того, есть некоторые платформы с простыми в использовании опциями скаутинга.

Регулирование. Одной из основных проблем, с которыми сталкивается фермер, является соблюдение местных правил. Используя методы и технику точного земледелия, фермер может сохранить больше продуктов в списке защиты и быть более гибким в соответствии с изменениями.

Коммуникация по всей цепочке создания стоимости. У фермера есть три основные связи, которые он должен развивать. Это его фермерская команда, его клиенты и его консультант/агроном по растениеводству. Во всех трех отношениях платформы точного земледелия могут сыграть огромную роль. Команда может легко получить доступ к информации о поле, чтобы добавлять заметки и следить за изменениями. Клиенты смогут лучше понять продукты, которые выращивает фермер, и оценят прозрачность фермера, тем самым получая добавленную стоимость. Консультант по растениеводству или агроном может лучше видеть и узнавать о полях фермера и отслеживать его советы. Неудивительно, что все больше фермеров начинают применять методики точного земледелия.

Заключение

Точное земледелие предоставляет фермерам множество возможностей для определения лучших высокоурожайных культур в зависимости от местоположения. Следовательно, правительство может создать потребность в точном земледелии, предоставляя льготные кредиты, чтобы они поощрялись и участвовали в сельском хозяйстве и точном земледелии.

Высокотехнологичное точное земледелие может помочь осуществить зеленую революцию и создать огромное сельское благосостояние и устойчивость. Учитывая растущий спрос на продовольствие, необходимо приложить все усилия, чтобы использовать новые технологические ресурсы, чтобы превратить зеленую революцию в вечнозеленую революцию.

Точное земледелие позволяет производить больше с меньшими затратами. Уже созданы новые беспилотные тракторы с вариаторной техникой, которые наилучшим образом соответствуют требованиям сельского хозяйства.

Более того, использование данных само по себе является проблемой. Огромные объемы данных технологических продуктов и услуг хранятся на удаленных облачных серверах. Это часто используется в коммерческих целях. Теперь крупные корпорации могут собирать, использовать и даже продавать данные от фермеров. Возрастающая напряженность между корпорациями и фермерами по поводу неправомерного использования данных представляет собой серьезную угрозу.

В статье разработана методика применения геоинформационных сервисов в точном земледелии. В методике описан порядок работ, осуществляемых в точном земледелии на основе методов геоинформационного сервиса. К методам геоинформационного сервиса следует отнести: глобальное позиционирование, космический мониторинг, мониторинг при помощи БПЛА, вариаторную сельскохозяйственную технику и интернет вещей [11].

Современные математические модели, используемые для описания процессов, происходящих в почве.

Проблема, однако, заключается в том, что в основе эффективных математических моделей должны лежать не только теоретические данные и имеющиеся на сегодняшний день знания о протекающих в почве процессах с точки зрения физики, но и экспериментальное обеспечение.

Именно это позволит нам при помощи новой математической модели с необходимой точностью понимать, как именно происходят различные процессы в почве.

Литература

1. Астахов В.С., Иванчиков Г.О. Проблемы применения систем точного земледелия при дифференцированном внесении твердых минеральных удобрений и пути их решения // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 1. С. 133-136.
2. Ашмарина Т.И., Бирюкова Т.В., Водяников В.Т., Лемешко Т.Б., Моторин О.А., Никаноров М.С., Степанцевич М.Н., Субаева А.К., Худякова Е.В., Чутчева Ю.В., Эдер А.В., Афанасьева С.И., Греченева А.В., Ермолаева О.С., Зейлигер А.М., Солошенко А.Д., Чернышева К.В., Бабкина А.В., Быстренина И.Е., Лосев А.Н. и др. Цифровая трансформация агропромышленного комплекса Москва, 2022. 160 с.
3. Беленков А.И. Реализация элементов технологии точного земледелия в полевом опыте центра точного земледелия РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева // Фермер. Поволжье. 2015. № 2(33). С. 44-47.
4. Баяндурова А.А., Розенберг И.Н., Шайтура С.В. Комплексный анализ крымских туристических дестинаций // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Экономика и управление. 2016. Т. 2(68). № 1. С. 3-10.
5. Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. Москва, 2009. 692 с.
6. Бондур В.Г., Левин Б.А., Розенберг И.Н., Цветков В.Я. Космический мониторинг транспортных объектов. Учебное пособие. Москва, 2015. 72 с.
7. Буре В.М., Петрушин А.Ф., Митрофанов Е.П., Митрофанова О.А., Денисов В. Опыт применения методов математической статистики для оценки состояния сельскохозяйственных растений // Сельскохозяйственная биология. 2019. Т. 54. № 1. С. 84-90.

8. Водяников В.Т., Субаева А.К., Александрова Н.Р., Эдер А.В. Цифровая трансформация агробизнеса: состояние, факторы и направления развития. Казань, 2023.
9. Дудин М.Н., Шкодинский С.В., Анищенко А.Н. Цифровизация роста: будущее сельского хозяйства России в индустрии 4.0 // АПК: экономика, управление. 2021. № 5. С. 25-37.
10. Канаш Е.В., Якушев В.П., Осипов Ю.А. и др. Оптические характеристики листьев яровой пшеницы при дефиците азота и воды // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2017. № 4. С. 13-17.
11. Князева М.Д., Митрофанов Е.М., Чумаченко С.И., Шайтура С.В. Автоматизированная обработка аэрокосмической информации в пакете Erdas Imagine – Учебное пособие. Бургас, 2018. 114 с.
12. Медведев Ю.Н., Шайтура Н.С. Стандартизация и сертификация в геодезии, землеустройстве и кадастрах (монография) – Изд. ИХНИИТ, Бургас, 2022. 129 с.
13. Митрофанов Е.М., Шайтура Н.С., Залецкий А.В., Серебряков С.А., Липин И.Н. Основы применения беспилотных аэрофотосъёмочных систем – Учебно-методическое пособие / Бургас, 2023. 125 с.
14. Норалиев Н.Х., Юсупова Ф.Э., Кувандиков А.Н. Точное земледелие в цифровом сельском хозяйстве // Вестник науки и образования. 2020. № 23-3(101). С. 14-17.
15. Осипян В.Г., Системы точного земледелия и контроль сельскохозяйственной техники: учебное пособие. Москва: Русайнс, 2020. 90 с. ISBN 978-5-4365-5570-6.
16. Писарева О.А. Обзор приложений на базе БПЛА для точного земледелия // Modern Science. 2021. № 12-2. С. 408-412.
17. Розенберг И.Н., Шайтура С.В., Прудкий А.С., Шайтура Н.С. Практическое применение космического мониторинга. Бургас, 2022. 188 с.
18. Рухадзе Д.М. Обзор применения беспилотных летательных аппаратов в точном земледелии // Академическая публицистика. 2022. № 11-1. С. 424-427.
19. Чумаченко С.И., Князева М.Д., Митрофанов Е.М., Шайтура С.В. Космический мониторинг – Учебное пособие. Бургас, 2017. 120 с.
20. Шайтура Н.С., Останкова Н.В., Родина Е.А., Белю Л.П., Зеленова Г.Я. Продовольственная безопасность России и экономические механизмы ее обеспечения // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 7. С. 209-216.
21. Шайтура С.В., Барбасов В.К., Минитаева А.М., Кожаев Ю.П. Мониторинг сельскохозяйственных земель при помощи беспилотных летательных аппаратов // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2021. № 12. С. 947-953.
22. Шайтура С.В., Белю Л.П., Минитаева А.М., Неделькин А.А. Геоинформационный сервис – новое направление или этап развития цифровой экономики // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. № 8. С. 100-110.

23. Шайтура С.В., Максимов А.В., Филимонов С.Л., Томашевская Н.Г., Барбасов В.К. Цифровая экономика, точное позиционирование и беспилотное вождение в сельском хозяйстве // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 4. С. 38-44.
24. Шайтура С.В., Шайтура Н.С., Байгутлина И.А., Замятин П.А. Практические аспекты применения современных беспилотных летательных аппаратов. Бургаз, 2022. 260 с.
25. Шайтура С.В., Шайтура Н.С., Зеленова Г.Я., Судариков Г.В., Теодорович Н.Н. Цифровые экосистемы и кластеры в агропромышленном производстве // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 3. С. 203-209.
26. Шайтура С.В., Шайтура Н.С., Зеленова Г.Я., Феокистова В.М., Сироткин А.Н. Оценка сельскохозяйственных угодий, на основе специализированных геопорталов // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 9. С. 236-243.
27. Шайтура С.В., Шайтура Н.С., Ордов К.В. Направления устойчивого развития аграрного бизнеса // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 6. С. 239-249.
28. Шайтура С.В., Шайтура Н.С., Прудкий А.С., Кожаев Ю.П., Феокистова В.М. Использование дистанционного зондирования при мониторинге полей в точном земледелии // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2023. № 8. С. 485-492.
29. Шайтура С.В., Швед Е.В., Неделькин А.А., Сивченко С.В., Минитаева А.М. Управление процессом развития систем точного земледелия в сельском хозяйстве // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 5. С. 28-34.
30. Якушев В.П. Цифровые технологии точного земледелия в реализации приоритета «умное сельское хозяйство» России // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2019. № 2. С. 11-15.

УДК 629.7

**Математическое обеспечение моделирования электромагнитных
возмущений на поверхности технических объектов
в потоке ионизирующих излучений**

Владимир Михайлович Артюшенко, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационных технологий и управляющих систем,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

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

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

Рассмотрены и проанализированы вопросы математического обеспечения моделирования электромагнитных возмущений на поверхности космического аппарата, связанные с токами перетеканий по элементам его конструкций. Проанализированы математические модели токов затеканий через оплетки кабельных линий бортовой сети, формируемые как альтернативные пути индуктивному сопротивлению. Рассмотрены локальные магнитные поля. Показано, что магнитные поля внутри гермоконтейнера создаются фотокомптоновскими токами и токами перетеканий по элементам конструкций и оплеткам кабельных линий.

Электромагнитные возмущения, токи перетеканий, элементы конструкций космического корабля, оплетки кабельных линий, магнитные поля, гермоконтейнер.

**Mathematical support for modeling electromagnetic disturbances
on the surface of technical objects in the flow of ionizing radiation**

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,

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

The issues of mathematical support of modeling of electromagnetic disturbances on the surface of the spacecraft related to flow currents along the elements of its structural components are considered and analyzed. Mathematical models of leakage

currents through braids of cable lines of the on-board network, formed as alternative paths to inductive resistance, are analyzed. Local magnetic fields are considered. It is shown that magnetic fields inside the sealed container are created by photo-Compton currents and flow currents along structural elements and braids of cable lines.

Electromagnetic disturbances, flow currents, spacecraft structural elements, cable line braids, magnetic fields, sealed windowliner.

Введение. Вопросы формирования электромагнитных возмущений на поверхности технических объектов в потоке ионизирующих излучений давно интересуют ученых и инженеров. Одной из причин такого интереса являются космические аппараты (КА) и станции, находящиеся во время эксплуатации в космическом вакууме и подверженные воздействиям ионизирующих излучений различного типа [1-7]. Исследования в этой области необходимы для построения комплексных математических моделей, пригодных для расчетно-экспериментального моделирования и последующего обоснования состава испытаний.

Формирование электромагнитных полей при облучении объектов и сред обусловлено анизотропией и неоднородностями фотокомптоновских токов. Создаваемые в сложных неоднородных средах электромагнитные поля могут быть разделены на три группы [1]:

- квазистационарные, формируемые осредненными фотокомптоновскими токами;
- излучаемые (роторные), образующиеся на масштабах неоднородностей объекта и длины импульса облучения;
- соответствующие собственным частотам системы.

В зависимости от технической постановки задачи формирующиеся поля подразделяются на:

- поля электромагнитных излучений (ЭМИ) ближней зоны, образующиеся при взаимодействии излучений с атмосферой, в частности, с внешней атмосферой объекта;
- поля ЭМИ, генерируемые системой (ЭМИ ГС), создаваемые фототоками у поверхности объекта;
- поля внутри ЭМИ (ВЭМИ), генерируемые жесткой спектральной составляющей внутри объекта.

Исследования в области образования полей достаточно обширны и связаны с изучением многих физических процессов:

ЭМИ ближней зоны (ионизация атмосферы, формирование фотокомптоновских токов, нелинейный режим торможения электронов, формирование электромагнитных полей);

ЭМИ ГС (эмиссия электронов, формирование электромагнитных полей, барьерный эффект, токи перетеканий по элементам конструкций, многомерные эффекты);

ВЭМИ (ионизация внутренней атмосферы, формирование фотокомпто-

новских токов и электромагнитных полей).

Рассмотрим и проанализируем более подробно вопросы математического обеспечения моделирования ЭМИ ГС, связанные с токами перетеканий по элементам конструкций КА.

Токи по элементам конструкций. Формирование компенсационных токов в соединительных элементах конструкции обусловлено двумя причинами: прямым перетеканием фототоков между поверхностями; выравниванием потенциалов по всей поверхности объекта после ухода наиболее энергичных фотоэлектронов на расстоянии, сравнимые с размером объекта.

Влияние фототоков от мягкого рентгеновского излучения сказывается только на элементах конструкций, расположенных на расстоянии менее размера электронного облака. Фототоки могут оказывать существенное локальное воздействие за счет собственных больших плотностей. Возможное разрушение электронного барьера приведет к заметному увеличению токов перетеканий по конструкциям.

Убегать на расстояния, превышающие характерные размеры объекта, могут только электроны, выбиваемые жестким излучением. Плотность таких фототоков малы, но они собираются с больших площадей и в случае вакуума будут значительны. Токи по соединительным элементам объекта можно промоделировать токами в системе, состоящей из двух пластин из различных материалов, соединенных гальванически и облучаемых неравномерно. Наиболее простая типовая схема – это вакуумный диод с переменным расстоянием между пластинами, замкнутыми на активно-индуктивную ($R-L$) нагрузку (рисунок 1).

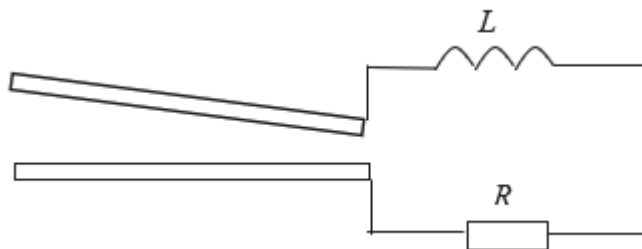


Рисунок 1 – Диодная система с переменным расстоянием между пластинами и $R-L$ нагрузкой

При моделировании будем считать, что процессы формирования токового импульса определяются электрофизическими свойствами системы, а не эффектами запаздывания светового сигнала. Это можно предположить при

$$t_{имп}c > V_{об},$$

где $t_{имп} \cong 20$ нс – время импульса; c – скорость света в вакууме; $V_{об}$ – характерный объем объекта.

Интенсивность облучения и токи тогда можно считать квазиравновесными по пространству.

В сделанных предположениях диодную систему с переменным расстоя-

нием между пластинами можно исследовать, осреднения состояния диодов с плоскопараллельными электродами.

Воспользуемся представлением о формировании электронного облака конечных размеров возле облучаемой поверхности и построим электрическую схему, эквивалентную вакуумному диоду (рисунок 2).

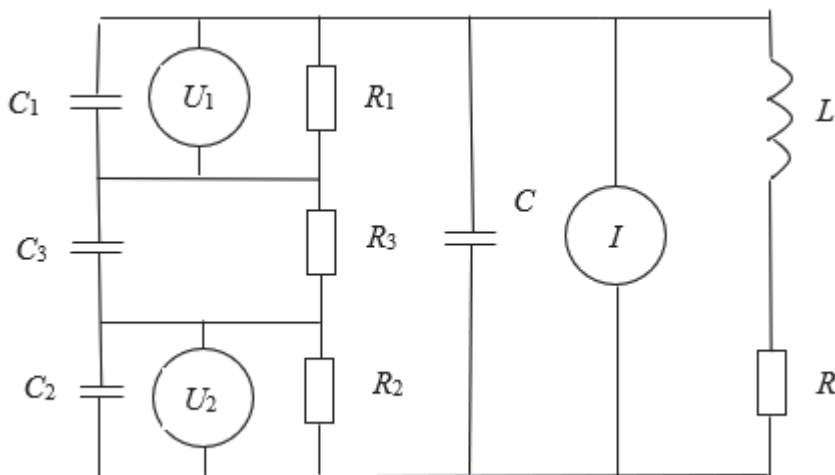


Рисунок 2 – Электрическая схема, эквивалентная вакуумному диоду, с переменным расстоянием между электродами

На рисунке 2 введены следующие обозначения: C_1, C_2, C_3 – конденсаторы; U_1, U_2 – источники напряжения; R_1, R_2, R_3 – сопротивления; C – собственная емкость диода (элементов объекта); I – источник тока; L, R – характеристики нагрузки.

Источники напряжения, конденсаторы и сопротивления моделируют часть диода с развитым виртуальным катодом, запирающий эффект электронного облака. Токковый источник соответствует потокам электронов, переносимых с электрода на электрод, и частично прямым фототокам по корпусу.

При отсутствии плазмы в области запираения токи по элементам крепежа, компенсационные токи через R и L , будут определяться токовым источником, который можно аппроксимировать соотношением

$$I = -k_2 S_2 J_2 + \frac{S_2}{S_1 + S_2} (k_1 S_1 J_1 + k_2 S_2 J_2) = \frac{S_1 S_2}{S_1 + S_2} (k_1 J_1 + k_2 J_2),$$

где S_1, S_2 – полные поверхности пластин; k_1, k_2 – доли облучаемой поверхности, не экранированной виртуальным катодом; J_1, J_2 – поверхностный фототок пластин.

Для диодной системы (рисунок 1), облучаемой равномерно,

$$I = \frac{2,1 \times 10^6 S}{t_{умн}} \sum_k \frac{I_{vk} (\mu_{vek1} - \mu_{vek2})}{\varepsilon_{vk}}, \text{ А}, \quad (1)$$

S – полная поверхность пластин, см²; I_{vk} – спектральная интенсивность излучения, кал/ см²; μ_{vek1}, μ_{vek2} – спектральный выход фотоэлектронов с по-

верхности пластин, эл/фот; ε_{vk} – жесткость излучения, кэВ; $t_{имп}$ – время импульса, нс.

Приведенная токовая оценка будет верна, если разрядка успевает происходить через $(R-L)$ -цепочку. Для типового КА емкость системы солнечные батареи-гермоконтейнер (СБ-ГК) можно оценить, как емкость двух пластин

$$C \approx \frac{S_0}{2d} = \frac{2\pi RL}{2d} \approx \frac{6m^2}{2m} = 300 \text{ см} = 330 \text{ пф},$$

где S_0 – боковая площадь гермоконтейнера; d – среднее расстояние между гермоконтейнером и солнечными батареями.

Индуктивность L для типовой схемы КА представим, как индуктивность системы линия-поверхность, в области крепежа солнечных батарей,

$$L = \frac{l}{2\pi} \ln \frac{d}{a},$$

где l – длина крепежа; d – расстояние до поверхности; a – радиус сечения крепежа. При $l = 10 \text{ см}$, $d = 10 \text{ см}$, $a = 5 \text{ см}$ индуктивность составит $L = 10^{-3} \text{ мкГн}$.

Соответственно для частоты $f = \frac{1}{2\tau_\phi} = 10^8 \text{ Гц}$ получим емкостное X_c и индуктивное X_L сопротивление [4]

$$X_c = \frac{159}{f[MГц]C[нФ]} \cong \frac{159}{10^2 \times 0,33} \text{ Ом} = 4,5 \text{ Ом},$$

$$X_L = 6,28f[MГц]L[мкГн] \cong 6,3 \times 10^2 \times 10^{-3} \text{ Ом} = 0,6 \text{ Ом}. \quad (2)$$

Омическое сопротивление

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где ρ – удельное сопротивление; l – длина; S – сечение крепежа. Для стали ($\rho = 9,8 \times 10^{-6} \text{ Ом} \times \text{см}$, $l = 10 \text{ см}$), при $S = 3,14 \times 5^2 \text{ см}^2$ активное сопротивление составит $R = 1,2 \times 10^{-6} \text{ Ом}$.

С учетом плохого механического контакта ($l = 0,1 \text{ см}$) получим оценку $R = 3 \times 10^{-3} \text{ Ом}$.

Таким образом, основное сопротивление перетеканию компенсационных токов оказывает собственная индуктивность каналов, которая, однако, мала ($0,6 \text{ Ом} \times 220 \text{ А} = 130 \text{ В}$), чтобы подавить токовый источник. Поэтому оценка (1) верна.

В общем случае поведение электрической схемы (рисунок 2), эквивалентному вакуумному диоду, может быть описано уравнением

$$I = I_1 + I_2, \quad I_0 = I(t) \left(1 - \frac{U}{U_0}\right), \quad (3)$$

$$I_1 = C \frac{dU}{dt}, \quad I_2 = \frac{1}{L} \int_0^t U dt, \quad (4)$$

где I – ток источника; I_1 – ток через емкость; I_2 – ток через индуктивность; $R = 0$; U – напряжение на емкости; U_0 – запирающий потенциал; $I(t)$ – ток, перетекающий без эффекта запираания.

Подставим I_1, I_2 из (4) в (3) и, продифференцировав по времени, получим

$$C d_n U + \frac{U}{L} = \frac{-I(t)}{U_0} d_t U + d_t I(t) \left(1 - \frac{U}{U_0}\right).$$

С учетом, что $\omega_0 = \frac{1}{(LC)^{0,5}}$ – собственная частота системы; $I(t) = I_0 e^{i\omega t}$;

$$\omega_1 = \frac{1}{CU_0} - \text{обратное время зарядки конденсатора, приведем к уравнениям}$$

$$\begin{aligned} d_n U + \omega_1 e^{i\omega t} d_t U + (\omega_0^2 + i\omega\omega_1 e^{i\omega t}) U &= i\omega\omega_1 U_0 e^{i\omega t}, \\ d_n U + \omega_1 \cos(\omega t) d_t U + (\omega_0^2 + \omega\omega_1 \sin(\omega t)) U &= \\ &= -\omega\omega_1 U_0 \sin(\omega t), \end{aligned} \quad (5)$$

где $t \in \left[-\frac{\pi}{2\omega}, \frac{\pi}{2\omega}\right]$.

Нелинейное уравнение (5) имеет два предельных случая:

$\omega_0 \geq \omega_1$ – характерное время перетеканий меньше времени зарядки конденсатора;

$\omega_0 \leq \omega_1$ – зарядка до запирающего потенциала происходит быстрее стоков.

При $\omega_0 \geq \omega_1$ нелинейности малы, решение (5) имеет вид

$$U = U_0 \frac{\omega\omega_1}{\omega^2 - \omega_0^2} \sin(\omega t),$$

$$I_{\max} = I_0,$$

где I_{\max} – максимальные токи.

Очевидно, что в этом случае максимальные токи перетеканий не ограничиваются слабым перепадом напряжения $\left(\frac{\omega\omega_1}{\omega_0^2} \ll 1\right)$.

Когда $\omega_0 \leq \omega_1$, система приходит к насыщению за времена $t \sim 1/\omega_1$. При этом

$$\begin{aligned} U_{\max} &= U_0, \\ I_{\max} &= U_0 C \omega_0 = U_0 \sqrt{C/L}. \end{aligned} \quad (6)$$

Предельный перепад потенциалов соответствует жесткости эмитируемых с поверхности электронов. Максимальный ток близок к токам перетеканий при подаче напряжения U_0 на один из элементов конструкции.

Для рассматриваемого базового случая

$$t_0 = \frac{\pi}{2\omega_0} = \frac{\pi}{2} \sqrt{LC} \cong 4,5 \text{ нс},$$

$$t_1 = \frac{\pi}{2\omega_1} = \frac{\pi C U_0}{2I_0} = 45 \text{ нс},$$

$$\frac{t_{\text{умп}}}{2} = \frac{\pi}{2\omega} = 10 \text{ нс},$$

что соответствует первому предельному соотношению $\omega_0 \geq \omega_1$ и вышеприведенным оценкам.

При интенсивных коротких импульсах токи перетеканий ограничены. Их максимальное значение можно оценить по (6)

$$I_{\max} = \frac{U_0 [B]}{30} k, A,$$

где $k = \sqrt{C/L} \approx 0,3 - 3$ в зависимости от конструкции.

Характерные токи по элементам крепежа для базового решения и типового КА составляют 200-250 А.

Токи затеканий. Токи затеканий через оплетки кабельных линий бортовой сети формируются как альтернативный путь индуктивному сопротивлению. Эквивалентная электрическая схема затеканий в гермоконтейнер через оплетки кабельных линий представлена на рисунке 3, где C_1 , L_1 и R_1 – относятся к линии

кабель-блок-крепёж-гермоконтейнер.

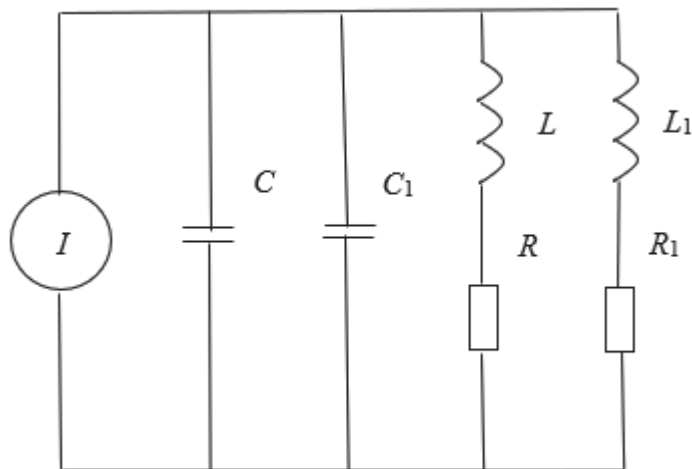


Рисунок 3 – Электрическая схема, для оценки затеканий по оплетке кабельных линий

Также как и в случае с токами через крепежи внешних конструкций КА, основным сопротивлением для токового импульса будет индуктивная составляющая X_L . Воспользовавшись (2) для $l_1=100$ см, $d_1=5$ см, $a_1=1$ см, получим $L_1=2,5 \times 10^{-6}$ мкГн, $X_L = 15$ Ом. По оценкам, ток по оплетке кабеля питания от солнечных батарей при торцевом облучении объекта составит 9 А.

Внутри гермоконтейнера расщепление токовых каналов на блоках даёт коэффициент ослабления $k = 5-10$ (по числу линий и гальванически не развязанных крепежей). В результате токи в оплетках кабельных линий от блока питания составят 0,9-1,8 А, а токи в оплетках кабельных линий межблочных соединений – 0,09-0,35 А.

Задача диссипации заносимых токов имеет диффузный и стохастический характер. В работе [7], в результате проведенных экспериментов, были получены средние оценки токов в оплетках кабельных линий КА, представленные совместно с аналитическими оценками, в таблице 1.

Типовая конструкция КА (Star sat) нагружался импульсным напряжением до 100 кВ через солнечные батареи, после чего проводились измерения в кабельных линиях. Экспериментальные результаты были получены для импульсов длительностью 70 нс, что несколько меняет комплексную проводимость системы. Соответствие реальной токовой картине достигается заземлением корпуса КА, что уменьшает накопление запирающего потенциала.

Заметим, что в [7] было проведено большое количество замеров и показано, что изучаемые величины имеют сильный разброс, то есть являются стохастическими при свернутом описании.

Таблица 1 – Токи в оплетках кабельных линий космического аппарата

№	Вид кабельных линий	Оценка, А		Эксперимент, А
		Базовый вариант	Разброс	
1	Ток в шейке соединения СБ-ГК	220	-	200
2	Ток в кабелях питания от СБ	9	7-12	10
3	Ток в оплетках кабельных линий от блока питания	1,3	0,9-1,8	0,5-2
4	Токи в оплетках кабельных линий внутри приборов	0,2	0,09-0,35	0,002-0,01* 0,1-0,4

* Для блоков, не связанных прямо с блоками питания

На рисунке 4 [7], представлено распределение относительных уровней токов I/I_0 при многочисленных изменениях, где N – количество датчиков.

В работе [7], было показано, что основной разброс токовых замеров укладывается в 70%-ю зону отклонений. Отдельные измерения превышают среднее значение до 6 раз.

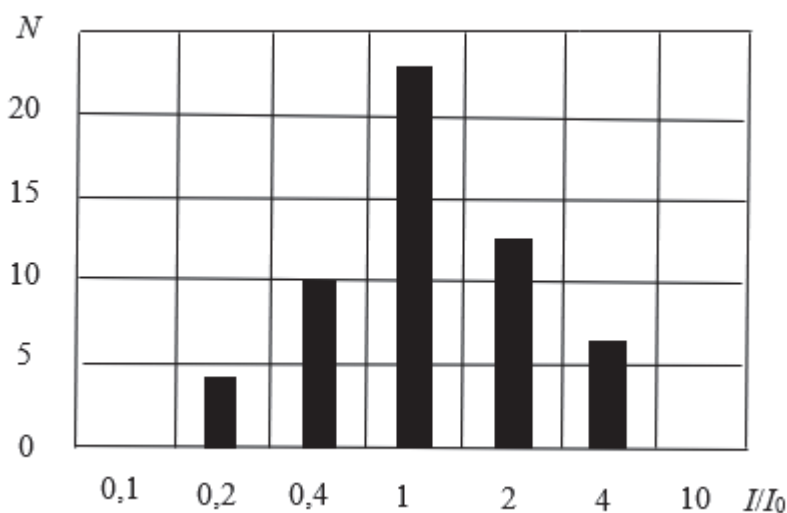


Рисунок 4 – Распределение числа датчиков в зависимости от относительного уровня токов в оплетках кабельных линий внутренних приборов

Затекание токов по бортовой кабельной сети – не единственный канал проникновения электромагнитных возмущений в гермоконтейнер. Существует еще занос роторных полей электромагнитных излучений генерируемые системой через диэлектрические отверстия и прямое затекание токов по металлическим

конструкциям, определяемое резким фронтом токового импульса и конечностью скорости распространения электромагнитных полей.

Прямой занос полей ЭМИ ГС можно пренебречь по следующим причинам:

- малой роторной составляющей и большой длины волны;
- экспоненциального ослабления при затекании;
- отсутствия механизмов локализации, как при токовом заносе.

Амплитудный коэффициент ослабления имеет порядок 2×10^{-2} для трансформации в роторные поля и 10^{-2} - 10^{-4} при щелевом затекании.

для оценки затеканий по металлическим конструкциям рассмотрим задачу распределения плотностей токов в полу бесконечном цилиндре диаметром R_0 с токовым источником $I_0 e^{i\omega t}$ на оси торцевой части цилиндра. Считаем, что цилиндр заполнен проводящими элементами – кабелями, блоками и др.

Для описания используем представление о среде с комплексной диэлектрической проницаемостью. Тогда средние по объему плотности токов могут быть описаны уравнением [5]

$$\partial_{zz}J + \frac{1}{R} \partial_R R \partial_R J = \frac{\varepsilon^*}{c^2} \partial_n J \quad (7)$$

с граничным условием $J = 0$ при $R = R_0$, что соответствует стоку на внешнюю проводящую поверхность цилиндра.

Будем искать характерное решение в виде

$$J = J_0 \left(1 - \frac{R^2}{R_0^2}\right) e^{i\omega t} e^{-kz},$$

где $\omega = \frac{\pi}{2\tau_\phi}$; τ_ϕ – время нарастания токового импульса.

После нормировки торцевого граничного условия

$$J_0 = \frac{2I_0}{\pi R_0^2}$$

и решения (7) получим

$$k^2 = \frac{4}{R^2} - \frac{\pi^2 \varepsilon^*}{4c^2 \tau_\phi^2}.$$

Если учесть локализацию токов в проводящих элементах, то

$$I_{\text{л}} = JS_{\text{эф}} = JW^2,$$

где $S_{\text{эф}}$ – эффективная общая площадь, приходящаяся на отдельный проводник; W – типовое межблочное расстояние.

В итоге максимальные локальные токи

$$I_{\text{л. max}} = I_0 \frac{2S_{\text{эф}}}{\pi R_0^2} \left(1 - \frac{R^2}{R_0^2}\right) \exp \left[- \left(\frac{4}{R^2} - \frac{\pi^2 \varepsilon^*}{4c^2 \tau_\phi^2} \right)^{0,5} z \right].$$

На оси для длинных импульсов $\tau_\phi c \gg R, z = \frac{R}{2}, S_{\text{эф}} \cong 30 \text{ см}^2, I_0 = 10 \text{ А}, R_0 = 10^2 \text{ см}$ получим $I_{\text{л. max}} = 7 \times 10^{-3} \text{ А}$, что согласуется с результатами экспериментов [7], в которых при отсоединении кабеля питания от солнечных батарей уровни токов в линиях внутренних блоков сохранялись.

Таким образом, токовые затекания по бортовой кабельной сети являются основным каналом заноса электромагнитных возмущений в гермоконтейнер и

могут быть использованы в качестве элемента трансформации возмущений на типовом объекте в составе базовой модели оценки электромагнитной устойчивости.

Локальные магнитные поля. Магнитные поля внутри гермоконтейнера создаются фотокомптоновскими токами, средние по объему поля, и токами перетеканий по элементам конструкций и оплеткам кабельных линий, локальные поля. Локальные магнитные поля имеют большие значения непосредственно у поверхности токопроводящих элементов. Поскольку кабельные линии собираются в жгуты и крепятся на каркасных элементах конструкций, именно локальные магнитные поля определяют наводки в бортовой сети.

Средние магнитные поля можно оценить из соотношения [5]

$$H = \frac{IF}{2} p = 5 \times 10^{-3} kJ[A/M^2] F[см] A/м,$$

где F – масштаб неоднородности фототоков; p – геометрический коэффициент ($p = 0,3 - 0,6$), учитывающий также угловую зависимость фото эмиссии.

Положив $F = 100$ см – размер гермоконтейнера, получим характерное среднее поле 1,4 А/м.

Локальные магнитные поля возникают от токов перетеканий с блоков, накапливающих избыточный заряд под действием ионизирующих излучений. Оценку локальных полей получаем из соотношения

$$H_{\text{л}} = \sum_k \frac{J_k(1-\beta_{\text{еек}})(1-\exp(-L_{\text{бл}}/\alpha_{\text{vk}}))S_{\text{бл}}}{2\pi R_k N_c},$$

где J_k – плотность фотокомптоновских токов; $\beta_{\text{еек}}$ – коэффициент вторичной электронной эмиссии, учитывающий обратные токи; $L_{\text{бл}}$ – толщина блока; α_{vk} – пробег квантов через заполнение блока; $S_{\text{бл}}$ – площадь блока; R_k – радиус стока (кабеля); N_c – количество стоков.

Характерные уровни локальных магнитных полей для базового решения и типового макета КА приведены в таблице 2 [5].

Таблица 2 – Локальные магнитные поля в характерных местах прокладки бортовой кабельной сети КА (базовый вариант)

№	Токонесущий элемент	Характерный радиус сечения, см	Амплитуда локального магнитного поля, А/м
1.	Штанга соединения солнечной батареи и гермоконтейнера	5	700
2.	Кабель питания от солнечных батарей	0,5	290
3.	Кабельные линии от блока питания	0,5	40
4.	Кабельные линии от антенного блока	0,5	20
5.	Кабельные линии внутренних приборов	0,5	6,5-20

Выводы. Таким образом, проанализированы вопросы формирования электромагнитных возмущений на поверхности технических объектов в потоке ионизирующих излучений. Получены математические модели для обеспечения моделирования электромагнитных возмущений на поверхности космического аппарата, связанные с токами перетеканий по элементам его конструкций. Осуществлен анализ математических моделей токов затеканий через оплетки кабельных линий бортовой сети, формируемые как альтернативные пути индуктивному сопротивлению. Показано, что токовые затекания по бортовой кабельной сети являются основным каналом заноса электромагнитных возмущений в гермоконтейнер и могут быть использованы в качестве элемента трансформации возмущений на типовом объекте в составе базовой модели оценки электромагнитной устойчивости.

Проанализированы математические модели локальных магнитных полей внутри гермоконтейнера. Показано, что они возникают от токов перетеканий с блоков, накапливающих избыточный заряд под действием ионизирующих излучений. Получены выражения позволяющие получить оценку локальных полей для базового решения и типового макета космического аппарата.

Литература

1. Бубер В.Б., Михайлов М.В. Электромагнитные поля, возбуждаемые в полости проводящей оболочки потоками проникающей радиации // ЖТФ. 1979. Т. 49. вып. 10. С. 2085-2096.
2. Казаков И.Е., Артемьев В.М., Букалев В.А. Анализ систем случайной структуры. М.: Наука, 1993. 356 с.
3. Крон Г. Исследование сложных систем по частям – диокоптика. М.: Наука, 1972. 542 с.
4. Ленк Дж. Электронные схемы: Практическое руководство. М: Мир, 1995. 343 с.
5. Медведев А.А., Меньшиков В.А., Силантьев А.Ю. Стохастическое дифференциальное моделирование сложных технических систем. М.: Наука, 1999. 324 с.
6. Николис Дж. Динамика иерархических систем: Эволюционное представление. М.: Мир, 1989. 486 с.
7. Seideer W., Wondra I., Walters D. High-level current injection testing of the SGEMP test, analysis and research satellite (star sat) // Ibid. 1981. Vol. NS-28, #6. Н. 4211-4220.

УДК 629.7.036.54

Определение эффективности процесса наддува топливных баков ракетной двигательной установки

Виталий Александрович Бершадский, доктор технических наук,
профессор кафедры «Техника 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

Пояснены назначение и режимы функционирования системы наддува топливных баков. Определено понятие эффективности процесса наддува и на основе анализа экспериментальных данных обоснованы основные направления её повышения. Рассмотрены особенности процесса вытеснения жидкого водорода из топливного бака без использования системы наддува.

Система наддува, газовый объём бака, параметры и энергия газа в баке, криогенное топливо, объёмное паросодержание топлива, безнаддувная схема топливоподачи.

Determination of efficiency of fuel tanks pressurization process rocket propulsion system

Vitaliy Alexandrovich Bershadskiy, doctor of technical Sciences,
Professor at 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 purpose and operating modes of the fuel tanks pressurization system are explained. The concept of efficiency of the supercharging process was determined and on the basis of the analysis of experimental data, the main directions of its increase were substantiated. The features of the process of displacement of liquid water from the fuel tank without using the pressurization system are considered.

Pressurization system, gas volume of the tank, parameters and energy of the gas in the tank, cryogenic fuel, volumetric steam content of the fuel, naturally aspirated fuel supply scheme.

Предварительные пояснения

Система наддува (СН) топливных баков двигательной установки (ДУ) с ЖРД предназначена [1] для решения задач: работы топливных насосов без кавитации, устранения провалов давления в баках на переходных режимах работы двигателя, сохранения прочности баков при воздействии на них сжимающих

усилий.

Главной задачей СН является обеспечение работы насосов ТНА без срыва в работе при активном функционировании двигателя. На практике решение этой задачи в первом приближении связано с определением на основе уравнения состояния идеального газа расхода газообразного рабочего тела m_r для получения необходимого давления в баке:

$$m_r = p_{гб} \cdot V_{жб} / (R_r \cdot T_{г\text{ вх}} \cdot \tau). \quad (1)$$

Параметры в уравнении (1) имеют следующее смысловое назначение: $p_{гб}$ – это требуемая величина давления газа наддува в баке; $V_{жб} / \tau$ – объёмный расход жидкого компонента топлива (КТ) из бака; R_r – газовая постоянная рабочего тела; $T_{г\text{ вх}}$ – температура газа на входе в бак.

При этом требуемую величину $p_{гб}$ рассчитывают [5] по зависимости:

$$p_{гб} = p_{жн} + \rho_{ж} \cdot w_{жн}^2 / 2 + \Delta p_m - p_{жб}, \quad (2)$$

где $p_{жб}$ – давление столба жидкости в баке с учётом инерционных и гравитационных сил; $p_{жн}$ – давление на входе в насосы, превышающее давление p_s , которое соответствует состоянию насыщения жидкости; Δp_m – гидравлическое сопротивление расходной магистрали; $\rho_{ж}$ и $w_{жн}$ – плотность и скорость жидкости на входе в насосы.

Величину $T_{г\text{ вх}}$ устанавливают [2] для уменьшения расхода газа с использованием, например, эмпирической зависимости:

$$m_r / m_{ж} = (T_{г\text{ вх}} / T_{гж})^{-\beta}, \quad (3)$$

где $m_r / m_{ж}$ – отношение расхода газа наддува при $T_{г\text{ вх}}$ к расходу при $T_{гж}$, равной температуре $T_{ж}$ – жидкого компонента топлива; β – эмпирический коэффициент, учитывающий геометрические характеристики бака и теплофизические характеристики газа наддува.

Результаты расчёта по зависимости (3), представленные на рисунке 1, демонстрируют возможность существенного уменьшения расхода газа наддува при увеличении $T_{г\text{ вх}}$. Это является одним из способов уменьшения массы СН в составе современных ДУ, но приводит к увеличению теплоотдачи в стенки бака и жидкий компонент топлива.

Зависимость (3) с точки зрения технической термодинамики [4] не позволяет оценить эффективность процесса – эксергию газа наддува, то есть максимальную работу газа по вытеснению КТ из бака за счёт теплосодержания газа наддува на входе в бак.

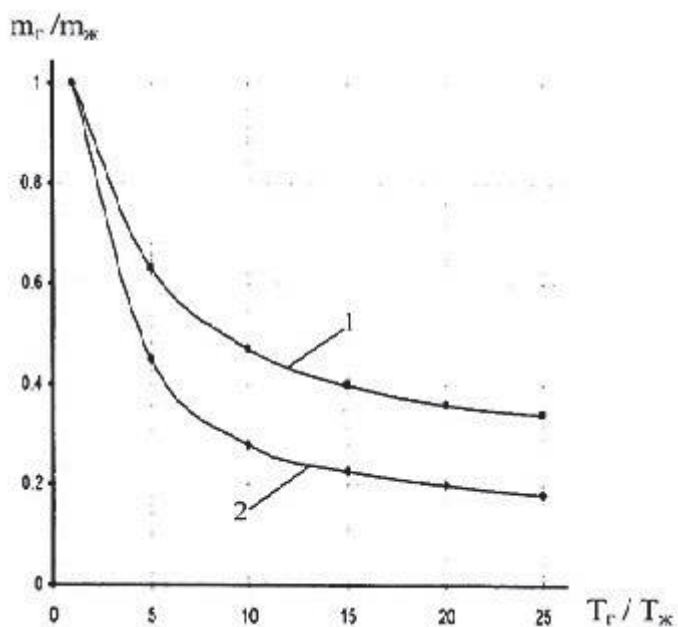


Рисунок 1 – Влияние температуры на расход газа (гелия) для наддува бака при различном отношении поверхности бака F к его объёму V : 1 – $F/V=3$, 2 – $F/V=1,5$

При создании ДУ с ЖРД в каждом конкретном случае из-за отсутствия данных об эффективности процесса наддува приходится производить экспериментальную отработку СН на специально создаваемых экспериментальных установках (ЭУ).

Обоснование эффективности процесса наддува

Наддув бака и вытеснение жидкого КТ из бака на вход насоса является нестационарным процессом, который осложнён теплообменом газа со стенками бака и с жидкими КТ, а также массообменом газа с КТ.

При допущении о стационарности происходящих процессов, относительное количество тепла в газовом объёме бака, которое фактически может быть использовано для совершения работы вытеснения КТ на вход насоса в конечных разностях можно представить в виде:

$$Q_{гб} / Q_{гвх} = 1 - (Q_{ст} + Q_{жб}) / Q_{гвх}, \quad (4)$$

где $Q_{гвх} = m_r \cdot c_r \cdot T_{гвх} \cdot \tau$ – теплосодержание газа наддува на входе в бак,

$Q_{жб}$ и $Q_{ст}$ – количество тепла, пошедшее на прогрев жидкого КТ и несмоченной стенки бака, $Q_{гб}$ – количества тепла, которое может быть использовано для совершения работы газового объёма в баке.

При условии, что максимальная работа газа в баке $p_{гб} \cdot V_{жб}$ в количественном отношении эквивалентна $Q_{гб}$, с учётом уравнения состояния идеального газа (3), левую часть уравнения (4) можно представить в виде:

$$\varphi_r = Q_{гб} / Q_{гвх} = R_r \cdot T_{гб} / (c_r \cdot T_{гвх}) = [(\kappa - 1) / \kappa] \cdot (T_{гб} / T_{гвх}), \quad (5)$$

где $T_{гб}$ и $T_{гвх}$ – температура газа наддува соответственно в газовом объёме

бака и на входе в бак, R_g – газовая постоянная, c_g – изобарная теплоёмкость газа, κ – показатель адиабаты газа, φ_g – безразмерный коэффициент, характеризующий эффективность процесса наддува бака.

При автономной отработке СН на ЭУ в НИЦ РКП, содержащих цилиндрические баки объёмом $9,6 \text{ м}^3$, которые заправляли жидкими КТ водород или кислород, рассмотрено влияние режимных параметров бака на φ_g – эффективность процесса наддува при расходах жидких КТ из баков [2].

В период проведения экспериментальных работ на ЭУ изменяли направление подачи газа относительно вертикальной оси бака и величины параметров газа на входе в бак (температуры и скорости газа).

Применяли подачу газа вдоль вертикальной оси бака (к верхнему днищу бака или к поверхности жидкости) или в радикальном направлении (к стенкам бака перпендикулярно или под углом к оси бака). При этом изменения относительных значений температуры и скорости газа на входе в бак имели значения: $T_{гвх} / T_{ж} = 1,5 - 20$; $w_{гвх} / w_{ж} = (0,15 - 3,5) \cdot 10^{-3}$.

В этих соотношениях $T_{ж}$ – температура жидкости в баке, $w_{гвх}$ – скорость газа на входе в бак, $w_{ж}$ – скорость истечения жидкости из бака.

На основе проведенных экспериментальных измерений распределения температуры вдоль вертикальной оси бака в газовом объёме бака, в верхнем слое жидкости и на стенках бака произведена расчётная оценка величин теплового баланса: $Q_{гб} / Q_{гвх}$; $Q_{жб} / Q_{гвх}$; $Q_{ст} / Q_{гвх}$.

Установлено, что величина φ_g при осевой подаче по направлению к поверхности жидкости может иметь значения от 0,3 до 0,65, а при радиальной от 0,2 до 0,42. Это связано с тем, что минимальные потери тепловой энергии газа на прогрев стенок бака происходят при движении газа на выходе из газовода по направлению к поверхности жидкости.

При этом изменение относительной скорости $K_w = w_{гвх} / w_{ж}$ оказывает значительное влияние на деформацию поля температуры в газовом объёме бака и определение среднееобъёмного значения $T_{гб}$. Существует значение K_w , при котором величина эффективности процесса имеет максимальное значение, что иллюстрирует рисунок 2.

Увеличение относительной скорости газа сначала способствует росту φ_g в связи с улучшением перемешивания газового объёма в баке, а после достижения максимальной величины φ_g рост величины K_w (скорости газа) интенсифицирует теплоотдачу в жидкость, что уменьшает φ_g .

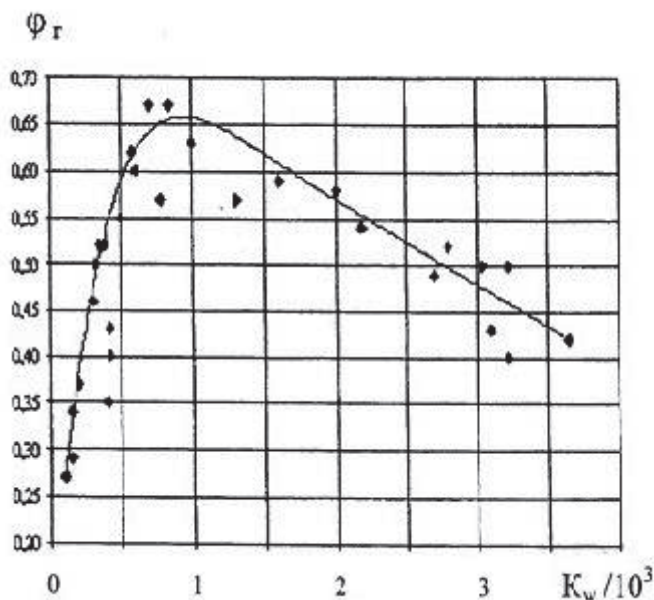


Рисунок 2 – Влияние скорости ввода газа наддува в бак на эффективность процесса рабочего наддува

Режимами наддува, определяющим перемешивание газового объема, являются равномерность по площади сечения бака и дальноточность струи, истекающей из газопровода в бак. При осевой подаче газа наддува в бак, изменяя эти режимы, можно получить оптимальное значение за время наддува [2].

В результате проведенных исследований на криогенных компонентах топлива (водород и кислород) установлено:

- наибольшее значение эффективности процесса наддува бака, заправленного криогенным КТ, до величины $\phi_g = 0,65$ может быть обеспечено при осевой подаче газа в бак по направлению к поверхности жидкого КТ;

- основным фактором повышения эффективности процесса наддува и уменьшения расхода газа наддува является среднеобъемное значение температуры в газовом объеме бака – $T_{гб}$;

- минимальные потери тепловой энергии газа наддува могут быть обеспечены при среднеобъемном значении $T_{гб} \approx T_{ж}$, что обуславливает необходимость рассмотрения безнаддувной схемы системы топливоподачи.

Определение особенностей безнаддувной схемы

Схема подачи топлива в двигатель без использования системы наддува бака представляет собой испарительную систему восстановления давления в газовом объеме бака. Подача КТ из баков в двигатель в процессе расширения газового объема происходит под давлением насыщенного пара, соответствующего температуре жидкого КТ [2]. Реализация такой схемы зависит от следующих факторов:

- способности насосов функционировать без срыва в работе на кипящем

при $T_{\text{ж}} = T_{\text{с}}$ – двухфазном КТ;

- возможности равновесного восстановления давления в газовом объёме бака за счёт тепла накопленного в объёме жидкого КТ;

- допустимой величины механического захвата паровой (газовой) фазы при истечении КТ из бака, превышающей условия равновесного парообразования.

Согласно информации, приведенной в работах [2, 3], в результате отработки насосов, предназначенных для функционирования в составе кислородно-водородных двигателей, установлена возможность их работы на кипящем топливе при $T_{\text{ж}} = T_{\text{с}}$.

Например, водородные бустерные насосы разработки организации КБХИМмаш в диапазоне температур $T_{\text{с}} = 21 - 25$ К способны работать на кипящем в баке жидком водороде при относительном объёмном содержании пара в КТ до величины $\delta = V_{\text{п}} / V_{\text{ж}} = 30\%$ на входе в насос.

Поэтому можно рассматривать применение безнаддувной схемы топливоподачи с использованием бустерного насоса, перекачивающего двухфазный водород, установленного перед основным насосом ТНА.

Применение схемы подачи топлива без системы наддува бака позволяет улучшить энергомассовые характеристики двигательной установки [3] за счёт уменьшения до 20% масс: конструкции баков, газа наддува (гелия), газобаллонной системы с клапанами и регулируемыми устройствами.

В качестве примера оценки эффекта от применения безнаддувной системы топливоподачи в ДУ с ядерным двигателем можно привести разработки, которые производились в США для программы полёта на Марс. По данным, приведенным в работе [6], применение безнаддувной схемы подачи жидкого водорода в ЯРД приводит к снижению массы конструкции на 55,5 т, что эквивалентно снижению стоимости пуска на 61 млн. долларов.

Экспериментальные исследования процесса в баке при безаддувном вытеснении жидкого водорода производились на ЭУ с объёмом бака $9,6 \text{ м}^3$ при режимах:

- начального значения температуры жидкости в баке $T_{\text{ж}} = 22-27$ К при соответствующих величинах давления насыщения $p_{\text{с}} = 0,18-0,5$ МПа;

- постоянного расхода жидкости из бака $0,015-0,036 \text{ м}^3/\text{с}$.

Оценка термодинамически равновесного протекания процесса образования паровой фазы в баке проводилась в результате сопоставления изменений параметров состояния водорода, полученных при экспериментах, с результатами расчётов. Методика проведения расчётов предусматривала проведение изменений параметров состояния водорода без учёта кинетики образования и развития паровой фазы. Пример такого сопоставления, который приведен на рисунке 3, подтверждает равновесный характер восстановления давления в баке.

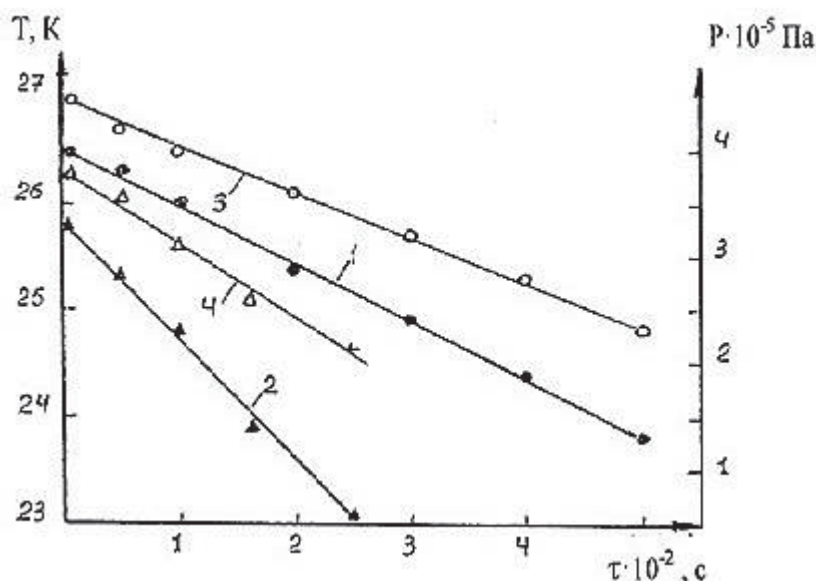


Рисунок 3 – Сопоставление результатов расчёта с экспериментальными данными при расходах жидкого водорода из бака и изменениях температуры T в объёме жидкости (1 и 2) и давления P в газовом объёме (3 и 4)

По результатам экспериментальных исследований установлено:

- реализация безнаддувной схемы в системе топливоподачи жидкого водорода возможна при $T_{ж} > 22\text{ К}$;
- при значениях давления насыщения $p_s < 0,2\text{ МПа}$ в баке внутренней энергии, накопленной в жидкости, не хватает для реализации процесса в течение времени более 50 с;
- при значениях давления насыщения $p_s = 0,3-0,5\text{ МПа}$ можно реализовать равновесный процесс безнаддувного вытеснения жидкого водорода из бака продолжительностью 200-500 с.

По результатам измерений сплошности потока оценивалась величина относительного объёмного содержания пара в КТ на выходе из бака. Величина δ в ряде случаев увеличения расхода жидкости превышала расчётную величину, характерную для случая образования пара в равновесном потоке. Превышение величины δ по сравнению с расчётным значением находилось в пределах погрешности измерений сплошности потока, поэтому закономерность этого явления окончательно не выяснена.

На основе определения особенностей безнаддувной схемы топливоподачи установлено, что наиболее рациональное использование такой схемы связано с исключением провала давления в насос при запуске ЖРД и с использованием внутренней энергии прогретого КТ в конце работы ДУ.

Следует обратить внимание на существующий опыт применения в ракетно-космической технике безнаддувной схемы топливоподачи. Возможность функционирования ДУ ракетного блока с безнаддувной схемой в России впервые

была подтверждена при огневых стендовых испытаниях одного из вариантов блока «Р», создававшегося для РКК Н1–Л3. При этом была реализована работа на кипящем водороде в баке при $p_s = 0,23$ МПа и при температуре жидкости $T_s = 23,5$ К.

При создании ДУ блока 12 КРБ, который был разработан в России для индийской РКК «GSLV», была предусмотрена возможность использования безнаддувной схемы в нештатной ситуации работы системы топливоподачи двигателя (с бустерными насосами, погруженными в компоненты топлива в баках).

Из технической литературы известно также, что безнаддувная схема нашла применение на практике как составная часть комбинированной системы наддува в составе ДУ кислородно-водородной ступени «Центавр» РКК «Атлас» в США.

Заключение

На основе изучения теплообмена, происходящего в топливном баке, сформулировано и обосновано понятие эффективности процесса наддува топливных баков. Экспериментально установлены основные режимы работы системы наддува для получения максимальной эффективности процесса.

Определены особенности применения безнаддувной схемы топливоподачи. Подтверждено, что наиболее рациональное использование такой схемы связано с функционированием системы топливоподачи на режимах запуска и останова ЖРД, при условии установки бустерных насосов, способных работать на двухфазных компонентах топлива, до входа в основные насосы ТНА.

Литература

1. Беляев Н.М. Расчёт пневмогидравлических систем ракет. М: Машиностроение, 1983. 220 с.
2. Бершадский В.А. Коломенцев А.И. Методы испытаний системы подачи в двигатель криогенных компонентов топлива с моделированием тепловых процессов. М: Изд-во МАИ, 2018. 188 с.
3. Каширин И.А., Бершадский В.А., Смирнов И.А. и др. Опыт разработки и модернизации бустерного водородного турбонасосного агрегата двигателей разгонных блоков различного назначения // Космонавтика и ракетостроение. 2017. № 4(97). С. 92-101.
4. Кудинов В.А., Карташов Э.М. Техническая термодинамика: учебное пособие. М: Высшая школа, 2003. 262 с.
5. Овсянников Б.В., Боровский Б.И. Теория и расчёт агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей: учебник. М: Машиностроение, 1986. 376 с.
6. Kembell V.N., Beverydsh K.N. Выбор избыточного давления для ядерных ракетных двигателей: перевод ЦИАМ // Новое в зарубежном авиадвигателестроении. 1967. № 7. С. 13-25.

УДК 629.7.01

Концептуальные основы максимизации эффективности перспективных систем управления важнейших ракетно-космических летательных аппаратов на всех этапах их жизненного цикла

Григорий Григорьевич Вокин, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, зав. базовой кафедрой «Управление и информационные технологии в космических системах»,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область, НИИ космических систем им. А.А. Максимова – филиала АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», г. Королев, Московская область,
Марат Шамильевич Насибулин, кандидат технических наук, руководитель филиала АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», директор «НИИ КС им. А.А. Максимова», г. Королев, Московская область

В статье на принятом уровне общности излагается технология комплексного синтеза перспективных систем управления ракетно-космических аппаратов большой значимости и ответственности, нацеленная на получение характеристик систем управления возможно высокого уровня. Рассматриваемые системы управления, будучи активированными или постоянно действующими, целесообразны для использования в управлении такими важнейшими изделиями ракетно-космической техники, как стратегические ракеты, ракеты-носители, крылатые боевые блоки, долговременные космические станции, аппараты для изучения дальнего космоса, стратегические спутники космического мониторинга и т.д. [1].

Как показывает научно-технический анализ, целесообразность в создании упомянутых систем управления вполне очевидна, а возможность создания их на базе современных программно-аппаратных средств имеет под собой все научно-технические основания.

Ракетно-космические летательные аппараты, системы управления, синергетическая оптимизация и интеллектуализация, эффективность, этапы жизненного цикла, тезаурусы, интеллекторы, оптимины.

Conceptual foundations for maximizing the effectiveness of advanced control systems for the most important rocket and space aircraft at all stages of their life cycle

Grigoriy Grigorievich Vokin, Full Doctor (eng), professor,

Honored Scientist of the Russian Federation,
head basic department «Management and information technologies in space 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,
Research Institute of Space Systems named after. A.A. Maksimov – branch of JSC
«GKNPTs im. M.V. Khrunichev», Korolev, Moscow region,
Marat Shamilevich Nasibulin, PhD of technical science,
Director of affiliate JSC «State Research and Production Space Center»
named after M.V. Khrunichev, Korolev, Moscow region

The article describes the technology of complex synthesis of advanced control systems of rocket and spacecraft of high responsibility, aimed at obtaining characteristics of control systems of the great importance and responsibility. The control systems in question, being activated or permanently active, are appropriate for use and management of such important products of rocket and space technology as strategic rockets, launch vehicles, cruise war-heads, long-term space stations, deep space exploration vehicles, strategic space monitoring satellites etc [1].

As the scientific and technical analysis shows the expediency in creating the mentioned control systems is quite obvious, and the possibility of creating them on the basis of modern software and hardware has all the scientific and technical grounds.

Rocket and space aircraft, management systems, synergetic optimization and intellectualization, effectiveness, stages of life cycle, thesauruses, intellectors, optimIn.

Введение

Общеизвестно и не вызывает сомнений роль и значимость систем управления как важнейших составных частей ракет и космических аппаратов различного назначения, ибо они во многом определяют диапазоны функциональных возможностей объектов управления, что существенно расширяет область решаемых ими задач при их применении. Системы управления являются наиболее наукоемкими частями изделий и во многом определяют эффективность ракетно-космических объектов (РКО), что достигается благодаря высокому уровню их интеллектуализации.

Для ряда РКО, например, боевых ракет и космических аппаратов длительного и сверхдлительного существования трудно по определению предвидеть состояние внешней среды, поэтому для сохранения работоспособности РКО, особенно в условиях агрессивной внешней среды, системы управления должны обладать функциями адаптации и самовосстановления.

Как свидетельствует анализ, упомянутыми свойствами и функциями будут обладать РКО, если их системам управления при проектировании будет обеспечиваться высокая эффективность с помощью целого набора процедур, способов и мер на всех этапах их жизненного цикла.

В статье на концептуальном уровне представляется комплекс инноваци-

онных подходов, принципов и процедур синтеза систем управления важнейших изделий ракетно-космической техники (РКТ), которые по функциональным возможностям способны достигать максимально высоких уровней своей эффективности на всех этапах их жизненного цикла.

1. О комплексе инновационных операций, процедур и мер, целесообразных для использования при создании и функционировании высокоэффективных систем управления перспективных изделий РКТ с расширенными возможностями на всех этапах их жизненного цикла

На основе многолетнего и масштабного опыта, накопленного в науке и технике по проектированию и эксплуатации изделий самого разнообразного назначения, выявлены, установлены и закреплены в директивных документах рациональные и целесообразные типовые этапы их жизненного цикла. Однако для изделий, выполняющих особо важные функции и работающих в тяжёлых трудно прогнозируемых условиях, причём возможно длительное время, как подсказывают результаты анализа и опыт, для ряда перспективных изделий упомянутый комплекс типовых этапов жизненного цикла требует корректировки и расширения [1]. Поскольку особо важные изделия должны быть высоконадёжными и эффективными, поэтому на всех этапах их жизненного цикла должны быть предусмотрены соответствующие операции, процедуры и меры, обеспечивающие упомянутые повышенные требования и свойства. Как свидетельствует практика, к таким особо важным изделиям, тем более перспективным, следует отнести баллистические ракеты стратегического назначения, их боевое оснащение, ракеты-носители и долговременные космические аппараты целого ряда типов.

Из системного подхода к исследовательскому проектированию упомянутых изделий вытекает, что повышенные их функциональные возможности, а также повышенная эффективность обеспечиваются в большей степени системами управления. Ниже, как обобщение опыта, на концептуальном уровне выдвигаются предложения по расширению комплекса этапов жизненного цикла упомянутых перспективных объектов РКТ.

Поиски подходов, операций и способов, обеспечивающих наибольшую эффективность систем управления ответственных и особо важных ракетно-космических изделий на всех этапах их жизненного цикла, приводят к выводу, что для этого целесообразно принимать ряд нетрадиционных мер и выполнять ряд инновационных достаточно непростых и наукоёмких операций.

В итоге установлено, что к таким методологическим процедурам следует отнести: интеллектуализацию, синергетическую оптимизацию и автоматическое самовосстановление функционирования системы после, например, отказа некоторых элементов.

Под интеллектуализацией понимаются интенсивный поиск и реализация на этапах проектирования, испытания, эксплуатации и функционирования систем управления, в том числе в режиме применения РКО, новых подходов, производственных правил, подсказок и эффективных научно-технических решений. Процессы интеллектуализации целесообразно выполнять на всех этапах жизненного цикла, но в первую очередь на этапе исследовательского проектирования и ис-

пытаний. При этом к составным частям интеллектуализации концептуально следует отнести разработку инновационной концепции построения системы управления с учётом специфических условий работы особо важных РКО, построение возможно точных их математических моделей, выбор оптимальных значений параметров и характеристик элементов с учётом условий функционирования их в условиях применения РКО. Упорядоченная совокупность методических подходов, принципов построения, инновационных операций и процедур, используемых на различных этапах жизненного цикла систем управления при их создании и составляющих контент интеллектуализации, логично именовать тезаурусом интеллектуальных. Упомянутый контент хранится в базе памяти системы управления. Тематические тезаурусы можно рассматривать как интеллектуальные оперативные подсказывающе-справочные средства для проектанта. Это обстоятельство может серьёзно сократить время проектирования системы и повысить её качество.

Под синергетической оптимизацией понимаются процессы совместного выбора оптимальных значений всех параметров и характеристик системы управления, при этом ставится задача достижения наибольших значений критериев эффективности всех ключевых элементов и подсистем при условии, что все значения других параметров, критериев и характеристик будут оставаться в пределах, заданных проектантом на основе его опыта, расчётов и результатов испытаний. Именно в этом случае достигается максимальное значение эффективности системы управления в целом. По аналогии с предыдущим определением упорядоченную совокупность разного рода приёмов, алгоритмов и способов оптимизации будем именовать тезаурусом оптимизации, при этом тезаурус может служить эффективным справочно-методическим руководством для проектанта в процессе практической работы.

В отношении упомянутых тезаурусов в общем случае можно сказать, что это есть своего рода прикладные специализированные минибibliothекы, минциклопедии, минбазы данных и знаний по определенным тематическим направлениям, которые предназначены для квалифицированного, качественного и быстрого решения задач, возникающих перед проектантом-конструктором систем управления.

Процессы автоматического самовосстановления системы должны отрабатываться на этапах проектирования и испытаний, а выполняться, как правило, на этапах эксплуатации и применения РКО. Процедура автосамовосстановления предполагает измерение некоторых параметров, определение диагностического состояния системы и её элементов, выработку решения специальным блоком по разработанному заблаговременно алгоритму, а также последующее устранение отказа путём изменения некоторого параметра или подключения дублирующего элемента, находящегося в тезаурусе дублиров элементов системы.

Как показывает экспертный анализ, при реализации приведённых мероприятий система управления принципиально может достигать максимальных значений эффективности на всех этапах жизненного цикла, а особенно на этапе рабочего участка применения особо важных изделий РКТ.

2. Эффективность систем управления РКО как обобщённый показатель их качества на этапах создания, эксплуатации и штатного применения

Системы управления являются важнейшими составными частями РКО, поскольку они решают ключевую задачу функционирования РКО: обеспечение движения РКО по программной траектории с возможно большей точностью путём высокоточной стабилизации движения центра масс и относительно центра масс РКО, а также своевременное включение или выключение двигательных установок.

Как система управления в целом, так и все её составные элементы характеризуются такими своими показателями, как точность, габаритно-массовые характеристики, уровень радиационной стойкости, уровень выдерживаемых перегрузок, стоимость и т.д. Все эти показатели имеют существенное значение при сравнительной оценке систем управления в целом и отдельных её показателей в частности.

Из истории прошлого опыта известно, что в своё время предпринимались попытки систему управления охарактеризовать одним обобщённым показателем качества, при этом этот показатель формировался как сумма разнородных показателей со своими весовыми коэффициентами, которые должны были устанавливаться экспертным путём. Однако такой подход оказался не более, чем формальной процедурой, не имеющей практического значения.

Как показывает научно-технический анализ и опыт, наибольшую практическую значимость имеет подход, основанный на том, что ведущим и наиболее весомым показателем, особенно для перспективных РКО, имеет точность. Поэтому при сравнительной оценке систем управления имеет наибольшее практическое смысловое значение следующее правило: систему считать более эффективной такую, которая имеет более высокую точность T при условии, что все остальные значимые характеристики q_i , $i = 1, 2, \dots, n$, будут находиться в заданных проектантом диапазонах:

$$T \rightarrow \max, Q_{in} \leq q_i \leq Q_{iv},$$

где Q_{in} , Q_{iv} – нижние и верхние значения диапазонов других характеристик.

Приняв такое правило, эффективность системы можно характеризовать одним критерием, имея в виду выполнение ограничений по всем другим показателям. В связи с этим можно утверждать, что система управления будет обладать более высокой эффективностью и высоким качеством, если она имеет более высокую точность при условии выполнения упомянутых ограничений.

3. О содержании и характерных особенностях синергетической оптимизации и интеллектуализации систем управления РКО

Как уже отмечалось, система управления может характеризоваться с различных точек зрения значительным числом показателей. Из практики синтеза систем известно, что и при интеллектуализации, и при оптимизации довольно часто встречаются ситуации, когда операции по улучшению одного показателя приводят к ухудшению других показателей. Вот, например, некоторые действия по повышению стойкости системы к радиации и перегрузкам приводят к ухуд-

шению габаритно-массовых характеристик.

Во избежание таких ситуаций одним из основных методических требований неукоснительно должно выполняться условие: использование возможностей интеллектуализации и оптимизации должно выполняться согласованно и совместно, при этом при улучшении одной из характеристик системы изменения других характеристик должны контролироваться, а упомянутые характеристики должны оставаться в допустимых пределах. При использовании синергетической методологии как раз и можно добиться выполнения упомянутого условия. При этом операции по интеллектуализации проводятся, как правило, экспертными способами или с использованием экспериментов, а оптимизация при наличии моделей может осуществляться с использованием вычислительных средств.

Для иллюстрации существа синергетического подхода при использовании интеллектуализации и оптимизации положим, что система характеризуется двумя показателями $q_1(\alpha_i)$, $q_2(\alpha_i)$, где α_i , $i = 1, 2, \dots, n$ – параметры, от которых зависят показатели q_1 и q_2 .

В соответствии с предлагаемой методологией отыскивается экстремум показателя q_1 , причем глобальный экстремум или наибольшее значение при условии, что $Q_{2н} \leq q_2 \leq Q_{2в}$, при этом запоминаются значения параметров α_i^0 , при которых достигаются упомянутые условия. После этого такие же операции проводятся для показателя q_2 . При поиске экстремумов целесообразно использовать процедуру Гаусса-Зейделя или случайный поиск. Процесс может содержать несколько кругов, а заканчиваться при выполнении условия: $|q_{1,i+1} - q_{1,i}| \leq b_1$, $|q_{2,i+1} - q_{2,i}| \leq b_2$,

где b_1, b_2 – достаточно малые числа.

Значения параметров α_i^0 , при которых выполняются приведенные выше условия, являются искомыми. Такую точку в многомерном пространстве параметров будем именовать синергетически сбалансированной точкой или вариантом системы.

На рисунке 1 приведена для иллюстрации обобщённая блок-схема поиска сбалансированных точек при проведении синергетической оптимизации и интеллектуализации.

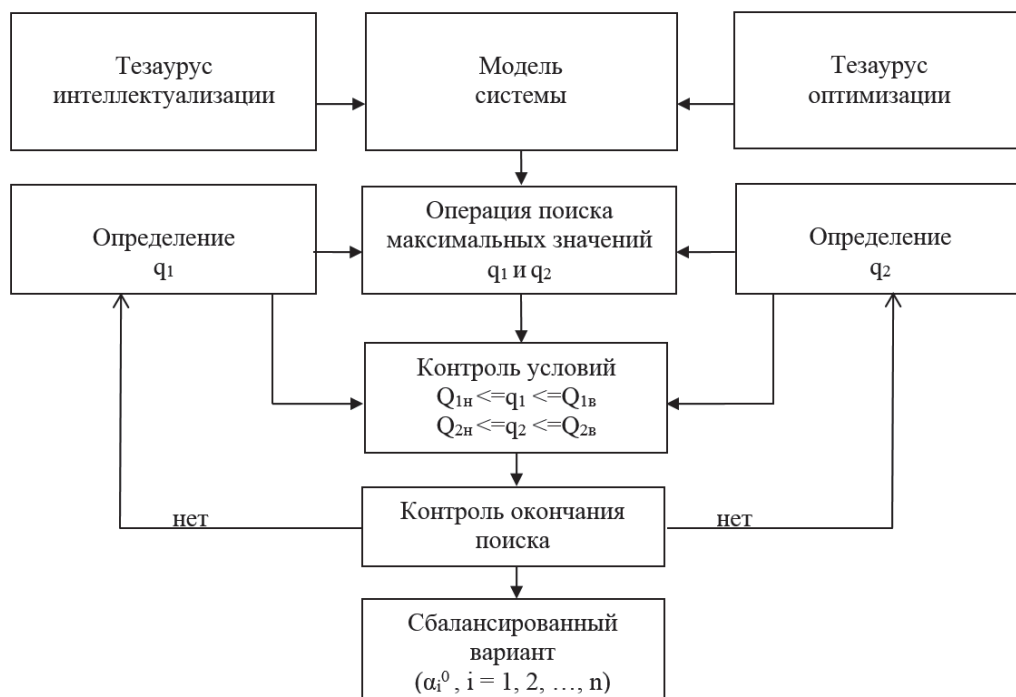


Рисунок 1 – Схема поиска синергетически сбалансированных значений параметров системы

4. О комплексе основополагающих принципов, лежащих в основе оптимального управления процессом и синтеза эффективных систем управления ракет и космических аппаратов повышенной ответственности, важности и стоимости

По замыслу в статье формируются дополнительные к общепринятым инновационные подходы, меры и способы, нацеленные на дальнейшее повышение эффективности систем управления. В то же время анализ устоявшихся идей и методов управления и синтеза приводит к необходимости критического рассмотрения их места и роли в настоящее время, а также к потребности выяснения фундаментальных принципов и закономерностей, лежащих в основе оптимального управления и синтеза автоматических систем. Важность обобщения ретроспективных результатов по проблеме управления американский кибернетик А. Раппорт (МТИ) характеризует следующим образом: «... конкретные шаги, предпринимаемые с целью объединения и обобщения некоторых понятий и методов, представляют собой существенный вклад в развитие науки». К настоящему времени в ретроспективных работах выдвинуто немало предложений по проблеме управления и синтеза систем, именуемые «гипотезами», «условиями» и «законами». Если при создании ракетно-летательных аппаратов (как составляющих космических систем) и выборе управленческих схем не принимаются в расчет названные «законы», то планируемые характеристики систем вряд ли достижимы.

Упомянутые принципы в расширенном варианте можно было бы сфор-

мулировать отдельно, однако в данном случае эти принципы кратко формулируются с учётом тематических рамок статьи в сокращённом варианте.

Изложенные далее обобщающие результаты проведенного анализа не следует воспринимать как некую аксиому. Эти результаты в сжатой форме иллюстрируют содержание подходов, рекомендаций и установок, лежащих, как представляется, в основе реализации оптимального управления процессами и исследовательского синтеза эффективных систем управления.

Принцип цели и мотивации системы. Ожидаемый результат эксплуатации системы – это глобальная цель C_g системы A . Глобальная цель устанавливается субъектом, находящимся вне системы. Например, для системы управления глобальная цель ставится проектантом. Для систем управления РКО глобальной целью является высокоточная реализация программного движения центра масс и относительно центра масс.

При синтезе системы иерархическая система является основой для построения математической модели, модели ошибок и оптимального распределения требований к подсистемам, блокам и элементам.

Принцип динамической устойчивости предполагает вычисление в соответствии с целевой направленностью системы условий, при которых данная система инвариантна и обладает достаточной устойчивостью, автономностью, надёжностью и в то же время оптимальна (по некоторым видам критериев). При синтезировании системы критерий оптимальности системы связан с упомянутыми характеристиками качества.

Принцип самоорганизации – изменение множества подсистем A_i системы A и функциональных взаимосвязей в подсистемах множества A_i и отношений между подсистемами A_i на всех «этажах» иерархической структуры для обеспечения требуемых характеристик функционирования системы и достижения в связи с этим глобальной цели C_g и её подцелей C_n .

Принцип уровней качества связан с последовательным (поэтапным) приближением к заданному (или оптимальному) значению одного или нескольких критериев, характеризующих качество K системы A путём дополнения к начальному множеству подсистем A_i и отношений между ними. Посредством этого достигается изменение структуры системы A , когда рост критерия K на каждом новом уровне сопровождается приращением ΔK . Рост критерия K на уровне синтеза системы или некоторой технологии прекращается, если $\Delta K < \delta$, где δ – наперед заданная величина.

В системах управления наращивание динамических качеств осуществляется в несколько этапов усложнения структуры: обратная связь по отклонению (первый уровень качества – силовой уровень), обратная связь по производной от отклонения (второй уровень качества), обратная связь по интегралу от отклонения (3-й уровень качества), подключение контура оптимизации (4-й уровень качества). Следует отметить, что обеспечение нижних уровней качества требует значительных затрат энергии. А дальше идет увеличение интенсивности потока информации, включая соответствующие преобразования.

Принцип соответствия означает наличие своеобразной «адекватности»

определенного объекта и системы управления, что устанавливается экспертным путём. Принцип соответствия – это проявление общих черт объекта и выбранной системы управления. К примеру, для обеспечения устойчивости системы уровень сложности, определенности и стационарности должны быть близкими у объекта и системы управления.

Классики теории управления этот содержание принципа условно называли по-разному, но характерно: «закон необходимого разнообразия» (У.Р. Эшби), «закон адекватности» (А.Г. Ивахненко).

Принцип убывающей результативности активируется на конкретном этапе эволюции («жизни») или создания (модернизации) системы, когда приращение ΔK критерия эффективности становится относительно малым ($\Delta K < \delta$, где δ – достаточно малая величина) при существенных вариациях структуры A и отношений между подсистемами.

Принцип достаточности позиционируется как обеспечение оптимального расположения подцелей в иерархической структуре, оптимального выбора самой иерархической структуры и оптимального распределения требований между подсистемами A_i системы A . В противном случае рассматриваемая система обязана иметь необходимые возможности в решении глобальных задач и не иметь ничего лишнего, не иметь завышенных характеристик, что может приводить только к дополнительным затратам.

В соответствии с принципом достаточности рекомендуется упрощать модель системы, особенно сложных систем, но упрощать до такой степени, чтобы, во всяком случае, качественно и правильно вскрывались изучаемые закономерности и модель была бы достаточно проста для анализа. Принцип определяет концептуально минимум потребных возможностей (экономических, информационных и др.) для реализации системой глобальной цели. При этом, как очевидно, избыток или недостаток упомянутых возможностей могут оказаться в равной степени вредными.

Принцип моделирования означает создание математической или предметно-математической структуры рассматриваемого объекта. Математическая модель строится на физической модели системы. Физическая модель строится исходя из взаимосвязей ее модулей, законов сохранения энергии, количества движения и т.д. Характерно, что предметно-математические модели описывают различные по физической природе процессы одинаковыми математическими моделями, например, одинаковыми дифференциальными уровнями.

Принцип обучения отражает потенциальные возможности системы накапливать и использовать собственный опыт или опыт систем-аналогов в процессе достижения поставленных целей и задач. Другими словами, обучение – это аппроксимация оптимального функционирования системы в прошедших циклах, которая применяется для решения настоящих и будущих задач.

Самообучение системы связывается с наличием в структуре системы звеньев с функцией самооценки состояния и поведения системы, заложенных в системе проектантом. Результаты аппроксимации опыта поведения системы по прошлым данным или по текущим могут представляться и накапливаться в свое-

образной базе данных (в тезаурусе интеллектуализации или оптимизации).

В заключение следует подчеркнуть, что любая научная теория, любая технология по сути начинаются с аппроксимации и накопления приобретенного опыта и знаний и имеют своей главной целью уменьшение альтернативных вариантов, уменьшение затрат (как материальных, так и временных) на решение проблем по характеристике состояния, поведения и эволюции систем в предшествующих периодах, в настоящем и в будущем периодах. Изложенные ранее обобщенные принципы управления процессами и синтеза автоматических систем могут рассматриваться как методологический инструментарий комплексного анализа и синтеза оптимальных или к близким к оптимальным автоматических систем и, в частности, перспективных систем управления объектами РКТ повышенной ответственности и важности.

5. Об основных этапах технологии максимизации характеристик систем управления перспективных изделий РКТ на основе синергетической оптимизации и интеллектуализации процессов их создания, эксплуатации и штатного применения

Наиболее характерной составной частью изложенного подхода к созданию и использованию систем управления РКО является то обстоятельство, что поочерёдное улучшение всех характеристик осуществляется на всех этапах жизненного цикла, при этом при оптимизации одной характеристики на другие проектантом накладываются технически обоснованные ограничения. При таком подходе все характеристики поднимаются до возможно максимальных своих значений, при этом исключаются варианты улучшения одних характеристик в ущерб другим. В таком случае процессы создания и применения систем управления будут иметь синергетический характер, что означает: на всех этапах жизненного цикла принимаются меры по одновременному улучшению всех характеристик, обеспечивая при этом значения варьируемых параметров и важнейших характеристик в заданных проектантом допустимых диапазонах.

Использование такого комплексного подхода при создании и применении систем управления важнейших объектов РКТ продиктовано также тем обстоятельством, что мало того, что они предназначены для выполнения ответственных задач, так они являются ещё очень и очень затратными изделиями. В связи с этим и предъявляются максимально повышенные требования к системам управления с целью обеспечения их работоспособности при выполнении возложенных на них задач.

Не прибегая к детальному изложению содержания работ, выполняемых на каждом из этапов, а также учитывая содержание предыдущих разделов статьи, отметим в качестве основных, в первую очередь, следующие этапы создания и применения систем управления упомянутых изделий РКТ:

- замысел создания системы управления на концептуальном уровне;
- определение перечня функций и задач, возлагаемых на систему;
- экспертное определение структуры системы;
- обоснование выбора физической основы составных частей и элементов системы;

- проведение предпроектных опытно-теоретических исследований, разработка алгоритмов стабилизации движения РКО;
- аванпроектное, экспертное и рабочее проектирование системы;
- изготовление опытных образцов системы и ее элементов;
- проведение лабораторных и стендовых испытаний;
- проведение мероприятий по улучшению характеристик системы;
- работы по адаптации системы на объекте управления;
- проведение наземных и лётных испытаний;
- доработка системы;
- серийное производство системы;
- разработка инструкций по эксплуатации системы;
- эксплуатация и штатное применение системы при выполнении объектом РКТ возлагаемых на него задач.

Особо надо отметить, что на каждом из этапов должны выполняться соответствующие мероприятия по синергетической оптимизации и интеллектуализации, перечень которых должен содержаться в тезаурусах каждого из этапов жизненного цикла.

Важнейшим из показателей системы управления является, как отмечалось в п.2, точность. Основными составляющими ошибки системы являются ошибки информационных средств (измерителей параметров движения), динамические и методические ошибки. Что касается уменьшения инструментальных и методических ошибок, то надо констатировать, что конкретные пути и способы решения этих задач выходят за тематические рамки статьи и имеют большие и известные наработки и заделы, при этом соответствующие операции и научно-технические решения могут быть включены в тематический тезаурус и использоваться при проектировании систем.

Как показывает анализ, наиболее наукоёмкими операциями являются мероприятия по обеспечению устойчивости и высокой динамической точности в условиях трудно прогнозируемых и постоянно действующих возмущений.

В связи с этим предлагается комплекс операций, при реализации которых обеспечивается предельно высокая динамическая точность и высокое быстродействие систем стабилизации параметров движения в условиях постоянно действующих возмущений.

Автоматические системы стабилизации каналов системы управления движением изделий РКТ будут оптимально устойчивыми и обладать максимальной динамической точностью и высоким быстродействием в результате выполнения на этапах синтеза и применения систем управления следующего комплекса операций:

- предварительное формирование структуры и выбор параметров системы стабилизации, обеспечивающих удовлетворительное выполнение основных функций по стабилизации параметров движения;
- синтез оптимальных управляющих воздействий при условии минимизации интегральных функционалов заданного проектантом типа [2], обеспечивающих:

- отрицательные значения полной производной по времени функции Ляпунова, принятой в виде положительно-определённой формы фазовых координат;
- поддержание максимально достижимого уровня значений упомянутой производной с учётом энергетических возможностей исполнительных органов системы;
- равенство нулю угла между вектором скорости текущей представляющей точки системы, контактирующей с поверхностью Ляпунова, и нормально к этой поверхности в упомянутой точке.

Комплекс перечисленных операций является результатом обобщения ряда работ, в том числе и работы [2], при этом правомерность и эффективность операций математически обоснованы рядом соответствующих доказательств, приведенных в работе [2]. Алгоритмы по реализации упомянутой операции могут помещаться в одном из тезаурусов, содержащих рекомендуемые алгоритмы улучшения характеристик стабилизации движения центра масс и относительно центра масс объекта управления.

При этом надо подчеркнуть, что оптимальные управления, обеспечивающие максимальные значения динамической точности и повышенное быстродействие являются функциями только лишь текущих фазовых координат каналов стабилизации движения, при этом для определения оптимальных управлений используются математические модели каналов стабилизации параметров движения. Функция оптимального управления может определяться на каждом такте БЦВМ или могут быть заложены в память БЦВМ соответствующие аппроксимационные зависимости, подготовленные заблаговременно. Надо отметить, что оптимальные управляющие воздействия синтезируются и используются только на этапе применения изделия РКТ, при этом учитываются ограничения, вытекающие из конечной эффективности исполнительных органов управления (рулевых машинок или рулевых реактивных двигателей). По данным автора, предлагаемый способ синтеза оптимальных управляющих воздействий является оригинальным, так как в специальной литературе по вопросам оптимизации аналогов способа не обнаружено. Характерной особенностью способа является также то обстоятельство, что он не связан с введением, например, сопряжённых систем и дополнительных искусственных переменных, начальные значения которых не представляется, в частности, возможным установить. Для специалистов по методам оптимизации эти трудности хорошо известны, что и ограничивает возможности применения известных способов, хотя, на первый взгляд, они кажутся многообещающими.

Заключение

Полномасштабное использование предложенного комплексного подхода при синтезе систем управления особо ответственных летательных аппаратов РКТ может позволить проектировать с учётом разного рода ограничений максимально совершенные их варианты, используя при этом весь арсенал возможностей улучшения их характеристик, не принимая во внимание существующую в среде проектировщиков (не отвечающую современным реалиям и ведущую к росту

совокупных затрат) точку зрения, что действительно эффективную систему невозможно спроектировать одной итерацией, она строится в процессе эволюции, пошаговой модернизации и поэтапного перехода в желаемое состояние. По результатам анализа рассмотренных предложений есть основания предполагать, что комплексное использование рассмотренных методологических принципов и возможностей синергетической технологии оптимизации и интеллектуализации систем управления при их создании, эксплуатации и применении, а также внедрение современных программно-аппаратных средств могут эффективно способствовать существенному сокращению времени создания современных систем управления с максимально улучшенными характеристиками при одновременном учёте ограничений материальных и финансовых затрат, необходимых для их создания. Комплекс предложенных методических подходов и процедур, как видится в развитии, может послужить основой для создания методических рекомендаций практического характера по проектированию эффективных систем управления.

Литература

1. Вокин Г.Г. О концептуальных основах создания ракетного оружия нового класса – дистанционно-кибернетического оружия. Труды научно-технической конференции АО «ВПК «НПО Машиностроения», 2023.
2. Вокин Г.Г. Оптимально-устойчивое управление движением объектов. Принцип оптимальной устойчивости. Труды 3-й НТК «Перспективы использования новых технологий и научно-технических решений в изделиях ракетно-космической техники разработки ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», ИПУ РАН, 2003.

УДК 536.24: 532.517.4

Теория теплообмена в каналах с диафрагмами в ламинарной и переходной областях при течении трансформаторных масел для перспективных теплообменников летательных аппаратов

Игорь Евгеньевич Лобанов, доктор технических наук,
профессор кафедры «Техники и технологий»,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

Представлено математическое моделирование теплоотдачи в трубе с внутренними оребрением при малых критериях Рейнольдса, характерных для ламинарных ($Re=100...1500$) и переходных ($Re=1600...10000$) режимов потока теплоносителя с ($Pr=170...320$), что до сих пор исследовалось, в основном, экспериментальным образом. Рассчитаны стационарные и нестационарные местные и интегральные параметры течения и теплообмена труб с внутренним оребрением для ламинарных и переходных режимов течений теплоносителей с ($Pr=170...320$), что определяет уровень интенсифицирования теплоотдачи. Теорию необходимо использовать при инженерном и естественнонаучном основании вычислений интенсифицированного ламинарного и переходного теплосъёма, при условиях потоков в каналах с выступами, реализуемых в теплообменниках авиа-, ракетно-, космо- техники.

Моделирование, численный, ламинарный, турбулентный, конвективный.

Theory of heat transfer in channels with diaphragms in laminar and transition regions during the flow of transformer oils for advanced aircraft heat exchangers

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

Mathematical modeling of heat transfer in a pipe with internal fins is presented at low Reynolds criteria characteristic of laminar ($Re=100...1500$) and transient ($Re=1600...10000$) modes of coolant flow with ($Rg=170...320$), which has been studied mainly experimentally so far. Stationary and non-stationary local and integral parameters of flow and heat exchange in pipes with internal fins are calculated for lami-

nar and transient modes of coolant flows with ($Rg=170...320$), which determines the level of heat transfer intensification. The theory should be used for engineering and natural science calculations of intensified laminar and transient heat removal, under the conditions of flows in channels with protrusions implemented in heat exchangers of aviation, rocket, and space technology.

Modeling, numerical, laminar, turbulent, convective.

1. Вводная часть.

Общеизвестным практически верифицированным методом смерчевого интенсифицирования теплоотдачи будет реализация циклических турбулизаторов на поверхности омывания (рис. 1) [1, 2].

Структура интенсифицированных течений, в большинстве случаев, изучалась опытным путём [1, 2]. Существующие численные исследования в этом направлении [3-6], отчасти направлены на изучение конкретно структурам интенсифицированных течений. Есть методы [12], использующие исключительно интегральный способ решения задачи.

Настоящая статья конкретно направлена на изучение теплоотдачи для критериев Рейнольдса, которые реализуются для ламинарного и переходного режимов потока в трубе, где теплоотдачи интенсифицируется циклическими выступами полукруглых поперечных профилей, т.к. в вышеуказанных режимах не имеются надёжные теоретические расчётные результаты.

В текущем периоде активно находит развитие многоблочный способ вычисления при решении вопросов смерчевого теплообмена и аэрогидромеханики, который основывается на структурированной пересекающейся сетке.

Изучение местных и интегральных характеристик течений и теплоотдачи в канале с выступами с теоретических позиций перспективно в сторону разработок многоблочной вычислительной технологии со специализированными параллельными пакетами; их целеполагание характеризуется нижеследующим способом.

2. Математическое моделирование потока и теплоотдачи в каналах с выступами

Специфические методы расчётов [6-9] развиваются для точных решений нестационарной 2-х- и 3-х-мерных задач конвективного теплосъёма в прямых круглых трубах с шероховатостями в форме рёбер для гомогенных рабочих сред широких диапазонах критериев Прандтля и Рейнольдса.

Отличие от предыдущих вариантов [6-9] – методы расчёта дополняются возможной реализацией периодичности условий на границах, что обуславливает оценку асимптотических характеристик для каналов с дискретными шероховатостями.

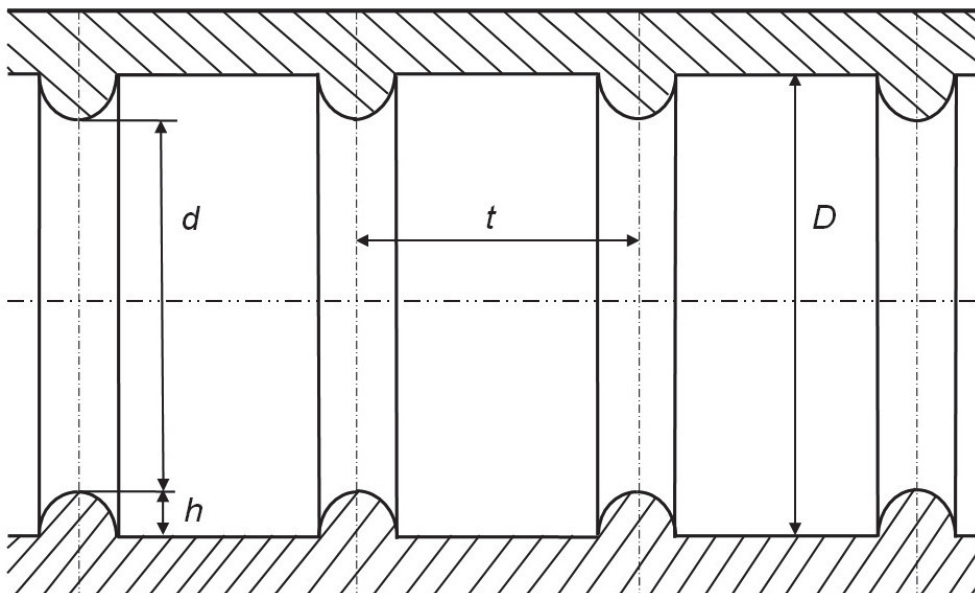


Рисунок 1 – Разрез прямой круглой трубы с поперечными поверхностно расположенными выступами потоков полукруглых поперечных профилей

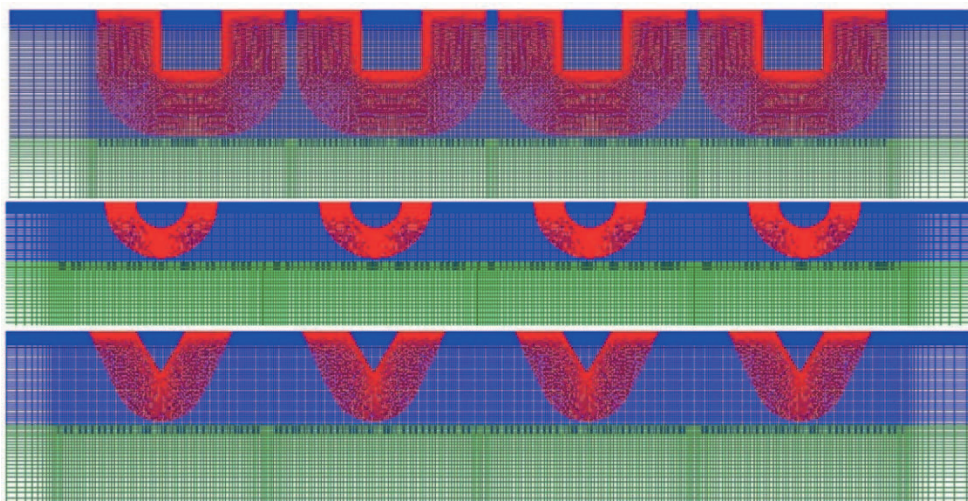


Рисунок 2 – Сетки для канала, состоящие из многих секций с срединным расположением выступа, выходных и входных гладких отрезков

Модифицирование увеличило расчётный эффект при моделировании.

В каналах с рёбрами детерминировались: распределение по поверхности местных и осреднённых нагрузочных и термических параметров (давлений, теплового потока, гидropотерь и т.п.), параметров турбулентностей (энергий, вязкостей, генераций и т.п.).

Основополагающая совокупность диффуравнений с частными производ-

ными – навьестоксовых, рейнольдсовых – замыкаем способом Менстера для напряжений сдвигов при учёте кривизн для линии токов.

Исчерпывающая информация для уравнений управления и согласованных условий на границах может быть взята в исследованиях [9, 10].

Метод позволяет улавливать характерные структурные элементы смерчевого потока и температурных полей с необходимой невязкой, сравнимой с адаптивными сетками.

Гидродинамическая задача заключается в сохранении заданных массовых расходов для единичных входных скоростей.

Тепловая задача: с изотермическими стенками предполагается постоянство среднемассовых температур во входных сечениях; известны градиенты среднемассовых температур для значений тепловых потоков на стенке.

Главный упор делаем на локальных и интегральных комплексах конвективной теплоотдачи (составляющих скоростей, гидropотерь, осреднённого по выделенным площадкам стенок теплосъёма, параметрам турбулентностей и т.п.).

При внешних обтеканиях прямоугольного ребра похожий способ был реализован, к примеру в [11].

3. Анализ результатов расчёта характеристик течений и теплоотдачи при течении трансформаторного масла в трубах с интенсификаторами теплообмена

Основное направление данного исследования характеризуется нижеследующим способом: проведение расчётов для умеренных критериях Рейнольдса для ламинарного и переходного режимов потока для труб с внутренними рёбрами при разных критериях Прандтля, для которых не имеются надёжные расчётные результаты.

Главный упор делается на изучение специфических аспектов для закономерностей интенсифицированной теплоотдачи в переходных и ламинарных областях, т.к. повышенные критерии Рейнольдса уже были изучены; получение и анализирование расчётной информации по теплосъёму и гидросопротивлению в каналах с внутренними рёбрами полукруглых профилей для ламинарной и переходной областей критериев Рейнольдса $Re=10^2...10^4$.

В ламинарных областях течений интенсифицирование теплосъёма совсем не интересно [1, 2].

В переходных режимах у потоков искусственная турбулизация воздействует на течение нижеследующим образом:

во-первых, турбулизаторы генерируют возмущения в дополнение к существующему естественному турбулентному возмущению;

во-вторых, происходит взаимодействие высоких турбулизаторов с турбулизированными отрезками потока с перемежаемостью, что обуславливает генерацию турбулентного возмущения, которое достигает размеров проходных сечений каналов.

Перемежаемости потоков в переходных режимах обуславливают колеблющийся характер коэффициента теплоотдачи [1, 2].

Искусственная турбулизация течения обуславливает понижение $Re_{кр}$ –

критических критериев Рейнольдса [1, 2], которые детерминируются экспериментально.

При слабой турбулентности потоков следует применять высокие выступы, которые соизмеримы с толщинами пристенных слоёв, в которых будут сработаны тепловые напоры почти в полной мере [1, 2].

Теоретические исследования теплоотдачи при её интенсификации для потоков со слабой турбулентностью и в переходных областях производилось в ощутимо меньших объёмах, нежели для областей с развитой турбулентностью. В настоящей статье конкретно данной специфике уделяется главное внимание.

В исследованиях [1, 2] приводится экспериментальная информация о существенном интенсифицировании теплоотдачи в области с критериями Рейнольдса $Re=2 \cdot 10^3 \div 10^4$ при критериях Прандтля: $Pr=2 \div 50$.

Анализирование опытной информации разных авторов, сделанное в [1, 2], показало увеличение эффектов интенсифицирования теплосъёма в переходных режимах с повышением относительных высот выступов и повышением относительных шагов между выступами, т.к. имеет место уменьшение значений $Re_{кр}$ – критических критериев Рейнольдса, а при течениях для капельных жидкостей с развитым турбулентным течением рациональнее использовать выступы малых относительных высот и малых относительных шагов.

Вышеприведённое обосновывает актуальное математическое моделирование интенсифицированной теплоотдачи в каналах для областей при слаборазвитыми турбулентностями, для переходной области потоков для теплоносителя в газообразной и жидкостной фазах.

Кроме экспериментального исследования, интенсифицирование теплоотдачи в переходных диапазонах потоков изучалось теоретическим способом для выступов с трансверсальными профилями в форме полукругов на многоблоковых численных технологиях, на расчётах факторизованными конечно-объёмными технологиями (ФКОМ-ами) рейнольдсового уравнения и энергетического уравнения [6].

Численные расчёты показали, что интенсифицирование теплосъёма будет происходить с некоторых критериев Рейнольдса, а для низких критериев Рейнольдса оно незначительно.

Также были рассчитаны линии токов для переходных условий течения, которые значительно различаются при увеличении критерия Рейнольдса $Re=2 \cdot 10^3 \dots 10^4$, что обосновывает качественное увеличение интенсификации теплообмена [6].

Были проведены также численные исследования для более высоких критериев Рейнольдса для труб с турбулизаторами: $Re=10^4 \dots 10^6$, а затем и для $Re=10^6 \dots 10^{10}$ [6, 13].

Результативное математическое моделирование турбулентных и переходных режимных параметров потоков теплоносителей основывает реализацию данного способа для при пониженных критериев Рейнольдса, то есть для ламинарных областей, которые экспериментальным способом изучалась для трансформаторных масел [6, 13].

Таблица 1 – Результат расчётов по реализованным теориям для наиболее типичных изучаемых характеристик ($d/D=0,92\div 0,80$, $t/D=0,33\div 1,22$; $Re=2\cdot 10^3\div 10^4$; $Pr=250$) по изотермическим гидравлическим сопротивлениям и теплотдаче при изотермических течениях

Pr	Re	$\frac{d}{D}$	$\frac{t}{D}$	$\frac{\xi}{\xi_{ГЛ}}$	$\frac{Nu}{Nu_{ГЛ}}$
250	10^2	0,80	0,33	2,37	0,95
250	10^2	0,80	0,66	1,89	0,88
250	10^2	0,80	1,22	1,57	0,90
250	10^3	0,80	0,33	3,55	1,59
250	10^3	0,80	0,66	2,60	1,29
250	10^3	0,80	1,22	2,16	1,13
250	$1,5\cdot 10^3$	0,80	0,33	3,91	1,96
250	$1,5\cdot 10^3$	0,80	0,66	2,80	1,45
250	$1,5\cdot 10^3$	0,80	1,22	2,33	1,26
250	$1,6\cdot 10^3$	0,80	0,33	4,00	1,91
250	$1,6\cdot 10^3$	0,80	0,66	2,98	2,08
250	$1,6\cdot 10^3$	0,80	1,22	2,83	2,32
250	$2\cdot 10^3$	0,80	0,33	4,27	2,16
250	$2\cdot 10^3$	0,80	0,66	3,20	2,20
250	$2\cdot 10^3$	0,80	1,22	3,96	2,41
250	$2,4\cdot 10^3$	0,80	0,33	4,55	2,37
250	$2,4\cdot 10^3$	0,80	0,66	4,23	2,44
250	$2,4\cdot 10^3$	0,80	1,22	4,11	2,36
250	10^2	0,86	0,33	1,77	0,90
250	10^2	0,86	0,66	1,44	0,90
250	10^2	0,86	1,22	1,30	0,93
250	10^3	0,86	0,33	2,39	1,24
250	10^3	0,86	0,66	1,82	1,03
250	10^3	0,86	1,22	1,56	0,99

250	$1,5 \cdot 10^3$	0,86	0,33	2,58	1,40
250	$1,5 \cdot 10^3$	0,86	0,66	1,92	1,17
250	$1,5 \cdot 10^3$	0,86	1,22	1,65	1,06
250	$1,6 \cdot 10^3$	0,86	0,33	2,61	1,59
250	$1,6 \cdot 10^3$	0,86	0,66	2,03	1,79
250	$1,6 \cdot 10^3$	0,86	1,22	2,05	2,01
250	$2 \cdot 10^3$	0,86	0,33	2,76	1,89
250	$2 \cdot 10^3$	0,86	0,66	2,30	2,13
250	$2 \cdot 10^3$	0,86	1,22	2,39	2,15
250	$2,4 \cdot 10^3$	0,86	0,33	2,99	2,25
250	$2,4 \cdot 10^3$	0,86	0,66	2,63	2,27
250	$2,4 \cdot 10^3$	0,86	1,22	2,66	2,21
250	10^2	0,92	0,33	1,29	0,92
250	10^2	0,92	0,66	1,16	0,96
250	10^2	0,92	1,22	1,14	0,98
250	10^3	0,92	0,33	1,49	0,93
250	10^3	0,92	0,66	1,26	0,94
250	10^3	0,92	1,22	1,17	0,97
250	$1,5 \cdot 10^3$	0,92	0,33	1,55	1,01
250	$1,5 \cdot 10^3$	0,92	0,66	1,30	0,96
250	$1,5 \cdot 10^3$	0,92	1,22	1,19	0,98
250	$1,6 \cdot 10^3$	0,92	0,33	1,56	1,14
250	$1,6 \cdot 10^3$	0,92	0,66	1,31	1,05
250	$1,6 \cdot 10^3$	0,92	1,22	1,21	1,07
250	$2 \cdot 10^3$	0,92	0,33	1,61	1,28
250	$2 \cdot 10^3$	0,92	0,66	1,35	1,19
250	$2 \cdot 10^3$	0,92	1,22	1,26	1,24
250	$2,4 \cdot 10^3$	0,92	0,33	1,66	1,49
250	$2,4 \cdot 10^3$	0,92	0,66	1,46	1,59
250	$2,4 \cdot 10^3$	0,92	1,22	1,31	1,47

Исследованию подвергались и сходные потоки и теплосъём для не Ньютоновского теплоносителя [5], степень интенсифицирования теплоотдачи в кото-

рых превышает ньютоновский.

Для некоторых условий течения вычислены расчёт линий тока между рёбрами с полукруглыми трансверсальными профилями, полученный на базе сгенерированных в исследовании низкорейнольдсовой ментеровой модели (для транзитивного диапазона), специфичные для:

переходных режимов ($Re=2 \cdot 10^3 \dots 10^4$; $d/D=0,875 \dots 0,983$; $t/D=0,486 \dots 1,987$; $Pr=0,72 \dots 50$);

ламинарных режимов течений ($Re=10^2 \dots 1,5 \cdot 10^3$; $d/D=0,80 \dots 0,92$; $t/D=0,33 \dots 1,94$; $Pr=170 \dots 320$).

Величина температурного фактора (отношения температур стенок к среднемассовым температурам масла): $1,07 \dots 1,15$ [5].

Данная область была опытным образом изучена в [5], где было установлено, что при $Re \approx 1600$ режим течения становится переходным, поскольку качественно меняется характер изменения гидравлического сопротивления [5].

Для математических моделирований режимов выше $Re > 1600$ ($Re=1,6 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^3$) и далее вплоть до $Re=2,4 \cdot 10^3$ производилось фактически также, как и для турбулентного потока способом, который был апробирован в [3, 4].

Была получена расчётная информация по интенсифицированной теплоотдаче и гидросопротивлению для рассматриваемых условий ($Re=10^2 \dots 2,4 \cdot 10^3$; $d/D=0,80 \dots 0,92$; $t/D=0,33 \dots 1,22$; $Pr=170 \dots 320$).

Для более низких тубулизаторов $d/D=0,86$ вышеуказанные значения ниже: $Nu/Nu_{г\lambda} \approx 2,3$ при $\xi/\xi_{г\lambda} \approx 2,3$ при тех же условиях идентичности.

При уменьшении высоты тубулизатора до параметра $d/D=0,92$ вышеуказанные относительные параметры будут ещё меньшими.

Минимальные значения относительного теплообмена имели место в ламинарной области течения при $Re=10^2$: $Nu/Nu_{г\lambda} \approx 0,90 \div 0,95$ при относительных гидросопротивлениях $\xi/\xi_{г\lambda} \approx 1,15 \div 1,75$. Интенсифицирование теплоотдачи проявляется в ламинарной области при $Re=10^3$, когда значения относительного интенсифицированного гидросопротивления $\xi/\xi_{г\lambda} \approx 1,35 \div 2,25$.

Полученные в статье расчётные данные хорошо согласуются с аналогичными данными, ранее полученными авторами [16].

Максимальные значения относительного теплообмена составили $Nu/Nu_{г\lambda} \approx 2,5$ при $Re=2,4 \cdot 10^3$; $d/D=0,80$; $t/D=0,66$; $Pr=250$, а относительное гидросопротивление были наибольшими при $\xi/\xi_{г\lambda} \approx 2,5$ при $Re=2,4 \cdot 10^3$; $d/D=0,80$; $t/D=0,33$; $Pr=250$.

Корреляция приведённых в данной работе расчётных данных по интенсифицированному теплообмену и гидросопротивлению в ламинарной и переходной областях с экспериментальными [5, 13-15] показывает, что по гидравлическому сопротивлению расчёт удовлетворительно согласуется с экспериментом [5, 13-15], а по теплообмену расчётные данные качественно соответствуют экспериментальным данным [5, 13-15] (максимум относительной теплоотдачи как в эксперименте, так и в расчёте реализуется при $t/D=0,66$), но количественная корреляция осложняется тем, что в работах [5, 13-15] не имеется достаточных данных для верификации реализованного в исследовании [5, 13-15] метода отно-

сительного соответствия, поэтому опытные данные дают завышенные результаты относительно как относительно выполненных в статье расчётов, так и относительно работ [1, 3, 16].

Вышеприведённые выводы подтверждают расчётные результаты относительных теплосъёма и гидросопротивлений, сведённые в таблице 1.

В качестве иллюстраций на рисунках 3-10 для определённых течений приведены вычисленные линии тока между рёбрами с полукруглым трансверсальным профилем, вычисленным на основах реализованной в исследовании низкорейнольдсовой ментеровской модели (для транзитивного диапазона), что характерно для переходных и ($Re=2 \cdot 10^3 \dots 10^4$; $d/D=0,875 \dots 0,983$; $t/D=0,486 \dots 1,987$; $Pr=0,72 \dots 50$) (рис. 3–6) и ламинарных (рис. 7–10) и режимов течений ($Re=10^2 \dots 1,5 \cdot 10^3$; $d/D=0,80 \dots 0,92$; $t/D=0,33 \dots 1,94$; $Pr=170 \dots 320$).

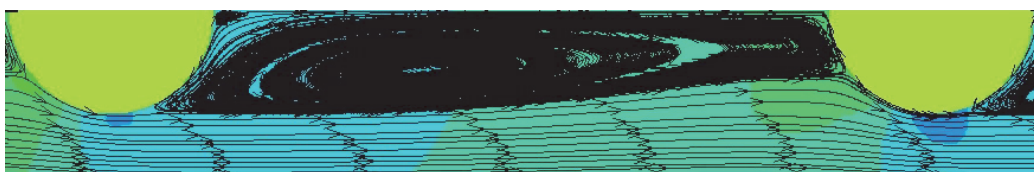


Рисунок 3 – Линии тока для трубы с выступами полукруглого трансверсального профиля при $t/D=0,496$, $d/D=0,875$, $Pr=0,72$, $Re=10^4$

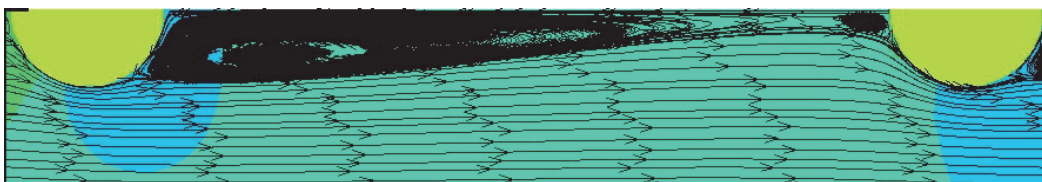


Рисунок 4 – Линии тока для трубы с выступами полукруглого трансверсального профиля при $t/D=0,500$, $d/D=0,912$, $Pr=0,72$, $Re=2 \cdot 10^3$

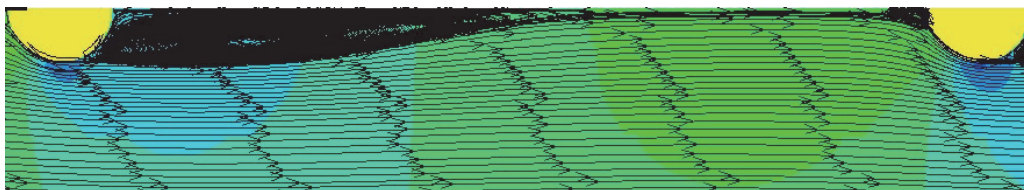


Рисунок 5 – Линии тока для трубы с выступами полукруглого трансверсального профиля при $t/D=0,497$, $d/D=0,943$, $Pr=0,72$, $Re=10^4$

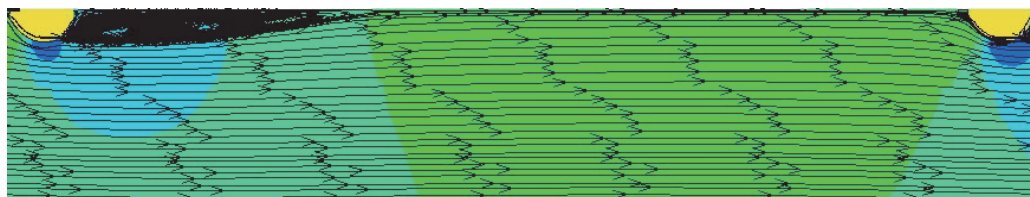


Рисунок 6 – Линии тока для трубы с выступами полукруглого трансверсального профиля при $t/D=0,498$, $d/D=0,966$, $Pr=0,72$, $Re=10^4$

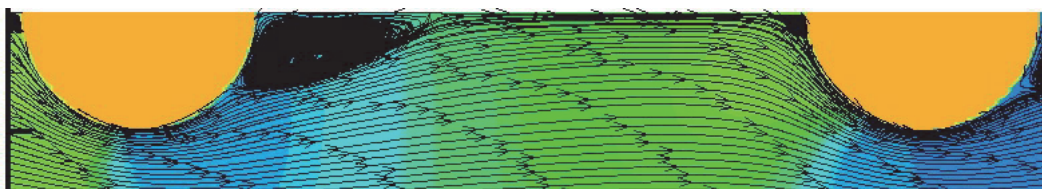


Рисунок 7 – Линии тока для трубы с выступами полукруглого трансверсального профиля при $t/D=0,66$, $d/D=0,80$, $Pr=170$, $Re=10^2$

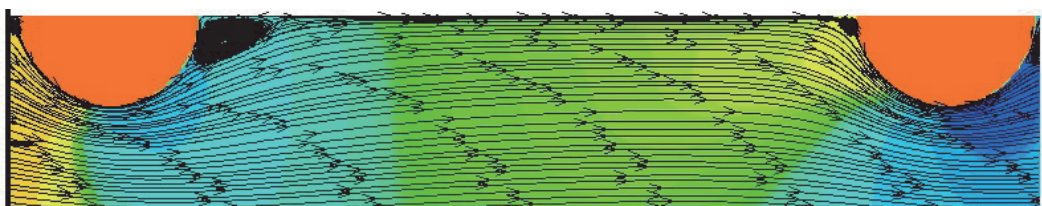


Рисунок 8 – Линии тока для трубы с выступами полукруглого трансверсального профиля при $t/D=0,66$, $d/D=0,86$, $Pr=170$, $Re=10^2$

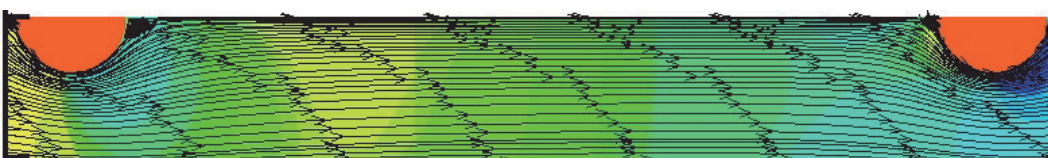


Рисунок 9 – Линии тока для трубы с выступами полукруглого трансверсального профиля при $t/D=0,66$, $d/D=0,92$, $Pr=170$, $Re=10^2$

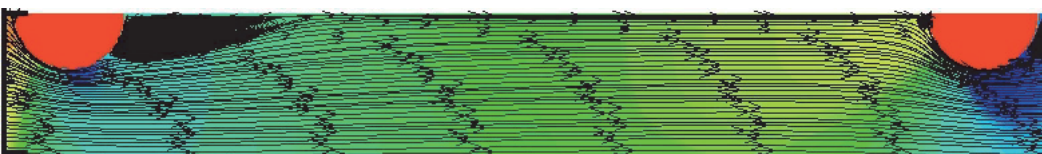


Рисунок 10 – Линии тока для трубы с выступами полукруглого трансверсального профиля при $t/D=0,66$, $d/D=0,92$, $Pr=170$, $Re=10^3$

Вышепредставленные расчёты по линии токов в каналах с рёбрами в полной мере сочетаются с общими физическими принципами о течениях в каналах физических процессов [1, 2, 5].

Отчётливым образом заметны отрезки отрывного и присоединённого потоков, а ещё основные вихри у закрытой впадины.

Линии токов также указывает на генерацию смерчей как зависимость от режима потока и геометрий рёбер.

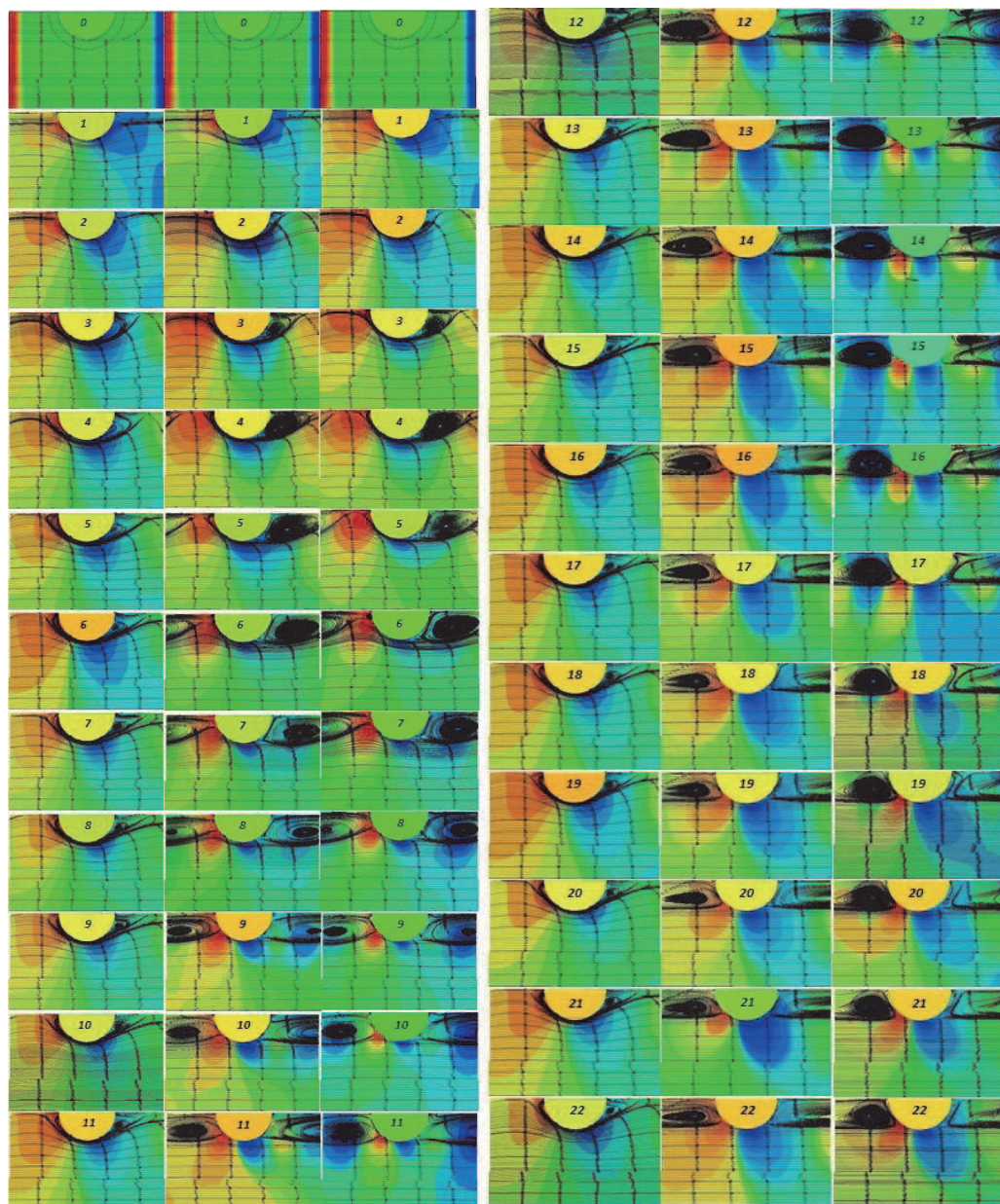
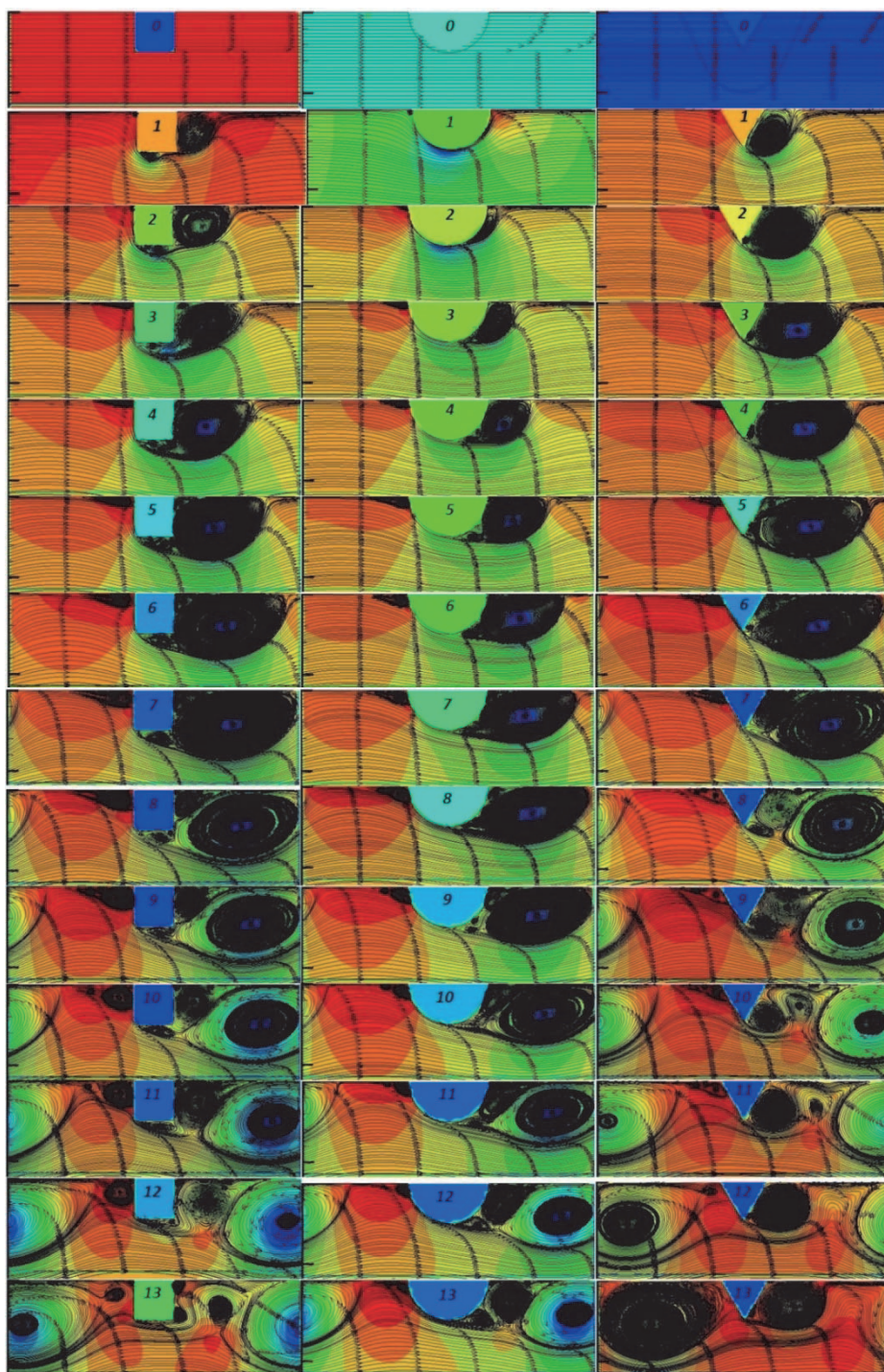


Рисунок 11 – Динамическое развитие смерчевых зон при нестационарных течениях трансформаторного масла в трубах с диафрагмами с $d/D = 0,86$, $t/D = 0,33$; $Pr=250$; $Re=10^2$; $Re=10^3$; $Re=2 \cdot 10^3$ с синхронными временными моментами



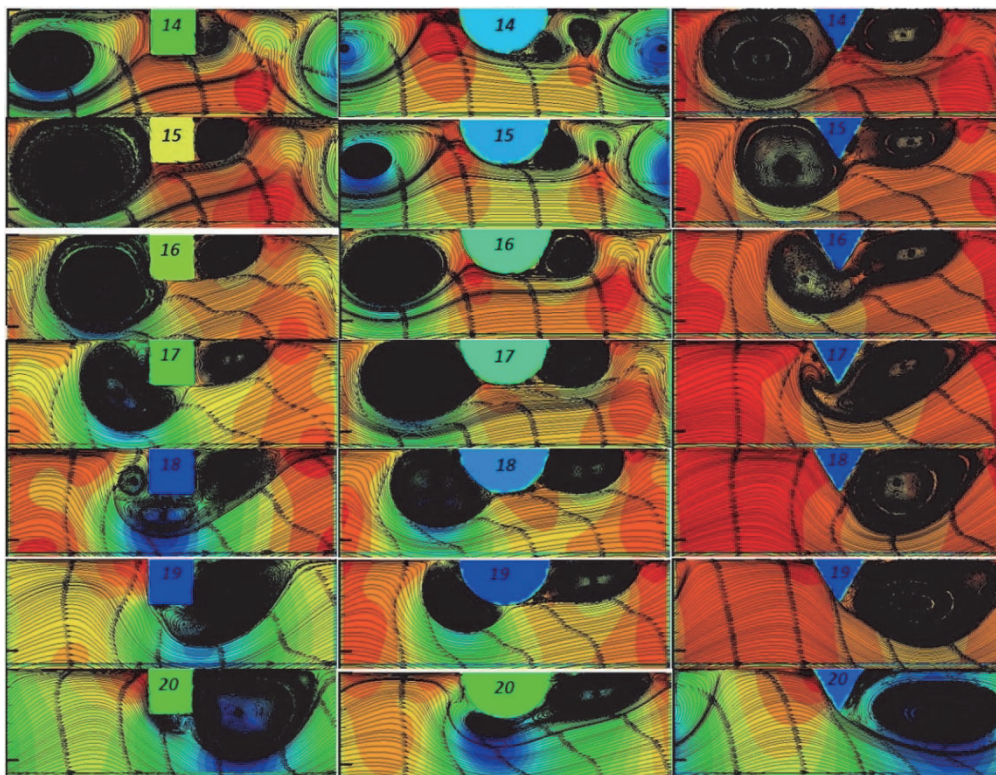


Рисунок 12 – Динамическое развитие смерчевых зон при нестационарных течениях воздуха в трубах с внутренним квадратным, полукруглым и треугольным оребрением при $d/D = 0,90$; $t/D = 0,35$, $Re = 170000$ для синхронным временным моментам

4. Динамики развития смерчевых структур в каналах с рёбрами полукруглого трансверсального профиля при ламинарном и переходном режимах течений

Опытные данные, которые приводятся, например, в [5, 6, 16], указывают, что смерчевых структуры в канале с выступами могут нестационарными в определённых диапазонах течения. В данном исследовании были получены расчётные значения нестационарных смерчевых структур для условий, для которых были получены значения для стационарных условий при ламинарном и переходном режиме течения ($Re=10^2...2,4 \cdot 10^3$; $d/D=0,80...0,92$; $t/D=0,33...1,22$; $Pr=170...320$).

В качестве иллюстрации нестационарных смерчевых структур приведём расчётные данные для наиболее характерных случаев течения в исследуемом диапазоне.

Результат расчётов нестационарных потоков воздушного теплоносителя в трубе с внутренними рёбрами квадратных, полукруглых и треугольных трансверсальных профилей при периодических постановках задачи приводятся на ри-

сунке 11 для условий $d/D=0,86$; $t/D=0,33$; $Pr=250$; $Re=10^2$; 10^3 ; $2 \cdot 10^3$.

Здесь приведены линии токов для циклических граничных условиях в синхронные моменты времени. Для критериев Рейнольдса $Re=10^2$ и $Re=10^3$; характерен ламинарный режим течения, а для $Re=2 \cdot 10^3$ – переходный.

На рисунке 11 отчётливым образом видны расчётные смерчевые структуры в их динамическом развитии нестационарных в трубах с турбулизаторами с различными трансверсальными профилями.

Для случая с $Re=10^2$ характерно развитие достаточно небольшого вихря после полукруглого турбулизатора, который довольно быстро стабилизируется и остаётся на одном уровне (рис. 11).

Для случая с $Re=10^3$ вышеуказанная стабилизация вихря происходит несколько раньше, чем для случая с $Re=10^2$, причём стабилизация реализуется, когда главный смерч достигает размеров смерчей для закрытой впадины (классифицировано в [6-9, 11, 12]), а затем реализуется его стабилизация (рис. 11).

Как видно из рисунка 11, стабилизированные вихри при $Re=10^3$ и при $Re=2 \cdot 10^3$ достигают гораздо больших размеров, чем при более низких критериев Рейнольдса $Re=10^2$. Вышесказанное указывает на меньшую интенсификацию теплообмена при ламинарном режиме течения, чем при переходных режимах течений.

Для случая с $Re=2 \cdot 10^3$, характерного уже для переходного режима течения, также происходит реализация главного смерча для закрытой впадины, который также стабилизируется, но стабилизация сопровождается генерацией вторичного вихря после турбулизатора в нижней его части (рис. 11).

Однако, эта генерация гасится со временем, а не развивается, как при турбулентных режимах течений [17-22]. Для верификационного сравнения на рисунке 12 приведены нестационарные линии токов для этих условий, где видны генерации и перекачивания смерчей при критериях Рейнольдса, которые на два порядка выше, чем при рассматриваемых в статье. Вышесказанное обуславливает уменьшение интенсификации теплоотдачи для переходного режима с уменьшением гидравлического сопротивления по отношению к турбулентному режиму.

Произведённые в статье успешные расчётные моделирования нестационарных параметров течений и теплосъёма в трубе с выступами разных трансверсальных профилей на основах низкорейнольдсовых ментеровских моделей обуславливают их перспективные использования при расчётах интенсифицированных теплоотдачи и гидросопротивления.

5. Заключительные выводы

1. В статье было произведено математическое моделирование теплообмена в канале с внутренними рёбрами полукруглых поперечных очертаний критериями Рейнольдса, характерными для ламинарного ($Re=10^2 \dots 2 \cdot 10^3$) и переходного ($Re=2 \cdot 10^3 \dots 10^4$) гидрорежима, на основаниях разнорешетчатых численных технологий, сформированных на расчётах конечно-объёмным факторизованным способом рейнольдсовых уравнений и энергетических уравнений, и выявлены интенсифицирования теплосъёмов для невысоких критериев Рейнольдса

$Re=2 \cdot 10^3 \dots 10^4$ в большом диапазоне критериев Прандтля, что перспективно актуально в канале теплообменника.

2. Достоинство реализованного в статье способа на основах методов контрольного объёма над имеющимися заключаются в том, что существующие [5] основываются на существенных приближениях, к примеру: приближений, сделанных Галёркиным, линеаризирования уравнений, использования способов переменного направления с последующими реализациями метода прогонок, реализация способов переменного уравнения с дальнейшими реализациями на базе метода прогонок и т.п.

3. В исследовании были произведены математические моделирования теплоотдачи в каналах с внутренними рёбрами полукруглых поперечных профилей при критериях Рейнольдса, которые характерны для ламинарного ($Re=10^2 \dots 2 \cdot 10^3$) и переходного ($Re=2 \cdot 10^3 \dots 10^4$) режимов течений для вязких теплоносителей ($Pr=170 \dots 320$), на базе многоблочной вычислительной технологии, которые основаны на решениях факторизованными контрольно-объёмными способами уравнений количества движения, неразрывности, энергии, что позволило получить значения интенсифицированной теплоотдачи для невысоких критериев Рейнольдса $Re=10^2 \dots 2 \cdot 10^3 \dots 10^4$ на широких диапазонах критериев Прандтля что может быть актуально в каналах теплообменных аппаратов.

4. Полученные результатов расчётов в ламинарной и переходной областях по гидравлическому сопротивлению удовлетворительно согласуется с экспериментом [5, 13-15]; по теплообмену расчётные данные качественно соответствуют экспериментальными данным [5, 13-15], но количественно опытные данные дают завышенные результаты относительно как относительно выполненных в статье расчётов, так и относительно работ [1, 3, 16].

5. Реализованные способом (ФКОМ-ом) в статье были сгенерированы как местные, так и интегральные, как стационарные, так и нестационарные характеристики потока и теплоотдачи в трубе с внутренними рёбрами для ламинарного и переходного режимов течения теплоносителя, что позволило детерминировать для этих режимов уровни интенсификации теплообмена, которые удовлетворительно коррелируют с имеющимися данными эксперимента.

6. Полученные закономерности могут использоваться при инженерного и научного расчёта интенсифицированного ламинарного и переходного теплообмена при течении в каналах с выступами, используемых в перспективных теплообменниках, применяемых в авиационной, ракетной, космической технике.

Литература

1. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1990. 208 с.
2. Мигай В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1987. 263 с.
3. Лобанов И.Е. Математическое моделирование теплообмена в трубах с турбулизаторами в области перехода к турбулентному течению // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2019. Том 1. № 13. С. 60-

- 65.
4. Лобанов И.Е. Математическое моделирование теплообмена в трубах с турбулизаторами, а также в шероховатых трубах, на воздухе при больших числах Рейнольдса // Отраслевые аспекты технических наук. 2013. № 9. С. 8-18.
 5. Назмеев Ю.Г. Теплообмен при ламинарном течении жидкости в дискретно-шероховатых каналах. М.: Энергоатомиздат, 1998. 372 с.
 6. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодическими выступами // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XIV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. М.: МЭИ, 2003. Т. 1. С. 57-60.
 7. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодическими выступами // Вестник МАИ. 2004. Т. 11. № 2. С. 28-35.
 8. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодически расположенными поверхностными турбулизаторами потока // Теплофизика высоких температур. 2005. Т. 43. № 2. С. 223-230.
 9. Лобанов И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах: Дисс. ... докт. техн. наук. М.: МАИ, 2005. 632 с.
 10. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю.А. Быстров, С.А. Исаев, Н.А. Кудрявцев, А.И. Леонтьев. СПб: Судостроение, 2005. 398 с.
 11. Лобанов И.Е., Калинин Э.К. Теоретическое исследование, сопоставление с экспериментом линий тока и составляющих кинетической энергии турбулентных пульсаций в вихревых структурах в трубах с турбулизаторами // Отраслевые аспекты технических наук. 2011. № 12. С. 4-15.
 12. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве). В 4-х томах. Том III. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением многослойных, супер-многослойных и компаундных моделей турбулентного пограничного слоя. М.: МГАКХиС, 2010. 288 с.
 13. Klaczak A. Wärmeübertragung und Druckverlust in neuartigen Turbulenzrohren // Forsch. Ing.-Wes. 1974. V. 40. № 4. S. 117-119.
 14. Назмеев Ю.Г., Лавыгин В.М. Теплообменные аппараты ТЭС. М.: Энергоатомиздат, 1998. 288 с.
 15. Теплообмен и гидравлическое сопротивление при ламинарном течении вязкой жидкости в трубах с искусственной шероховатостью / Ю.Г. Назмеев, А.М. Конахин, Б.А. Кумиров, В.В. Олимпиев, О.П. Шинкевич // Теплоэнергетика. 1993. № 4. С. 66-69.
 16. Лобанов И.Е., Неверов А.С. Математическое моделирование интенсифициро-

- ванного теплообмена в трубах с турбулизаторами в ламинарной и переходной областях // Проблемы повышения эффективности научной работы в оборонно-промышленном комплексе России: Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции (г. Знаменск, 13-14 апреля 2023 г.) / составитель Бориско Сергей Николаевич. Астрахань: Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева, Издательский дом «Астраханский университет», 2023. С. 201-205.
17. Лобанов И.Е. Математическое моделирование динамики развития вихревых структур в трубах с турбулизаторами // Московское научное обозрение. 2013. № 12. С. 9-15.
18. Лобанов И.Е. Математическое моделирование динамики развития вихревых структур в трубах с турбулизаторами // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2014. № 38. С. 16-31.
19. Лобанов И.Е. Теория динамики вихревых структур в трубах с турбулизаторами // Научное обозрение. 2015. № 22. С. 226-237.
20. Лобанов И.Е. Теория динамики вихревых структур в трубах с турбулизаторами // Электронный периодический рецензируемый научный журнал «SCI-ARTICLE.RU». 2023. № 116 (апрель). С. 11-24.
21. Лобанов И.Е. Теоретическое математическое моделирование динамики вихревых структур в трубах с турбулизаторами квадратного, полукруглого и треугольного поперечных сечений // Веб-портал профессионального сетевого педагогического сообщества «Ped-library.ru». 2020 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ped-library.ru/1590016341>.
22. Лобанов И.Е. Динамика вихрей в трубе с профильными выступами: квадрат, треугольник, полукруг // Сетевое издание «Международный педагогический портал «Солнечный свет»». 2021 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://solncesvet.ru/opublikovannyie-materialyi/dinamika-vihrey-v-trube-s-profilnymi-vys.4971393>.

УДК 004.05

**Исследование методики применения технологии виртуального
облачного офиса для программно-аппаратной поддержки создания
измерительных приборов СУ БЛА**

Юрий Вениаминович Стреналюк, 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,
Дарья Александровна Соколова, инженер, АО «НПО ИТ»,
г. Королев, Московская область

Описывается и анализируются возможности применение облачных технологий для задач поддержки создания новейшей техники на примере измерительных приборов типа блока чувствительных элементов для систем управления беспилотных летательных аппаратов (СУ БЛА) в формате виртуальных облачных офисов (ВОО).

Виртуальные облачные технологии, облачный офис, блок чувствительных элементов.

**Research of the methodology of application of virtual cloud office technology
for software and hardware support for the creation of measuring devices
of SU UAV**

Yuri Veniaminovich Strenalyuk, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor of the Department «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,
Daria Alexandrovna Sokolova, Engineer, JSC «NGO IT»,
Korolev, Moscow region

The possibilities of using cloud technologies for the tasks of supporting the creation of the latest technology are described and analyzed on the example of measuring devices such as a block of sensitive elements (BCE) for control systems of unmanned aerial vehicles (UAVs) in the format of virtual cloud offices (SBI).

Virtual cloud technologies, cloud office, block of sensitive elements.

Введение. Основной задачей и целью исследования является применение

облачных технологий для задач поддержки создания новейшей техники на примере серийного изготовления инерциального измерительного блока (ИИБ) для систем управления беспилотных летательных аппаратов (СУ БЛА) в формате виртуальных облачных офисов (ВОО) [1-6].

Работа выполняется при помощи компьютерных средств и с использованием доступных источников в интернете.

Организации, занимающиеся настройкой и выпуском приборов ИИБ. В настоящее время остро стоит задача производства достаточно большими сериями (в несколько сот изделий в год) БЛА народно-хозяйственного назначения среднего и тяжелого класса (в интересах топливно-энергетического комплекса, нефтехимической промышленности, транспорта, МЧС и многих других отраслей).

В данной работе будет рассматриваться производственные участки изготовления ИИБ, которые обычно применяются в БЛА указанных выше классах. Примем, что эти производственные участки располагают достаточным количеством ресурсов для конвейерного выпуска ИИБ.

В распоряжении этих участков находится рабочий офис, где располагаются рабочие места специалистов, инженеров и техников и лаборатории, где проводятся работы по испытаниям и настройке ИИБ.

Описание процесса настройки и выпуска ИИБ и выделение аспектов, требующих автоматизации при помощи ВОО.

Технологический цикл изготовления ИИБ от получения комплектующих деталей до выпуска готового прибора состоит из следующих операций:

- *Комплектование прибора* на комплексный стенд;
- *Проверка функционирования прибора* на комплексном стенде – электронные узлы прибора соединяются в рабочую систему и проверяется работа такой сборки вне корпуса прибора;
- *Сборка* – сборка проверенных электронных узлов в единый прибор;
- *Электромонтаж* – монтаж электронной составляющей прибора;
- *Заливка* – фиксация мастикой внутренних кабелей прибора;
- *Проверка отделом технического контроля (ОТК)* – ОТК проверяет качество выполнения операций 2-4 и их соответствие требованиям ТУ;
- *Технологическая вибрация* – прибор подвергается воздействию вибрации для проверки надёжности крепления мастикой (операция 4);
- *Проверка функционирования* после вибрации;
- *Сборка* – на прибор устанавливают все корпусные узлы, тем самым завершая сборку прибора;
- *Герметизация* – прибор заполняется осушенным азотом и герметизируется для обеспечения функционирования в сложных климатических условиях;
- *Проверка функционирования* полностью собранного прибора;
- *Окрашивание*;

- *Маркирование* – на прибор наклеиваются разметки осей прибора, заводской № прибора с указанием веса;
- *Проверка функционирования* после покраски;
- *Настройка ИИБ*;
- *Контроль внешнего вида* – проводится проверка внешнего вида прибора на соответствие требованиям ТУ после настройки;
- *Приёмсдаточные испытания*;
- *Контроль внешнего вида* – проводится проверка внешнего вида прибора на соответствие требованиям ТУ перед упаковкой;
- *Упаковка* – прибор упаковывается в кейс и пломбируется перед отправкой.

После данной операции прибор считается готовым к выпуску.

Данные операции выполняются участком сборки, участком испытаний и настройки и представителем ОТК производственного подразделения организации по выпуску ИИБ.

Результат приведенного выше процесса – готовый прибор ИИБ, для которого следует автоматизировать информационную часть процесса – обмен данными:

- Результаты испытаний;
- Данные о завершённых пунктах процесса выпуска прибора;
- ФИО работников, выполнявших конкретные операции над прибором.

Для выполнения вышеприведённых условий следует разработать ВОО, который обеспечивает:

- хранение данных о приборах (заводской № прибора; № договора, по которому был выпущен прибор; выполненные операции; ФИО работников, выполнивших данные операции; результаты испытаний);
- внесение новых данных по новым приборам;
- доступ всех задействованных лиц к базе данных, согласно матрице доступа на рисунке 1;
- хранение и доступ к файлам в формате типа Microsoft Excel;
- возможность вывода отчёта определённого вида по каждому прибору, внесённому в базу данных, в формате типа Microsoft Word.

	Чтение	Вывод отчетов	Изменение основной информации о приборах	Изменение записей о завершённых операциях	Внесение в базу новых приборов
Начальник отдела	Доступно	Доступно	Доступно	Доступно	Доступно
Главный специалист отдела	Доступно	Доступно	Доступно	Доступно	Доступно
Ведущий инженер	Доступно	Доступно	Доступно	Доступно	Доступно
Инженер/техник	Доступно	Доступно	Доступно	Доступно	Не доступно
Мастер	Доступно	Доступно	Не доступно	Доступно	Не доступно
ОТК	Доступно	Доступно	Не доступно	Доступно	Не доступно
Представитель ВП	Доступно	Доступно	Не доступно	Доступно	Не доступно

Рисунок 1 – Матрица доступа

Требования к ВОО

Приведем основные положения варианта Технического задания на построение ВОО.

1. Введение, общие сведения о создаваемой проекте системы ВОО.

1.1. Название: Проект виртуального офиса с использованием облачных технологий компании-производителя с подробным рассмотрением отдела настройки и выпуска приборов (ИИБ).

1.2. Область использования: высокотехнологические коммерческие компании.

Настоящее техническое задание распространяется на построение виртуального офиса, направленного на организацию работы компании, быстрое и удобное взаимодействие с коллегами, ведение документации, связанной с хранением данных о приборах ИИБ.

2. Основания и назначение разработки.

2.1. Объектом разработки является виртуальный облачный офис компании.

2.2. Офис строится в соответствии с планом отдела.

3. Требования к продукту разработки.

3.1. Перечень требований к аппаратно-программному окружению.

В процессе выпуска прибора ИИБ задействовано три рабочие группы: отдел ХХХ, цех ХХХ, Военное представительство. Для корректной работы ВОО требуется организовать N рабочих компьютеризированных мест на испытательном участке ХХХ, N рабочих компьютеризированных мест на участке сборки, N рабочих компьютеризированных мест ОТК.

У каждой рабочей группы должен присутствовать принтер с возможностью вывода на печать документов. Система ВОО должна с помощью серверов быть объединена в одну сеть. В системе ВОО должны присутствовать серверы: базы данных для хранения и интернет.

Компьютеры на рабочих местах должны обеспечивать вычислительную мощность, достаточную для работы с пакетом программ типа Office, а также программами типа Matlab и MathCad.

3.1.1. Локальные компьютеры с версией ОС ХХХ и сетевыми интерфейсами необходимой пропускной способности.

Компьютеры должны работать на ОС с установленным пакетом офисных программ Office и выше, а также поддерживать рекомендуемые системные требования для обеспечения корректной работы данного ПО, а также обеспечивать необходимую пропускную работу сетевых интерфейсов.

3.1.2. Браузер типа Google Chrome или Microsoft Edge.

3.1.3. Безопасный выход в Интернет и работа в нём.

Требуется настроить безопасный выход в интернет путём установки и настройки брандмауэра внутри операционной системы каждого отдельного офиса, установить антивирусное ПО, настроить интернет-сервер для фильтрации потенциально опасного трафика и отслеживания подозрительной активности в сети.

3.2.1. Хранение данных будет осуществляться на облачном сервере, ор-

ганизованным внутри предприятия, т.е. на файловом сервере внутри сети ВОО.

4. Состав и содержание работ по построению офиса.

4.1. Анализ требований к офису.

4.1.1. Вход в офис для сотрудника под уникальным логином и паролем.

Для входа в систему ВОО сотрудник должен ввести уникальный пароль и логин. Каждая учётная запись, в зависимости от должности пользователя, должна иметь определённые привилегии по в матрице доступа, рисунок 1.

Основная информация о приборах – заводской № прибора, № договора, по которому выпускается прибор, список операций.

4.1.2 Профиль работника.

В профиле хранится информация о должности сотрудника, номер помещения, где расположено его рабочее место, его контактный внутренний номер предприятия.

4.1.3 Работа с данными.

Сотрудник, в соответствии с матрицей доступа (рисунок 1), должен иметь возможность вносить, редактировать и удалять данные о приборе.

4.1.4 Работа с отчётами по приборам ИИБ.

В разрабатываемой системе должна быть возможность просмотреть данные по конкретному прибору в базе данных в формате отчёта определённого вида, а также распечатать этот отчёт.

4.1.5 Отслеживание процесса выпуска руководством подразделения организации.

В разрабатываемой системе должна быть предусмотрена возможность отслеживания конкретной операции для руководителей участков, ОТК.

4.1.6 Коммуникация между сотрудниками.

Так как процесс настройки и выпуска ИИБ не является коммерческой тайной, для облегчения кооперации между участками следует использовать внутренний корпоративный мессенджер.

4.2. Проектирование и разработка виртуального офиса.

4.2.1. Разработка структуры офиса.

Согласно описанным выше требованиям, структура ВОО должна выглядеть следующим образом, показанным на рисунок 2.

4.2.2. Реализация офиса.

4.2.3. Написание документации.

4.3. Тестирование.

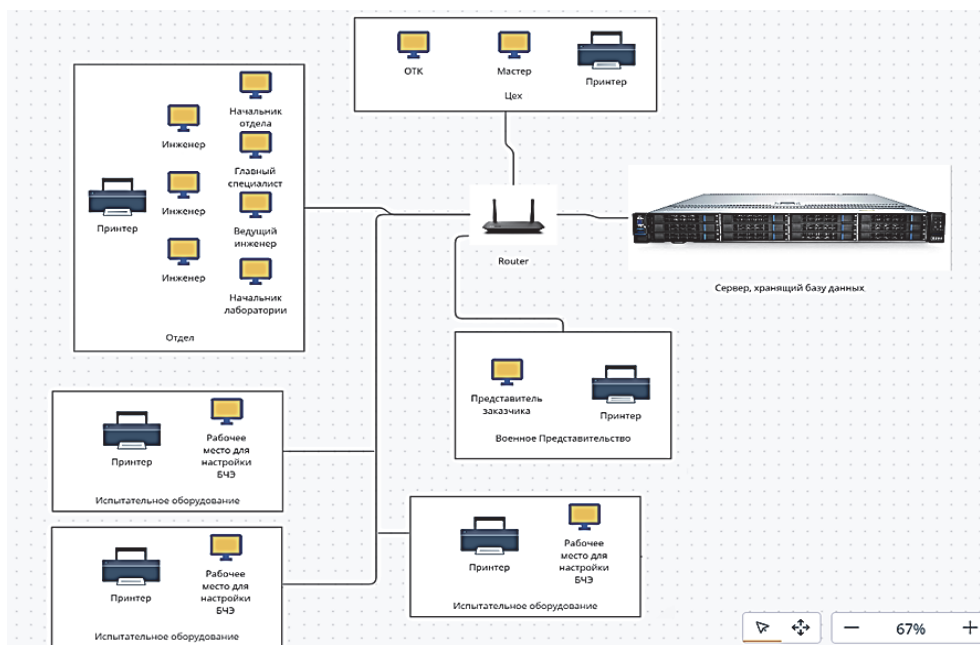


Рисунок 2 – Структурная схема ВОО

Логическая модель ВОО. Предприятие-изготовитель располагает достаточным количеством необходимых ресурсов для создания собственной локальной корпоративной сети, нет необходимости привлекать сторонние ресурсы за пределами организации.

Следовательно, виртуальный облачный офис развернется с помощью корпоративного облака на мощностях файлового сервера, базы данных и веб-приложения, функционирующих на сервере корпоративной базы данных; отдельно, для выхода в Интернет, организация будет использовать веб-сервер.

Исходя из вышеописанного, офис будет состоять из локальной сети на основе серверов, которая будет включать в себя

- 1) облачное файловое хранилище;
- 2) облачную базу данных с доступом через клиент веб-приложения;
- 3) защищенный доступ в Интернет.

Каждое из компьютеризированных мест внутри предприятия должно быть подключено к общей сети и иметь доступ ко всем вышеперечисленным функциям.

Всё вышеперечисленное вместе организует требуемый к разработке виртуальный облачный офис для виртуального обмена файлами и информацией, доступа к общим данным, возможности работы с ними, и доступа в глобальную сеть.

Аппаратная часть. Учитывая современные расценки на комплектующие для персональных компьютеров, под каждое рабочее место, с учётом ПО, следует заложить не менее 150 тыс. руб. Требуется:

- 17 мест на участке настройки и испытаний;
- 2 места на участке сборки;
- 1 место в ОТК.

Итоговая сумма затрат на ПК составит: $(17 + 2 + 1) * 150\,000 = 3\,000\,000$ руб.

Под сервер и маршрутизаторы следует заложить по 200 тыс. руб. на каждый, в итоге получим 1 000 000 руб.

С помощью сайта DNS была выбрана модель принтера Epson L3101, чья максимальная стоимость равняется 20 900 руб. Затраты на принтеры составят $20900 * 6 = 125\,400$ руб.

На ПО для организации облачной базы данных выделим 500 000 руб.

Итоговая стоимость системы составит

$3\,000\,000 + 1\,000\,000 + 125\,400 = 4\,125\,400$ руб.

Программная часть. Для реализации требуемого виртуального офиса требуется выбрать программное обеспечение, используемое на серверах предприятия.

Одним из распространённых решений в области серверного ПО является комплекс серверного программного обеспечения LAMP (Linux, Apache, MySQL, PHP/Perl/Python). Составные компоненты комплекса распространяются через открытое лицензионное соглашение GNU General Public License, и могут быть использованы бесплатно в том числе в работе коммерческих организаций.

В качестве операционной системы будет использоваться один из распространённых серверных Windows-дистрибутивов – Windows Server дистрибутив 2023г. версии Standart. Данный дистрибутив распространяется только на платной основе, цена лицензии равна 78 950 рублей. Требуется одна такая лицензия.

В качестве ПО веб-сервера для доступа в Интернет используем Apache - свободный открытый программный продукт, который можно использовать бесплатно.

Для обеспечения базы данных требуется внедрить в систему управления базами данных. Для данной задачи подойдёт MySQL. Согласно пользовательскому соглашению, данное ПО при условии нераспространения изменённого его исходного кода может быть использовано бесплатно в том числе в коммерческих целях.

Для написания веб-приложения, для доступа работников к системе ВОО отлично подходит язык программирования Python.

Учитывая изложенные выше факты, модель системы ВОО для предприятия будет выглядеть следующим образом (рисунок 3).

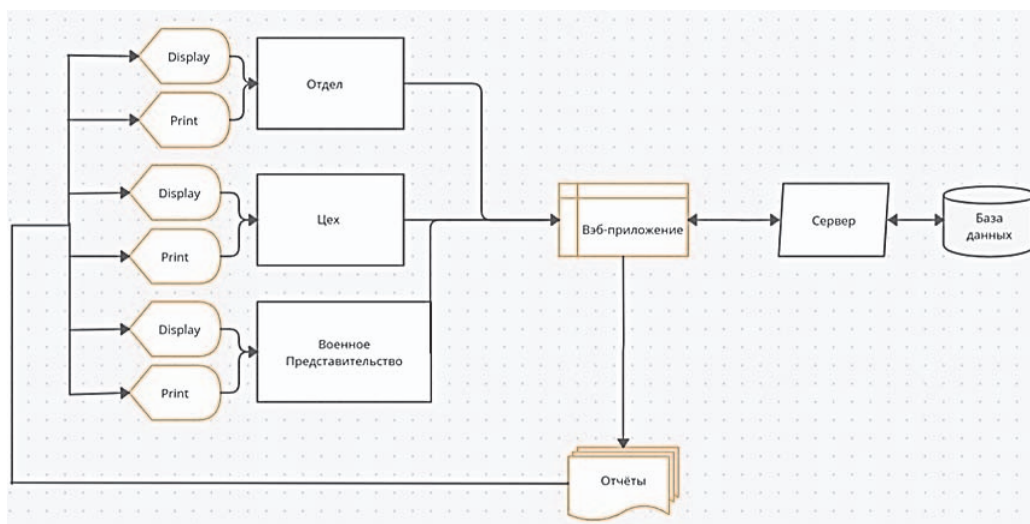


Рисунок 3 – Модель ВОО

Проектные решения для виртуального офиса

Согласно требованиям, описанным в ТЗ и пункте 3, сформируем прайс-лист на отдельные компоненты системы.

С запасом в 30%, стоимость ПО для рабочих мест будет рассчитываться из соображений 38 ПК на всех занятых в процессе настройки и выпуска ИИБ (18-й ПК – запас на случай выхода одного из рабочих ПК из строя).

Поскольку в указанных требованиях была описана платформа Microsoft Windows и соответствующие офисные пакеты, рассматриваются персональные компьютеры на основе данной ОС.

Для поддержки работы актуальных версий используемых программных продуктов рационально будет использовать компьютеры на основе процессоров Intel Core-i5 12 поколения.

Для работы во внутренней сети предприятия и обеспечения необходимой пропускной способности, компьютеры должны иметь сетевые интерфейсы со скоростью 1 Гбит/с.

В качестве комплекса серверного ПО будет использоваться, согласно описанному выше, связка ОС Windows Server, СУБД MySQL и веб сервера Apache.

Для полноценной и удобной работы с ВОО необходимо создать базу данных и веб приложение, через которое будет осуществляться доступ сотрудников, в том числе, к базе данных. Опишем техническое задание на разработку в рамках системы ВОО клиент-сервера базы данных.

Техническое задание на разработку клиент-сервера базы данных. В рамках реализации автоматизированной информационной системы требуется разработать такую систему, которая сможет выполнять следующие процессы:

- загружать в базу данных и выводить файлы результатов настройки в виде файла Microsoft Excel;

- выдавать информацию о приборах в работе в режиме реального времени руководителям участков, ОТК;
- отображать хранимую информацию в виде отчёта определённого вида с возможностью печати;
- вносить информацию о завершённых операциях по выпуску ИИБ;
- вносить информацию по результатам предъявительских и приёмосдаточных испытаний.

1. Для загрузки Excel файлов подойдёт стандартная форма выбора загрузки файла:

В пустом пространстве отображается список Excel файлов, из которого выбирается нужный.

Данная форма позволяет открыть файл Excel прямо из базы данных, а также позволяет удалить выбранный файл в случае необходимости.

2. Для выполнения данной задачи достаточно разработать виджет рабочего стола (рисунок 4), который будет отображать в реальном времени информацию по выбранным приборам:

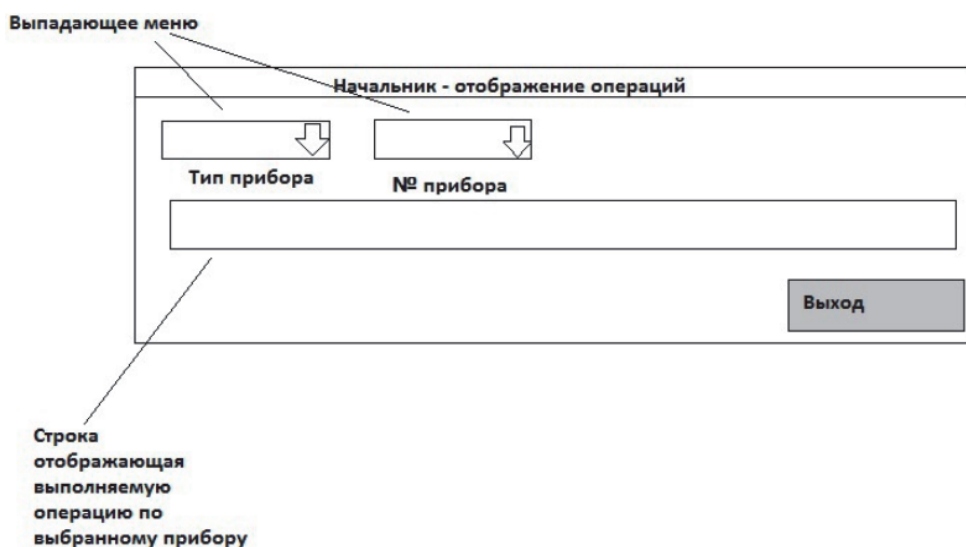


Рисунок 4 – Виджет прибора в реальном времени

3. Требуется отображать отчёт по выполненным операциям (рисунок 5):

Отчёт ✖		
Операция	Отметка о выполнении	Фамилия выполнившего
Проверка функционирования	Выполнено	Соколова Д.А.
Сборка	Выполнено	Иванов И.И.
Электромонтаж		

Печать

Закрыть

Рисунок 5 – Отчёт по выполненным операциям

4. Для выполнения данной задачи требуется разработать следующую форму (рисунок 6):

При нажатии на «Операция завершена» программа создаёт новую строку со следующей по списку операций.

При нажатии на «Error» программа создаёт новую строку с операцией «Ремонт». Напротив, данной строки располагаются выпадающее меню «Откат к операции» и кнопка «Ремонт завершён». В этом меню отображается список всех завершённых операций. После нажатия на «Ремонт завершён», программа переходит к указанной операции.

Инженер - работа с базой данных

Операция завершена
Error

Откат к
Ремонт завершён

Вывести весь список завершённых операций

Сохранить в формате Word

Вернуться к выбору прибора

Выход

Строка "Ремонта". Пока не нажата Error, недоступна

Рисунок 6 – Окно внесения информации по операциям

5. Для выполнения данной задачи требуется разработать следующую форму (рисунок 7):

Рисунок 7 – Внесение результатов по итоговым испытаниям

В данной форме требуется выбрать тип испытаний (настройка или приёмосдаточные (ПСИ)) в выпадающем меню.

Испытания проводятся согласно Техническим условиям (ТУ) на изделие, где каждому испытанию соответствует определённый пункт. Этот пункт выбирается в следующем выпадающем меню. После выбора этих двух пунктов возможно внести значение, полученное во время испытаний. Иконка дискеты позволит сохранить внесённые изменения без выхода из формы. Данная функция является страховкой на случай сбоя в работе программы.

Кнопка «Данные внесены» выполняет сохранение всех последних изменений и выход из программы.

Расчёт стоимости виртуального офиса. Обобщённый прейскурант цен представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Прайс-лист компонентов

Наименование	Стоимость (руб)	Количество
ASUS VivoBook 16 X1605ZA-MB386 Процессор: Intel Core i5-12500H 2.5-4.5 ГГц Оперативная память: 16 ГБ Накопитель: SSD Вес ноутбука: 1.88 кг	65 000	38
Сервер Intel Original R2224WFTZSR x24 2.5" 10G 2P 1x1300W (R2224WFTZSR 986051)	214 825	1
Принтер Epson L3101	20900	6
NAS-сервер ASUSTOR AS7110T	290 755	1
Жесткий диск WD Red Plus WD120EFBX. Формат: HDD Объем: 12 ТБ	27870	18
Коммутатор Cisco SG350X-48 SG350X-48-K9-	107360	3

Наименование	Стоимость (руб)	Количество
EU		
Компьютерная мышь Oklick 105S	199	38
ОС Windows Server Издание: Standart	78950	1
Антивирусное ПО: Kaspersky Small Office Security. На 20 устройств на 2 года	40760	1

Итоговая стоимость ВОО составит 2 195 992 руб.

Выводы. В ходе исследования была решена задача применение облачных технологий для поддержки серийного производства новейшей техники на примере инерциальных измерительных блоков типа для СУ БЛА в формате виртуального облачного офиса.

Кратко описаны организация-изготовитель, процесс настройки и выпуска прибора ИИБ, обозначены действующие лица, сформированы требования к ВОО.

На основе этих данных была создана логическая модель и рассмотрены возможные проектные решения: выбрана система для ВОО, проанализирована стоимость, проведён анализ трафика сети.

Оценка стоимости ВОО составляет 2 195 992 руб., что является приемлемым для бюджета на разработку.

Литература

1. Газейкина А.И., Кувина А.С. Обучение информатике в школе на основе познавательного сотрудничества средствами облачных технологий // Педагогическое образование в России. 2014. № 4. С. 180.
2. Легашев Л.В. Имитационная модель облачного ресурсного центра / Л.В. Легашев, И.П. Болодурина, П.Н. Полежаев // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2016. № 2 С. 113.
3. Монахов В.М. Технологические основы проектирования и конструирования учебного процесса. Волгоград: Перемена, 2015.
4. Облачные вычисления как настоящее и будущее ИТ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://venture-biz.ru/informatsionnye-tehnologii/205-oblachnye-vychisleniya> (дата обращения 20.12.2021).
5. Полежаев П.Н., Шухман А.Е., Ушаков Ю.А., Легашев Л.В., Тарасов В.Н. Модельное исследование эффективного планирования задач для облачных вычислительных систем // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2013. № 4. С. 140.
6. DNS- интернет магазин цифровой и бытовой техники по доступным ценам [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.dns-shop.ru/?utm_source=yandex.ru (дата обращения: 9.10.2023).

УДК 677.4

Изучение возможностей применения композиционных покрытий с интеркалированным графитом на кремнеземной основе для средств защиты при пожарах

Владимир Владимирович Абразумов, доктор технических наук,
профессор кафедры механики и инженерной графики,
Сергей Владимирович Фролов, кандидат физико-математических наук,
заведующий кафедрой 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 аналитический обзор характеристик огнестойких эластичных тканей российского и зарубежного производства, компонентный состав интумесцентных теплозащитных покрытий с интеркалированным графитом для приготовления многослойных композитов на тканевой кремнеземной основе с оптимальной теплозащитой. Изучены отдельные теплозащитные характеристики эластичных композитов и показана принципиальная возможность для их применения при изготовлении индивидуальных средств защиты при пожарах.

Огнестойкие ткани, кремнеземные ткани, интумесцентные покрытия, интеркалированный графит.

Study of the possibility of using composite coatings with intercalated graphite on silica base for fire protection equipment

Vladimir Vladimirovich Abrazumov, doctor of technical sciences,
professor of the department of mechanics and engineering graphics,
Sergey Vladimirovich Frolov, candidate of physical and mathematical sciences,
head 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 analytical review of the characteristics of fire-resistant elastic fabrics of Russian and foreign production, the component composition of intumescent heat-protective coatings with intercalated graphite for the preparation of multilayer composites based on fabric silica with optimal heat protection. Separate heat-protective characteristics of elastic composites have been studied and a fundamental

possibility for their use in the manufacture of personal protective equipment in case of fires has been shown.

Fire resistant fabrics, silica fabrics, intumescent coatings, intercalated graphite.

Введение

Основной характеристикой огнестойкого материала является его способность выдерживать высокие температуры в течение определенного интервала времени с сохранением своих физико-механических свойств. Материал, предназначенный для изготовления защитных покрывал, палаток, «пожарных одеял» должен обладать не только огнезащитными, но также и теплозащитными свойствами с рядом дополнительных свойств:

- низкая плотность;
- эластичность;
- достаточная механическая прочность;
- химическая стойкость; экологичность.

Решение этой задачи возможно только на основе создания сложного композиционного материала, основу которого должна составлять огнестойкая ткань с теплозащитными покрытиями.

Рассмотрим основные виды тканей, которые могут быть использованы для создания материала, обладающего высокой огнестойкостью и необходимой прочностью.

Основу огнестойких тканей должны составлять оксидные соединения, обладающие химической инертностью по отношению к кислороду, и тем самым не вступающие в реакцию окисления. Это могут быть смеси природных и искусственных оксидов, а также полученные на их основе волокнистые материалы, из которых формируется огнестойкая ткань.

Большую группу огнестойких материалов составляют тканые структуры, полученные переплетением волокон из следующих базовых веществ: кварца, арамида, кремнезема.

Краткий обзор огнестойких и теплозащитных материалов

Кварцевые ткани. Для производства кварцевой ткани используют волокна, получаемые путем вытягивания в нити расплавленные струи кварцевого стекла при температуре 2300 °С.

Для получения сверхчистых кварцевых волокон, содержащих не менее 99,95% (по весу) диоксида кремния (SiO_2), используется метод сухого формования из раствора жидкого стекла на водной основе. Такие волокна сохраняют структуру и свойства при кратковременном нагреве до 2000 °С, а в условиях длительной эксплуатации до 1200 °С.

Кварцевые ткани получают из нитей ткацким способом, которые безвредны для здоровья человека.

Физико-механические свойства наиболее часто используемых марок кварцевых тканей представлены в таблице 1 [1].

Таблица 1 – Физико-механические свойства кварцевых тканей

Наименование показателей	Единицы измерения	ТК-3	ТС-8/3-К
Тип переплетения		полотно	сатин 8/3
Масса (ГОСТ 6943.16-94)	г/м ²	112	290
Толщина (ГОСТ 6943.10-2015)	мм	0.12	0,28
Нагрузка на разрыв (ГОСТ 6943.10-2015)	Н (кгс)	246 (25)	1077 (110)

Сверхчистые кварцевые волокна широко используются в различных отраслях промышленности. Сочетание таких уникальных свойств данных материалов, как высокая термическая стойкость и прочность позволяет использовать их для производства тепловой защиты космических аппаратов, скафандров для космонавтов, обтекателей самолетов, различной спецодежды, предохраняющей людей от воздействий различных неблагоприятных факторов, открытого пламени и брызг расплавленного металла.

Лидирующее место в топе производителей занимает компания Unimin (США), чья доля производства составляет около 80%. Второе место по объему на рынке у The Quartz Corp (Норвегия - США), ее доля – 8%. На третьем месте с долей в 7% находится российская компания «Русский кварц» [2].

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. Наибольшей востребованностью отличаются три основных типа арамидных волокон:

- пара-арамида (торговые названия: тварон, кевлар, СВМ, терлон);
- мета-арамида (номекс, арселон);
- сополимеры арамидов (кермель).

Из перечисленных арамидных волокон наибольшей термостойкостью обладают пара-арамида [3].

Нити, используемые для изготовления арамидных тканей, могут содержать от 130 до 10000 волокон. От их количества зависят показатели прочности [4].

Лидером среди арамидных негорючих текстильных тканей является волокно PANOX, которое может использоваться в качестве эффективной защиты от воздействия открытого огня и теплового потока [5].

PANOX – это окисленное полиакрилонитрильное (PAN) волокно, которое при нагреве устойчив к размягчению, плавлению, горению и не токсично. Во-

локно PANOX является наиболее термоустойчивым, температура плавления которого составляет 885 °С.

Существует достаточно много разновидностей арамидных тканей. Они отличаются строением волокон, типом плетения нитей, плотностью и дополнительными свойствами. С использованием этого волокна производятся арамидные ткани Termoshield (Германия), которые обладают устойчивостью к высоким температурам, не поддерживают горения и тления. Так, ткань Termoshield PS устойчива к тепловому излучению свыше 5 кВт/м², а также к поверхностной температуре до 500 °С [6]. Волокна типа Kevlar отвечают за отличные прочностные характеристики данного материала. Высокий кислородный индекс (55) данной ткани позволяет ей не тлеть и не гореть в открытом пламени. Ткань Termoshield PS представляет собой мягкую, дышащую и нетоксичную легкую ткань (260 г/м²).

Ткань Termoshield AL обладает специализированным покрытием на основе алюминия, что позволяет ей экранировать тепловое излучение мощностью до 20 кВт/м². Основу данной ткани, помимо указанного выше покрытия, составляют волокна PANOX (70%) и Kevlar (30%).

Кремнеземные ткани. Состав кремнеземного текстиля по многим показателям совпадает с кварцевыми негорючим тканями, за исключением более низкого (не более 95%) содержания оксида кремния [7]. Данный материал обеспечивает защиту от температур до 1200 °С, а кратковременно до 2000 °С.

Кварцевые волокна, с содержанием оксида кремния менее 95% (кремнеземные волокна), изготавливают путем кислотной обработки алюмоборосиликатного состава, также используемого для бесщелочного волокна, из силиката натрия с различными добавками [8].

Кремнеземные волокна, выпускаемые промышленностью, аналогичны таким же, полученным выщелачиванием их из горных пород. Температура при применении данного волокна может достигать 1200 °С.

Кремнеземные волокна обладают хорошими теплоизоляционными, теплозащитными и диэлектрическими свойствами при высоких температурах. Коэффициент теплопроводности тканей при 1000 °С – 0,22 Вт/м·К, удельное электрическое сопротивление – 10¹⁸ Ом·см при 20 °С, диэлектрическая проницаемость – 3,7 [9].

Кремнеземные ткани производят из крученых кремнеземных нитей с помощью полотняного (КТ) или сатинового переплетения (PS).

Физико-механические свойства кремнеземных тканей представлены в таблице 2 [10].

Таблица 2 – Физико-механические свойства кремнеземных тканей

Наименование показателей	Ед. изм.	КТ-11-13	КТ-11-ТО	КТ-11-Э/0,2-13	КТ-11-Э230-13-ТО	КТ-Э-105	КТ-Э-115-ТО
Ширина	мм	880	820	880	830	900	850
Толщина	мм	0,32	0,41	0,20	0,23	0,105	0,115
Масса 1м ²	г	300	290	180	180	95	95
Линейная усадка (1000°С)	%	7,0	7,0...1,5	7,0	7,0...1,5	7,0	7,0...1,5

Данный материал является экологически чистым и безопасным для человека. Он применяется для производства фильтров, огнестойких и различных изоляционных покрытий.

Для улучшения свойств тканей (повышенной эластичности, износостойкости, водо-дымонепроницаемости) их подвергают различным видам обработки и пропитки (обработка вермикулитом, полиуретаном и др.).

Характеристика теплозащитных покрытий

Основной задачей огнестойкого и теплозащитного материала в создании эффективных средств защиты пожарных в экстремальных условиях пожаров (плащ-палатки, накидки) является не только применение негорючих тканей, обладающих огнестойкими свойствами при прямом воздействии пламени и мощного теплового излучения, но и эффективная тепловая защита, исключающая нагрев защищаемой поверхности не выше 150 °С в течение максимально возможного периода времени, выражаемого в минутах.

Огнестойкие материалы на минеральной основе, хотя и обладают низкой теплопроводностью, но в полной мере обеспечить требуемый тепловой режим на защищаемой поверхности они не могут. Принимая во внимание важнейшее требование к индивидуальным средствам защиты – малый вес, решение задачи тепловой защиты может достигнуто путем нанесения на огнестойкий материал тонкослойного защитного покрытия, максимально снижающего скорость распространения теплового потока. Решение этой задачи может быть достигнуто на основе применения сравнительно недавно разработанных покрытий, в основе которых лежит принцип интумесценции (вспучивания) под действием нагрева.

Интумесцентная (терморасширяющаяся) технология защиты от повышенных температур заключается во вспучивании поверхностного слоя материала под воздействием теплового потока с последующим превращением его в кокс [11]. Обладая низкой теплопроводностью, вспененный кокс предохраняет в течение определенного времени защищаемую поверхность от воздействия открытого огня и инфракрасного излучения.

Для уменьшения количества поступающих в зону высокого нагрева горючих веществ, необходимо увеличить получение карбонизированных продуктов, а также увеличить толщину вспененного слоя, что позволит снизить влияние теплового потока на защищаемую поверхность. Увеличение стойкости кокса к повышенным температурам приведет соответственно к повышению его теплоемкости, и в результате, к повышению затрат энергии на его нагрев. Изменение строения кокса окажет влияние на теплопроводность, теплоемкость, стойкость к выгоранию.

Таким образом, эффективность тепловой защиты зависит от толщины теплозащитного слоя и степени его расширения при нагреве. При нагреве толщина и объем разбухающего материала могут увеличиваться во много раз с образованием негорючего вспененного слоя, который, обладая низкой теплопроводностью, создает своеобразный физический барьер проникновению тепла в защищаемую поверхность и снижает скорость её нагрева. Очень важно, что физико-химические процессы коксообразования не сопровождаются выделением токси-

ческих веществ, опасных для человека.

Немаловажной особенностью вспучивающихся составов является возможность нанесения их, как правило, кистью, валиком или другими механизированными способами на огнестойкий материал.

Поэтому тонкослойные лакокрасочные покрытия интумесцентного типа нашли широкое применение в строительной отрасли для защиты металлических и деревянных конструкций с целью снижения скорости нагрева и увеличения времени до начала потери их несущей способности.

Теплозащитные вспучивающие покрытия являются многокомпонентными композиционными материалами, поэтому эффективное вспенивание их может быть достигнуто не только при наличии в их составе компонентов, отвечающих за выполнение определенных функций, но и концентрации их в композиции.

Для формирования прочного пенококсового слоя необходимы компоненты, выполняющие роль связующего, в качестве которых используются полимерные в виде различных дисперсий на водной основе и неорганические на основе синтетических смол.

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

Фосфоросодержащие соединения, обычно полифосфаты аммония, выполняют функцию катализатора процесса коксобразования. Для получения высокопористого пенококсового слоя используются соединения, выполняющие задачу газообразования (меламин, мочевины 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.

Характеристика некоторых интумесцентных соединений представлена в таблице 3 [12].

Таблица 3 – Основные свойства интумесцентных соединений

Название	Растворимость в воде	Температура распада, °С	Основные продукты распада
Бутилмочевина	нет	96	NH_3 , H_3PO_4 , H_2O , CO_2
Гуанидин	да	160	NH_3 , H_3PO_4
Дициандиамид	нет	230	NH_3 , H_2O , CO_2
Меламин	нет	300	NH_3 , H_2O , CO_2
Мочевина	да	130	NH_3 , H_3PO_4
Тиомочевина	мало	180	H_3PO_4 , NH_3 , H_2O , CO_2
Хлорпарафин	нет	200	H_2O , CO_2 , HCl

Поскольку процесс коксообразования во вспучивающихся системах зависит не только от количества, но и от качества участвующих в нем ингредиентов, то в результате такого процесса можно получить вспененный слой с наиболее подходящими для конкретного применения свойствами. Если, как в данном случае, требуется высокотемпературное покрытие, то основное влияние будут оказывать следующие факторы:

- состав огнезащитной пропитки;
- количественное и качественное соотношение между реагентами;
- особенности физико-химических процессов, которые протекают при формировании вспененного кокса.

Классический состав интумесцентной системы состоит из следующих обязательных компонентов: меламин, полифосфат аммония, пентаэритрит. Количественное соотношение этих компонентов в составе будет определять процессы пенококсообразования и, в конечном итоге, эффективность терморасширяющегося покрытия.

Получение высоких огнезащитных свойств материалов может быть достигнуто не только использованием химических компонентов (полифосфат аммония, полиэритрит, 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.

Внедрение атомов или молекул чистых компонентов или их соединений (интеркалята) в слоистую структуру графита позволяет его слоям значительно расширяться при воздействии высоких температур за счет мгновенного испарения интеркалята, что и приводит к вспучиванию исходного материала. Процесс вспучивания начинается уже при температуре 140...150 °С. 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.

Окисленный графит имеет различные степени расширения. Свойства окисленного терморасширяющегося графита марки EG-350 представлены в таблице 4 [13].

Таблица 4 – Характеристика окисленного терморасширяющегося графита марки EG-350

Содержание углерода, %	97
Первоначальное расширение при температуре, °С	175
Влажность, % <	1
Зольность, %	5
Размер частиц (80), мкм	82
Степень расширения	350
рН водной суспензии	5-6

Экспериментальные исследования огнезащитных композиционных покрытий с терморасширяющимся графитом

Основываясь на проведенном обзоре огнезащитных тканей и композиционных покрытий российского и зарубежного производства в качестве тканевой основы, обладающей очень высокой огнестойкостью и прочностью, для дальнейших исследований была выбрана кремнеземная ткань марки КТ-11-13.

Для приготовления суспензии вспучивающегося типа в качестве интумесцентных компонентов использованы следующие: графит окисленный терморасширяющийся КР 350-80 (Китай) [14], полифосфат аммония KYLIN APP-201 (Китай) [15], пентаэритрит технический [16], меламин TIAN FU (Китай) [17].

Составы исследуемых суспензий на основе поливинилацетатной дисперсии (ПВА) и хлоропренового каучука (ХК) представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Химический состав материалов исследуемых суспензий

№ п/ п	Наименование компонентов	Концентрация, массовая доля, %, на основе	
		ХК	ПВА
1	Графит окисленный терморасширяющийся КР 350-80 (Китай)	13	13
2	Каучук хлоропреновый Неопрен 24	41	—
3	Меламин TIAN FU (Китай)	8	9
4	Полифосфат аммония KYLIN APP-201(Китай)	15	16.0
5	Поливинилацетат Д50-Н	—	41
6	Пентаэритрит технический ТУ2422- 038	8	8,5
7	Растворитель Нефрас С2-80/120	остальное	—
8	Вода	—	остальное

Ниже приведены краткие сведения по методике проведения изучения термозащитных свойств композиционных образцов.

Приготовление огнезащитных суспензий заключалось в механическом перемешивании массовых частей порошков основных компонентов, которое производилось в смесителе в сухом виде вручную, а также с использованием миксера для получения смесей больших объемов. Для взвешивания компонентов использовались электронные портативные цифровые весы модели РМ-92543.

Полученная смесь засыпалась в связующую суспензию (в предварительно растворенный хлоропреновый каучук или поливинилацетатную дисперсию) и производилось тщательное перемешивание с помощью миксера для получения однородной массы. Чтобы была требуемая вязкость, при смешивании использовались растворитель Нефрас, вода и ПВА на основе водной дисперсии.

Определение коэффициента вспучивания огнезащитной суспензии

Эффективность тепловой защиты объекта зависит от толщины слоя суспензии и степени его расширения при нагреве. При нагреве толщина и объем вспененного слоя могут увеличиться в десятки раз, образуя при этом негорючий вспененный кокс, который препятствует проникновению тепла в защищаемую поверхность и снижает скорость её нагрева.

Для оценки интумесцентных свойств материала используется следующая

формула, которая позволяет определить коэффициент вспучивания $K_{вс}$:

$$K_{вс} = \frac{T_{вс}}{T_0},$$

где T_0 – толщина исходного слоя покрытия;

$T_{вс}$ – толщина вспученного слоя.

Коэффициент вспучивания определялся как среднее арифметическое по результатам трех измерений.

Определение коэффициента вспучивания покрытия по «Методике испытаний по определению коэффициента вспучивания огнезащитных покрытий и материалов» (ГОСТ Р 12.3.047-2012) производился на металлических пластинах из нержавеющей стали размером 50x50 мм и толщиной 3 мм.

Для определения влияния толщины терморасширяющегося покрытия на коэффициент вспучивания $K_{вс}$ на эталонные пластинки наносились покрытия различных толщин. Образцы подвергались сушке в муфельной печи при $t = 60^\circ\text{C}$ в течение 2-х часов.

Терморасширение проводилось в муфельной печи типа SNOL12-1100 при температуре 600°C в течение 5 минут. Измерения толщины исходного покрытия и вспученного слоя производились штангенциркулем.

Для получения направленного вспучивания образца использовалась кварцевая трубка диаметром 20 мм, которая устанавливалась на металлическую шайбу с проточкой определенной глубины, заполненной суспензией.

Зависимости коэффициента вспучивания исследуемых суспензий от толщины слоя покрытия представлены на рисунке 1.

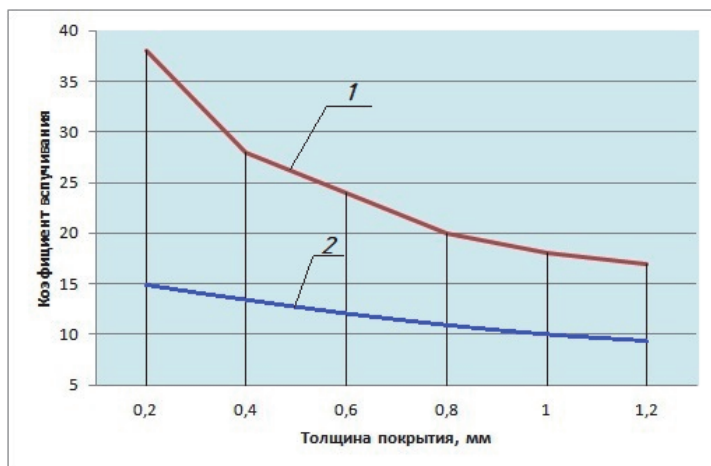


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента вспучивания от толщины покрытия:

1 – покрытие на поливинилацетатном связующем;

2 – покрытие на хлоропеновом каучуке

Изучение термозащитных свойств композиционных образцов

Для изготовления композиционных образцов использовалась кремнеземная ткань КТ-11-13 в виде полотна, характеристика которой представлена в таблице 6 [10].

Таблица 6 – Характеристика кремнеземной ткани КТ-11-13

Наименование показателей	Единицы измерения	КТ-11-13
Химический состав:		
SiO ₂	%	94,5 ... 96,0
Al ₂ O ₃ :	%	3,5 ... 4,0
Примеси	%	≤ 1,0
Тип плетения		полотняное
Ширина полотна	мм	880
Толщина	мм	0,35
Масса 1м ²	г	300
Линейная усадка (1000 °С)	%	7,0
Максимальная температура нагрева	°С	1200

Из полотна вырезались образцы диаметром 100 мм, на одну из поверхностей которого, обращенной к защищаемому объекту, наносилась с помощью шпателя огнезащитная суспензия на основе водной дисперсии поливинилацетата толщиной 0,3 мм. На эту поверхность накладывался другой образец из кремнеземной ткани. Таким образом, суспензия располагалась между слоями огнестойкой ткани.

Для отражения инфракрасного излучения на «горячую» сторону, обращенную в сторону теплового источника, приклеивалась алюминиевая фольга толщиной 0,2 мм.

Полученные образцы подвергались сушке при температуре 60 °С в течение 2-х часов.

После сушки на «холодную» сторону образца приклеивался нетканый теплоизоляционный материал в виде холста из кремнеземных волокон, пропитанного порошком аэрогеля.

Теплоизоляция образца необходима для того, чтобы уменьшить скорость нагрева защищаемого объекта на начальном этапе действия теплового потока на образец, так как вспучивание суспензии начинает происходить при температуре около 180 °С.

Выбор аэрогеля в качестве теплозащиты обусловлен исключительно низкой теплопроводностью этого материала (коэффициент теплопроводности 0,025 Вт/м·К) и низкой плотностью. Пористость аэрогеля превышает 90%. Аэрогель на основе диоксида кремния представляет собой наноразмерный каркас с большим количеством пор, заполненных воздухом или газом.

Тепловые испытания образцов заключались в одностороннем радиационно-конвективном нагреве образца, закрепленного во входном отверстии термопанели, помещенной в проем муфельной печи.

Термопанель является аналогом дверцы муфельной печи, выполненной из газосиликата с нанесенным на поверхность огнеупорным покрытием на основе шамотной глины и жидкого натриевого стекла. В центре термопанели сделано отверстие диаметром 100 мм, в которое устанавливается испытуемый образец. Для отражения теплового потока на внутренней стенке термопанели установлен экран в виде полированной фольги из нержавеющей стали.

Печь предварительно разогревалась до заданной температуры (600 °С),

подготовленный образец с термопарами после достижения указанной температуры устанавливался в термopанель. Затем включалась система измерения температуры и секундомер для фиксации продолжительности нагрева.

Для испытаний композиционных образцов использовались 4 типа образцов, содержащих слоистый композит, состоящий из материалов следующих слоев: алюминиевая фольга (АФ), огнезащитная суспензия (ОС), огнезащитная кремнеземная ткань (КТ), термоизоляция на основе аэрогеля (ТИ):

- образец № 1: АФ – ОС – КТ – ТИ;
- образец № 2: АФ – КТ – ОС – АФ – ОС – КТ – ТИ;
- образец № 3: АФ – КТ – ОС – КТ – ТИ;
- образец № 4: АФ – КТ – ОС – КТ – ТИ.

Результаты испытаний композиционных образцов разного строения в виде зависимостей температуры на тыльной («холодной») стороне от продолжительности нагрева представлены на рисунках 2-5.

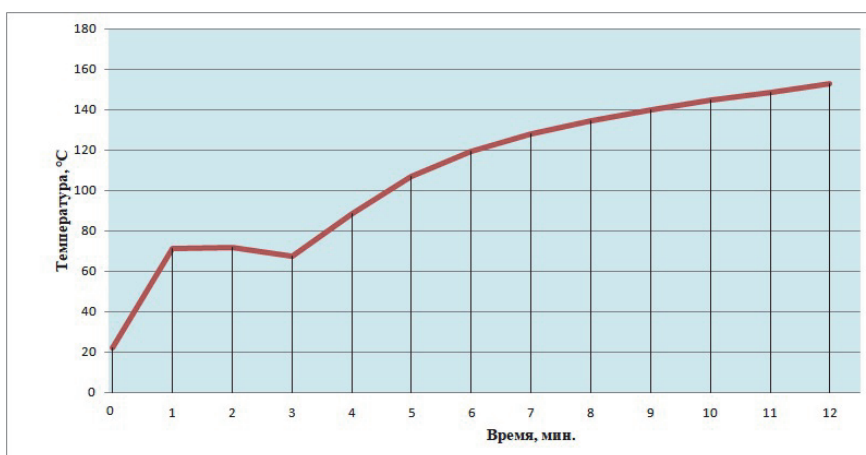


Рисунок 2 – Зависимость температуры на «горячей» поверхности образца № 1 от продолжительности нагрева

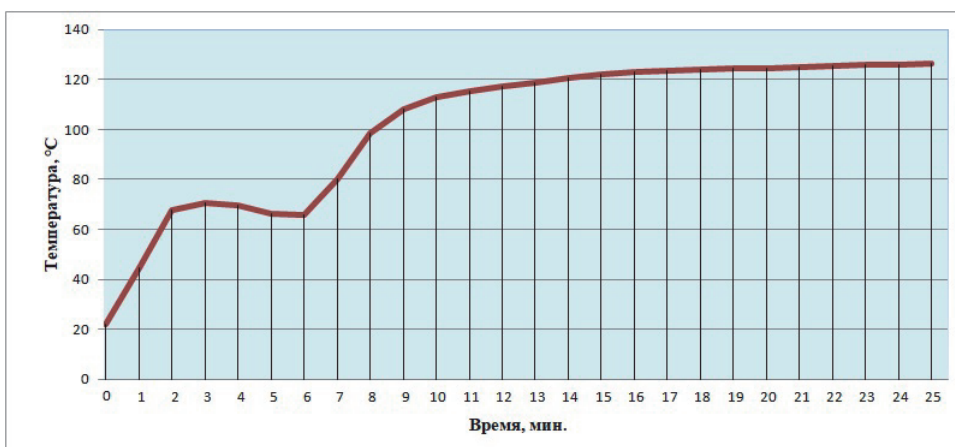


Рисунок 3 – Зависимость температуры на «горячей» поверхности образца № 2 от продолжительности нагрева

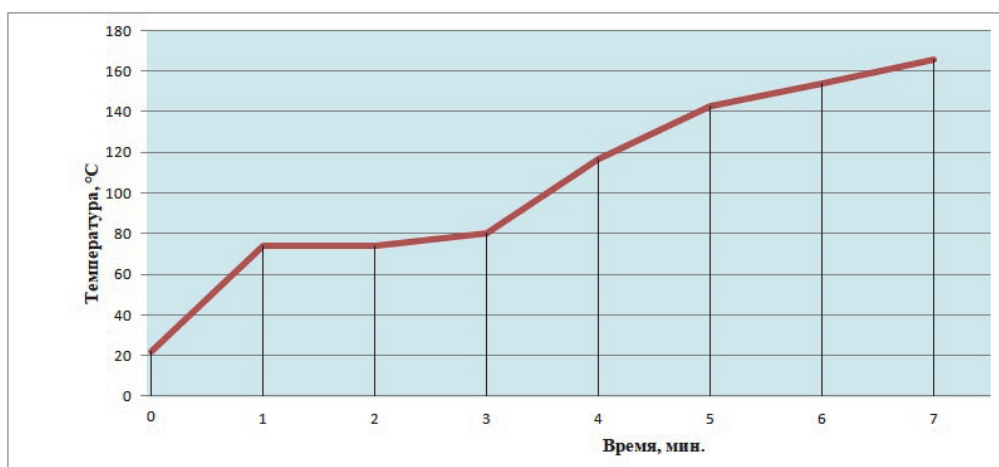


Рисунок 4 – Зависимость температуры на «горячей» поверхности образца № 3 от продолжительности нагрева

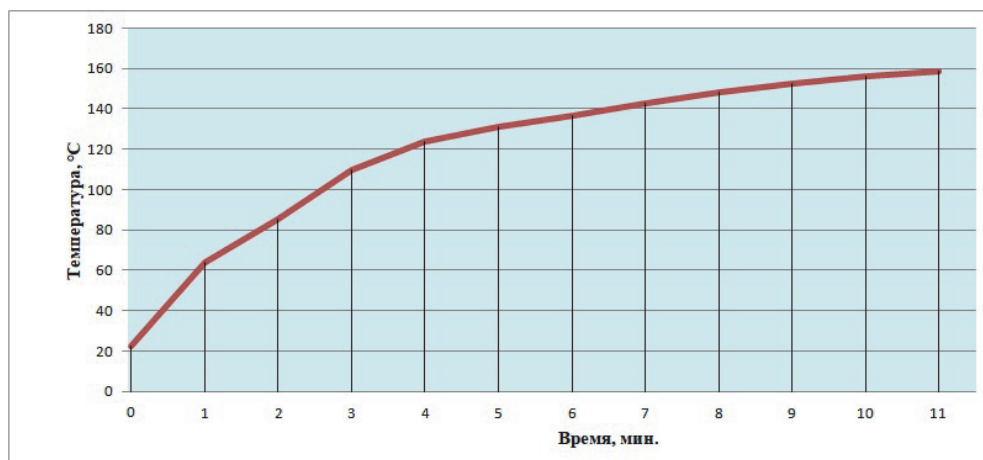


Рисунок 5 – Зависимость температуры на «горячей» поверхности образца № 4 от продолжительности нагрева

На основе полученных экспериментальных данных наилучшие показатели теплозащитных свойств демонстрирует композит, имеющий состав и строение образца № 2 (рисунок 3), который может быть рекомендован для преимущественного использования при изготовлении индивидуальных средств защиты.

Выводы

На основе анализа результатов исследований огнезащитных свойств терморасширяющихся композиций выбранных составов с интеркалированным графитом на кремнеземной основе можно выделить композицию с чередующимися слоями АФ – КТ – ОС – КТ – ТИ, как наиболее приемлемую из рассмотренных для возможного использования при изготовлении индивидуальных средств за-

щиты личного состава при пожарах.

Литература

1. ТУ 6-19-062-100-88 Ткань кварцевая марки ТК-3.
2. Анализ рынка высокочистого кварца в России [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://express.liberty7.ru/blog/high-purity-quartz-russia> (дата обращения 05.07.2023).
3. Hybrid Yarn [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/hybrid-yarn>.
4. Арамид: производство, виды, достоинства и сферы применения тканей [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://shopnewcomposite.ru/blogs/aramid> (дата обращения 21.01.2024).
5. Волокно Panox [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.aeroexpo.com.ru/prod/sgl-carbon-technic-sas/product-187239-62007.html> (дата обращения 30.12.2023).
6. Сабирзянова Р.Н. Современные тенденции в производстве огнестойких текстильных материалов / Р.Н. Сабирзянова, И.В. Красина // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 8. С. 75-79. EDN QBIZCH.
7. Кремнеземная ткань: характеристики и применение [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://izol.pro/stati/kremnezemnaya-tkan-ee-harakteristiki-tipy-i-primeneniye/> (дата обращения 25.01.2024).
8. Получение кремнеземных и кварцевых нитей и волокон [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://studref.com/648726/tehnika/poluchenie_kremnezemnyh_kvartsevyh_nitey_volokon (дата обращения 15.12.2023).
9. Кремнеземные материалы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://prostekloplastic.ru/products/silica-fiber-materials/> (дата обращения 12.01.2024).
10. ТУ 13.20.46-240- 18087444-2018. Ткани кремнеземные.
11. Исследование влияния вспучивающего антипирена на повышение огнестойкости текстильных материалов / Р.Н. Сабирзянова, И.В. Красина, О.А. Тучкова, Р.Ш. Еналеев // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 3. С. 53-54. EDN RXMFPR. Свойства химических соединений интумесцентного типа [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ogneportal.ru/articles/coatings/1072> (дата обращения 25.12.2023).
12. Свойства химических соединений интумесцентного типа [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ogneportal.ru/articles/coatings/1072> (дата обращения 25.12.2023).
13. Терморасширяющийся графит [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.chempack.ru/ru/chemical-raw-materials/grafit-okislenyy-termorasshiryayushchiysya.html> (дата обращения 26.10.2023).
14. Графит окисленный терморасширяющийся [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.chempack.ru/img/doc/Expandable_Graphite.pdf (дата обращения 16.02.2024).

15. Полифосфат Аммония (KYLIN APP201) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nortex-chem.ru/upload/iblock/6a0/6a0bdde7f8cf3a9346e1a2eef527d9e4.pdf?ysclid=lsp2aldmkh709573982> (дата обращения 16.02.2024).
16. ТУ 2422-038-00203803-2014. «Пентаэритрит технический микронизированный. Технические условия».
17. Меламин микронизированный TIAN FU [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.chempack.ru/img/doc/Melamine.pdf> (дата обращения 16.02.2024).

УДК 620.192

Оценка применимости технологических методов повышения срока службы деталей за счет снижения водородного изнашивания

Евгений Сергеевич Горлов, кандидат технических наук,
и.о. заместителя губернатора г. Севастополя, Правительство Севастополя,

Игорь Эдуардович Пашковский, доктор технических наук,
профессор кафедры «Техника и технология»,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

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

В статье приведены результаты теоретических исследований технологических процессов повышения срока службы деталей машин с учетом защиты от водородного изнашивания. Показано, что наибольший интерес для использования на предприятиях машиностроительного комплекса представляют термическое старение и финишная антифрикционная безабразивная обработка.

Повышение срока службы, водородное изнашивание, термическое старение, ФАБО, диффузионно-активный водород.

Assessment of the applicability of technological methods to increase service life of parts by reducing hydrogen wear

Evgeny Sergeevich Gorlov, Candidate of Technical Sciences,
Acting Deputy Governor of Sevastopol Government of Sevastopol,

Igor Eduardovich Pashkovsky, 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 article presents the results of theoretical studies of technological processes for increasing the service life of machine parts, taking into account protection against hydrogen wear. It is shown that thermal aging and finishing anti-friction non-abrasive treatment are of the greatest interest for use at enterprises of the machine-building complex.

Life extension, hydrogen wear, thermal aging, FABO, diffusion-active hydrogen.

Работоспособность исполнительных органов механизмов и машин зависит от множества факторов, таких как выбор метода изготовления, упрочняющей обработки и финишной операции. Особое внимание следует уделять влиянию

финишной операции на создание свойств в поверхностном слое деталей, которые формируют качество, в том числе за счет создания препятствий для проникновения и накопления газовых фракций, способных привести к протеканию процессов водородного изнашивания, охрупчивания и коррозии. Для достижения заданных свойств поверхностных слоев деталей применяются различные технологические и эксплуатационные методы.

Правильный выбор материала и способа получения заготовки является важным шагом перед улучшением свойств и достижением необходимого качества детали. В процессе получения заготовки (литье, штамповка, сварка, высокотемпературная пайка, обработка резанием), формируются свойства материала детали, включая поверхностные слои. Прочностные характеристики, показатели долговечности и качества деталей закладываются во время выполнения всех операций технологического процесса. Все операции изготовления детали направлены на улучшение свойств материала заготовки, включая достижение показателей качества на этапе эксплуатации. Одним из основных показателей является износостойкость, в том числе стойкость против водородного изнашивания. Для обеспечения блокирования открытых пор и устьев микротрещин, являющихся зародышами очагов водородного изнашивания, можно использовать различные покрытия и технологические методы, которые изменяют структуру материалов.

Работы [2, 4, 5, 6] детально изучают влияние технологических методов механической обработки на износостойкость деталей. В настоящее время существуют различные технологические методы, которые позволяют модифицировать поверхности деталей. Эти методы включают изменение строения и свойств поверхностей, нанесение покрытий, термическую и химико-термическую обработку, ионную имплантацию и другие виды обработки. Целью таких методов является придание поверхностям деталей комплекса характеристик, которые обычно возникают к концу периода приработки. Это позволяет трущейся паре сразу же войти в период нормального износа, минуя или значительно сокращая период приработки. В результате узел становится более долговечным и надежным.

Различные параметры функциональных характеристик обработанных поверхностей, а также показатели их качества, существенно влияют на износостойкость и трибологические свойства [1, 2, 4]. Для обеспечения нормального функционирования деталей, поверхности которых обработаны, необходимо соблюдать правило градиента механических свойств, согласно которому прочность на сдвиг должна возрастать при удалении от поверхности вглубь тела детали [1].

Поверхностная область детали подвергается влиянию внутренних напряжений, которые играют важную роль в ее усталостной прочности, способности аккумулировать диффузионно-активный водород и других аспектах. Увеличение усталостной прочности может быть достигнуто созданием сжимающих внутренних напряжений в поверхностном слое, например, при азотировании. Однако, нанесение гальванических покрытий на деталь может привести к возникновению растягивающих внутренних напряжений, что приведет к снижению усталостной прочности и увеличению проникновения водорода в тело детали. Коэффициент трения и абразивный износ изменяются в зависимости от условий окружающей среды, отражая трибологические свойства материала.

Основываясь на ряде работ [1-7], были проанализированы современные технологии, которые широко применяются для повышения износостойкости деталей и создания слоев с определенными свойствами и характеристиками.

Анализ научно-технической литературы и реальных производственных процессов, используемых машиностроительными предприятиями, показал, что на современном этапе используется более 140 различных технологий, позволяющих увеличить жизненный цикл узлов трения машин и механизмов. Как правило, использование различных технологий обработки осуществляется комплексно, в сочетании нескольких методов. Хорошие результаты, например, могут быть получены при сочетании механического и термического упрочнения, при нанесении различного рода покрытий на термически обработанные рабочие поверхности деталей.

Методы упрочнения поверхностей имеют различные варианты, такие как пламенная, индукционная, импульсная и лазерная закалка. В зависимости от материала, который нужно упрочнить, температура процесса может варьироваться. Например, при работе со сталями происходит образование структуры мартенсита, особенно богатого внутренними напряжениями. Это приводит к снижению абразивного и других видов износа и повышению усталостной прочности. Однако, в процессе обработки может происходить деструкция рабочей среды, что приводит к значительному наводороживанию структуры. Большое количество внутренних напряжений и плотность несовершенств делают сталь способной поглощать водород в процессе эксплуатации. Однако, при использовании лазерной закалки наблюдается меньшее наводороживание и способность к поглощению водорода поверхностью.

С целью уменьшения внутренних напряжений, полученных при закалке, применяются отпуск и термическое старение. Для снижения абразивного износа и повышения усталостной прочности используют низкотемпературный отпуск, проводимый при температуре до 250 °С, чтобы сохранить максимальную твердость материала. В результате этого процесса образуется структура, состоящая из мартенсита отпуска и остаточного аустенита, а также остаточных внутренних напряжений. Вместе с этим, происходит снижение концентрации водорода в металле на 20%, но материал не выполняет защитную функцию от наводороживания.

При температуре $T = 150-180^{\circ}\text{C}$ проводится термическое старение, в результате которого образуется мартенсит отпуска + ε -карбиды + аустенит остаточный. В этом процессе также наблюдаются остаточные внутренние напряжения. Это приводит к повышению показателей длительной прочности при циклическом нагружении (усталостной прочности) и снижению вероятности коробления деталей во время эксплуатации. Однако, несмотря на это, концентрация водорода в металле снижается только на 40%, и он не выполняет своей защитной функции от наводороживания. Одним из существенных недостатков этого процесса является его длительность [2, 4].

Для улучшения противозадирной стойкости и поверхностной твердости применяется химико-термическая обработка. Она может включать такие процессы, как цементация, азотирование, карбоазотирование, нитрокарбидизация, циа-

нирование, борирование и диффузионная металлизация. Температура обработки может варьироваться от $T \leq 600$ °C до $T = 950-1300$ °C. В результате обработки образуются различные соединения, такие как Fe_2B , а также соединения с диффузионным слоем, такие как $\text{Fe}_x + \text{N}$.

В результате, на этапе эксплуатации, все виды термической и химико-термической обработки приводят к значительному наводороживанию материала [7] и вызывают большое количество внутренних напряжений. Это способствует поглощению диффузионно-активного водорода.

Методы, основанные на поверхностном пластическом деформировании (ППД), демонстрируют отличные результаты в улучшении механических свойств.

Упрочнение пластическим деформированием проводится при комнатной температуре, однако в процессе обработки наблюдается повышение температуры обрабатываемой детали из-за течения металла в результате пластической деформации. Процесс характеризуется образованием высокой плотности дислокаций и остаточных внутренних напряжений сжатия. Целью этих процессов является снижение приработочного износа и повышение усталостной прочности.

Вследствие разрушения рабочей среды происходит наводороживание поверхностных слоев металла детали, что приводит к образованию высокой плотности дислокаций и напряженности металла. Это в свою очередь обуславливает высокую способность детали к поглощению диффузионно-активного водорода. При упрочнении ППД в металлоплакирующих средах режимы обработки остаются неизменными, однако на поверхности детали образуется защитная пленка из металла, содержащегося в среде. В процессе обработки происходит увеличение концентрации водорода в 2,7 раза, а во время эксплуатации – снижение в 1,7 раза [4].

Для повышения износостойкости деталей широко применяются электролитическое хромирование, осталивание и железнение. Перспективным способом упрочнения поверхностей следует считать электролитическое осаждение вольфрамowych сплавов, а также комбинированных осадков хрома с карбидами, боридами и т.п. С целью повышения противоизносных свойств и снижения коэффициента трения на рабочие поверхности осаждают медь, свинец, олово, серебро, кадмий [6]. С помощью электролитических покрытий можно регулировать широкий спектр свойств поверхностных слоев деталей машин.

Однако при осуществлении электролитического осаждения покрытий происходит сильное наводороживание материала подложки (основного металла) и его водородное охрупчивание [2, 4]. При этом покрытия, как правило, имеют пористую структуру и не могут являться барьером для проникновения диффузионно-активного водорода.

Кроме того, в наносимом покрытии возникают напряжения растяжения, в результате чего могут образоваться микротрещины, являющиеся, в свою очередь, концентраторами напряжений. Покрытия, получаемые гальваническими методами, обладают плохой сцепляемостью с основным металлом и под действием эксплуатационных факторов могут отслаиваться. Главной причиной плохой адгезии покрытия с подложкой и последующего разрушения покрытия является присут-

ствие технологического водорода в покрытии и прилегающем к нему слое основного металла [4].

Для повышения износостойкости деталей машин, производят наплавку износостойкими сплавами: стеллитом, вокаром, сормайтом и др. Наплавку применяют для получения многофазных структур с карбидами. Целью является снижение абразивного износа и уменьшение коррозии. Температура процесса переменная – от 600 °С (предварительный нагрев) до температуры плавления (в приповерхностных зонах). В процессе обработки происходит наводороживание вследствие деструкции рабочей среды. Высокая плотность дислокаций и напряженность металла обуславливают высокую способность к поглощению диффузионно-активного водорода. При наплавке не исключено наличие в наплавленном металле различных структурных дефектов, из-за чего резко снижается предел выносливости.

Лазерное легирование применяют относительно недавно. Этот вид технологической обработки позволяет создать упорядоченную структуру поверхностных слоев, легированный поверхностный слой, защитное покрытие на поверхности. Температура процесса – создаваемая технологическим оборудованием (лазером). Для обработанных деталей наблюдается снижение диффузии водорода в поверхностные слои металлической детали за счет снижения несовершенств структуры и образованного защитного покрытия [4].

Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) достаточно широко внедрена и продолжает внедряться машиностроительным комплексом целого ряда стран. Имеет множество подвидов. Наиболее перспективным, по мнению авторов, является метод ФАБО в металлоплакирующих средах. Обработка осуществляется при комнатной температуре. Здесь одновременно протекает несколько процессов, некоторые из которых являются конкурирующими. Так, например, упрочнение (за счет ППД) и разупрочнение (за счет воздействия поверхностно-активных веществ в составе рабочей среды), что благоприятно сказывается на конечном результате – исключается возможность перенаклепа обрабатываемой поверхности. Образованная защитная пленка приводит к снижению износа, в том числе приработочного, снижению коэффициента трения (при использовании в составе металлоплакирующей среды определенных химических соединений, например, фторидов). При обработке происходит увеличение концентрации водорода в 3,8 раза, но зафиксировано уменьшение содержания водорода при эксплуатации на 10% [2, 4].

Выбор способа обработки поверхности зависит от программы производства или ремонта изделий, условий их эксплуатации и экономической целесообразности.

Некоторые из технологий, например, ионная имплантация, физическое и химическое осаждение из газовой фазы, лазерная обработка довольно дороги, предусматривают применение сложного оборудования и поэтому целесообразность их применения для конкретных машиностроительных заводов требует дополнительных исследований.

Практически все виды технологий, направленные на улучшение эксплуатационных характеристик, могут иметь и ряд недостатков. Так, поверхностная пластическая деформация повышает износостойкость пары трения только в на-

чальный период эксплуатации [4]. Но при абразивном изнашивании положительного эффекта от упрочнения поверхностей практически не наблюдается. Кроме того упрочненные поверхности имеют низкое сопротивление к выкрашиванию [1]. Химико-термические обработки могут приводить к изменению размеров детали и короблению.

При металлизации напылением образованный слой является пористым, что дает возможность проникновению в него газов, в том числе, диффузионно-активного водорода, имеет пониженную прочность и повышенную хрупкость. Использование таких покрытий в средне- и тяжелонагруженных узлах трения может приводить к заеданию и схватыванию.

Высокотемпературные химико-термические обработки, связанные с насыщением поверхностных слоев деталей кремнием, сульфид-ионами и фосфатами могут приводить к значительному технологическому наводороживанию поверхностных слоев.

К настоящему времени разработаны относительно простые и экономичные технологии завершающей обработки деталей, которые позволяют уменьшить приработочный износ, улучшить эксплуатационные свойства деталей и значительно снизить водородное изнашивание. В основном эти методы связаны с реализацией эффекта избирательного переноса. Работа деталей в режиме избирательного переноса связана с образованием на рабочих поверхностях деталей сервовитной пленки из пластичного металла. В зависимости от конкретных условий эксплуатации сервовитная пленка формируется либо в результате избирательного растворения легирующих элементов сплава и переноса пластичного металла на контртело, либо вследствие выделения этого металла на ювенильных поверхностях из металлоплакирующего смазочного материала. Для продления срока службы такой смазочной композиции и создания в период приработки деталей условий трения, близких к режиму избирательного переноса, можно применять фрикционные методы нанесения покрытий или ФАБО.

Одним из эффективных технологических способов повышения износо- и задиростойкости пар трения, изготовленных из сталей и чугунов, является предварительное фрикционное латунирование, бронзирование и меднение или ФВБО деталей. Также эффективным оказалось применение металлоплакирующих материалов (смазочных и конструкционных) и других методов, позволяющих защитить детали от водородного изнашивания.

Для подтверждения ранее сделанных выводов о влиянии различных технологических обработок на наводороживание стальных изделий были проведены экспериментальные исследования с использованием методов, разработанных при участии авторов [4].

Для изучения наводороживания стали 45 в процессе обработки были взяты образцы материала из одной партии с последовательно взятых операций технологического процесса. В соответствии с маршрутной технологией завода-изготовителя поверхность вала, сопрягаемая с уплотнительными элементами, подвергается черновому и чистовому обтачиванию, термической обработке на твердость 50-54 HRC и однократному шлифованию. При этом исследовалось общее содержание водорода в стали и концентрация его диффузионно-активной

составляющей. Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Объемное содержание водорода в стали 45 в зависимости от технологических обработок

Вид обработки согласно технологическому процессу изготовления вала	Концентрация водорода в образце $C_{H_2} \times 10^{-8}, \text{м}^3/\text{кг}$	
	Диффузионно-активная составляющая	Общее содержание
Материал в состоянии поставки	15	651
Черновое обтачивание вала	31	1823
Чистовое обтачивание вала	33	1856
Закалка на твердость HRC 58-60	102	4323
Отпуск на твердость HRC 50-54	88	2728
Однократное шлифование вала	94	1844
Эксплуатация вала в паре с пластмассовым уплотнением	343	2219
Эксплуатация вала в паре с резиновым уплотнением	518	2389

Из результатов эксперимента видно, что материал в состоянии поставки имеет некоторое количество водорода, приобретенного на этапах выплавки и прокатки стали. Токарные обработки с применением смазочно-охлаждающих жидкостей способствуют наводороживанию, повышая концентрацию диффузионно-активного водорода в 2,1-2,2 раза, а общее содержание – в 2,8 раза. В данном случае источником наводороживания являются водородсодержащие соединения эмульсии и вода, деструкция которых, активируемая процессом резания и высокой температурой в зоне обработки, ведет к образованию диффузионно-активного водорода, захватываемого металлом. Большая часть поглощенного сталью водорода, вступая во взаимодействие с химическими элементами, образует химические соединения и твердые растворы.

Из экспериментальных данных видно, что значительное наводороживание стали происходит при закалке. Повышению концентрации водорода при этом содействует влага воздуха при высокотемпературном нагреве стали, а также диффузионно-активный водород, образовавшийся при деструкции технологической охлаждающей среды. Это совпадает с результатами исследований и выводами других исследователей [3]. Часть водорода, взаимодействуя с аустенитом при охлаждении от температур закалки, образует твердые растворы и химические соединения, повышая общее содержание водорода до $4,323 \times 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$.

Кроме непосредственного насыщения металла водородом, на этапе термической обработки многократно возрастает количество несовершенств структуры. Высокие температуры, диффузионные процессы, протекающие при термической обработке, оплавление поверхности и другие физико-химические процессы приводят к резкому изменению структурно-фазового состава поверхностного слоя и появлению структурных концентраторов напряжений, которые интенсивно влияют на поглощение диффузионно-активного водорода.

Обезводороживанию способствует проведение отпуска. При этом значительно (в 1,6 раза) сокращается общее содержание водорода, что связано со структурными преобразованиями в стали, например, при переходе мартенсита заковки в мартенсит отпуска с выделением из его кристаллической решетки углерода и примесных атомов. Концентрация диффузионно-активного водорода уменьшается незначительно – в 1,15 раза, что связано с малой продолжительностью обработки. Для удаления большего количества диффузионно-активного водорода из стали необходима длительная выдержка при температуре нагрева (температуре отпуска).

Однако, с точки зрения обезводороживания, низкотемпературный отпуск малоэффективен, поскольку последующая обработка стали приводит к увеличению концентрации в ней диффузионно-активного водорода в 1,1 раза, а эксплуатация – в 3,6-5,5 раза.

Это связано с обратной диффузией водорода и концентрацией его в ранее образованных дефектах структуры. На этапе последующих обработок и эксплуатации объем диффузионно-активного водорода возрастает, что приводит к дальнейшему росту дефектов. Эти выводы согласуются с результатами работ [3, 7], авторы которых показали, что водород обратимым образом захватывается малыми порами, а пористость обуславливается режимами термической обработки и не уменьшается при последующей обработке поверхностей деталей. Как видно из экспериментальных данных, этот вывод справедлив также и для этапа эксплуатации.

Следует отметить, что при шлифовании увеличивается концентрация диффузионно-активного водорода, а его общее содержание уменьшается в 1,5 раза. Это говорит о том, что водород по глубине образца распределен неравномерно, а большая часть соединений водорода локализуется в поверхностном слое детали и частично удаляется в процессе шлифования, а частично перераспределяется по объему образца. Последующая эксплуатация вала в контакте с уплотнительными элементами приводит к увеличению общего содержания водорода в стали. Анализ экспериментальных данных показывает, что повышение содержания водорода на этапе эксплуатации происходит, в основном, за счет его диффузионно-активной составляющей.

Веским доказательством триботехнического наводороживания стальных поверхностей служат результаты исследований проведенных совместно с В.М. Юдиным и М.Е. Ставровским [8]. Испытания проводились на приборе для триботехнических испытаний и комплексе для исследования локального распределения водорода в образцах по методике, разработанной при участии одного из авторов [4], [8]. Испытания проводились на образцах из стали 45, обработанных по заводской технологии изготовления вала подшипниковой опоры технологической машины, в которой заключительной операцией было однократное шлифование. В качестве контрольного образца использовалась колодка, изготовленная из композиционного полимерного материала. Результаты испытаний представлены на рисунке 1.

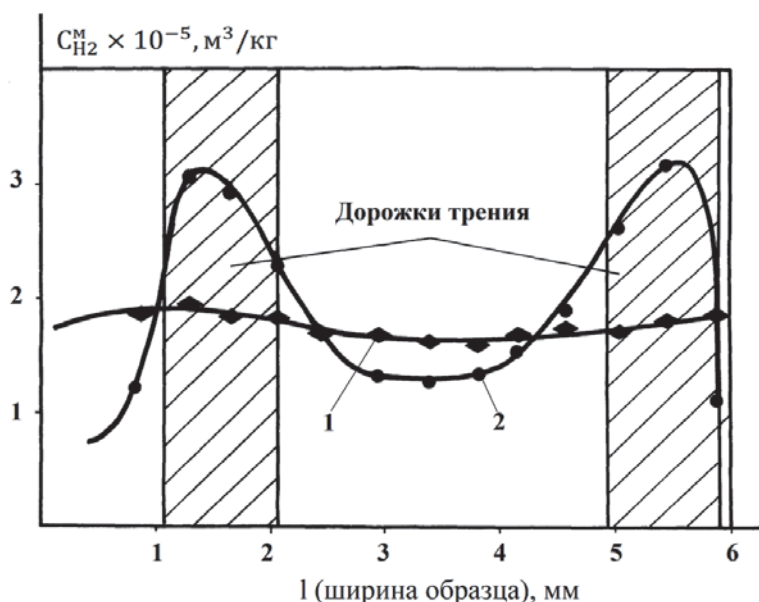


Рисунок 1 – Распределение водорода в поверхностном слое образца:
1 – до проведения испытаний;
2 – по окончании триботехнических испытаний

Условиями проведения эксперимента был смоделирован реальный уплотнительный узел подшипниковой опоры, работающий в условиях осуществления процессов водородного изнашивания. В данной модели наблюдаются все условия и признаки, характерные для таких процессов. Контактирующие поверхности подвергаются значительным фазово-структурным изменениям из-за действия механических и термических напряжений

В зоне между дорожками трения поверхность образца испытывает растягивающие напряжения. Разность значений температур и напряжений приводит к перемещению зон локализации водорода как в приповерхностных слоях, так и на поверхности образца.

Для определения прочностных характеристик материалов требовалось выяснить, как водород перераспределяется, как быстро он перемещается и насколько равномерна его концентрация. Исследование распределения водорода в поверхностных слоях исходного образца, взятого на глубине 300 мкм, показало, что даже при наличии различных факторов, влияющих на распределение водорода в образце, его концентрация достаточно равномерна. Это, видимо, объясняется однородностью структуры (перлит + феррит) и проведением шлифования. На дорожках трения равномерность распределения водорода при той же глубине отбора проб 300 мкм для серии опытов характеризуется ярко выраженной неравномерностью (рис. 1), которая говорит о триботехническом источнике наводороживания и о том, что материал обладает большим количеством структурных несовершенств, способных аккумулировать образованный при фрикционном

взаимодействии диффузионно-активный водород. Вылеживание образца в течение 24 часов после окончания испытаний позволяет, в силу стремления структурно-фазовой металлической системы к равновесному состоянию, а также из-за остывания образца и исчезновения максимума температуры, перераспределиться водороду по объему образца и приблизиться к первоначальному распределению.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что практически все технологические обработки приводят к наводороживанию поверхностного слоя материала деталей, включая и завершающую операцию – шлифование, при проведении которой общее содержание водорода в стали снижается до 3,6 раза, а концентрация его диффузионно-активной составляющей увеличивается до 1,2 раза, что связано с удалением поверхностного слоя металла, содержащего большое количество водородных соединений, часть из которых распадается с образованием диффузионно-активного водорода.

Проведенный анализ дает возможность сделать вывод, что все рассмотренные технологические методы обладают положительными и отрицательными сторонами. Наибольший интерес вызывают методы, позволяющие снизить концентрацию диффузионно-активного водорода, например, термическое старение, и позволяющие защитить деталь от проникновения водорода в поверхностные слои за счет несовершенства структуры, например, ФАБО.

Литература

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность): Учебник. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство МСХА, 2001. 616 с.
2. Горлов Е.С. Исследование и реализация особенностей технологической наследственности на этапах создания и эксплуатации бытовых машин: Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. М.: Совет Д.212.150.05. 2007. 140 с.
3. Матюшенко В.Я., Андрейчик М.А. Некоторые аспекты технологического наводороживания металлов и его влияние на износостойкость. В кн.: Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение, 1986. вып. 1. С. 191-195.
4. Пашковский И.Э. Теоретические и прикладные основы технологического обеспечения защиты от наводороживания поверхностных слоев деталей бытовых машин: Диссертация на соискание ученой степени д.т.н. М.: Совет Д.212.150.05. 2005. 460 с.
5. Повышение долговечности машин технологическими методами / Под ред. Г.Э. Таурита. Киев: Техника, 1986. 158 с.
6. Рыжов Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. Киев: Наукова думка, 1984. 271 с.
7. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. М.: Машиностроение, 1987. 108 с.
8. Юдин В.М. Трибохимические исследования процессов диагностики и сервиса технологического оборудования: Диссертация на соискание ученой степени д.т.н. М.: Совет Д.212.150.05. 2004. 455 с.

УДК 621.794

Технологические особенности изготовления отливок из стали 35ХГСЛ и методы воздействия на процесс кристаллизации

Максим Леонидович Скрябин, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Материаловедения, сопротивления материалов
и деталей машин»,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Вятский государственный агротехнологический
университет, г. Киров, Кировская область

Одной из главных задач современного тяжелого машиностроения является повышение требований к качеству литых заготовок, что делает актуальной задачу поиска новых способов активного воздействия на процесс кристаллизации металла. Большинство крупных фасонных стальных отливок изготавливают из обычных и легированных углеродистых сталей, обладающих сравнительно хорошими литейными и механическими свойствами. В представленной работе рассмотрены технологические особенности изготовления отливок из стали 35ХГСЛ и методы воздействия на процесс кристаллизации. Также рассмотрена оптимальная концентрация углерода, в зависимости от массогабаритных параметров отливки. Проведен анализ микроструктуры стали после отжига и нормализации. Рассмотрен механизм образования микро и макро трещин в процессе кристаллизации.

Стальные отливки, процесс кристаллизации, микроструктура, сталь 35ХГСЛ.

Technological features of the manufacture of castings from 35HGSL steel and methods of influence on the crystallization process

Maxim Leonidovich Scriabin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials Science, Resistance of Materials and Machine Parts, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Vyatka State Agrotechnological University, Kirov, Kirov region

One of the main tasks of modern heavy engineering is to increase the requirements for the quality of cast blanks, which makes it urgent to find new ways to actively influence the metal crystallization process. Most large shaped steel castings are made from ordinary and alloyed carbon steels with relatively good casting and mechanical properties. In the presented work, the technological features of the manufacture of castings from 35HGSL steel and methods of influencing the crystallization process are considered. The optimal carbon concentration is also considered, depending on the weight and size parameters of the casting. The microstructure of steel after annealing and normalization was analyzed. The mechanism of formation of micro and macro cracks in the crystallization process is considered.

Steel castings, crystallization process, microstructure, steel 35HGS.

В современном машиностроении повышение требования к качеству заготовок делает актуальной задачу поиска новых способов активного воздействия на процесс кристаллизации металла. В течение всей истории изготовления отливок прослеживается тенденция, состоящая в разработке новых и усовершенствовании существующих способов воздействия на процесс кристаллизации металла.

Наибольшее количество крупных фасонных стальных отливок изготавливают из обычных и легированных углеродистых сталей, обладающих сравнительно хорошими литейными и механическими свойствами. Изменение содержания углерода в составе стали значительно влияет на механические свойства отливок. Это связано с тем, что при повышении содержания углерода увеличивается количество карбидов, которые в зависимости от формы и расположения в той или иной степени снижают упругость стали [8, С.231].

С повышением содержания углерода в отливках прочность на растяжение увеличивается, а относительное удлинение уменьшается [1, С.130]. Кроме того, повышение содержания углерода увеличивает предел текучести менее интенсивно, чем прочность. При повышении содержания углерода свыше 0,40...0,45% предел текучести не увеличивается независимо от того, что прочность на растяжение продолжает повышаться. Пластичность стали резко уменьшается, а твердость увеличивается, что связано с ухудшением обрабатываемости стальных отливок [2, С.96].

Поэтому на практике при производстве стальных отливок из углеродистой стали верхний предел содержания углерода 0,40...0,45%, а в целом, количество углерода в литейных сталях составляет 0,30...0,35%.

Стоит отметить, что увеличение концентрации углерода расширяет интервал кристаллизации и изменяет температуру плавления. Таким образом, жидкотекучесть углеродистой стали улучшается [3, С.123]. Так как ее улучшение особенно важно при содержании углерода около 0,30...0,35% при литье тонкостенных деталей, желательно, чтобы нижний предел содержания углерода составлял около 0,3%.

Вместе с тем отметим, что с повышением содержания углерода увеличивается и объем усадочных раковин в отливках из-за большой усадки в процессе кристаллизации. Обычно на практике при выборе содержания углерода в стали не принимают во внимание его влияние на размеры прибылей и усадочных раковин в отливках [4, С.120].

Так, литейные напряжения находятся в прямой зависимости от содержания углерода. Следовательно, при разработке технологии изготовления деталей, которые из-за своей конструкции склонны к образованию трещин, необходимо выбирать сталь с более низким содержанием углерода.

Повышенное содержание углерода, позволяющее в течение продолжительного времени сохранять температуру разливки, уменьшает опасность образования газовых и неметаллических включений в отливках. Следовательно, для отливок с большой поверхностью и небольшой приведенной толщиной надо выбирать сталь со сравнительно высоким содержанием углерода. Высокое содер-

жание углерода, приводя к снижению температуры разливки и уменьшению количества окисидных пленок на поверхности жидкой стали, уменьшает пригар на отливках.

Самой вредной примесью в углеродистых сталях при литье фасонных отливок является сера. Она вызывает так называемую красноломкость при содержании 0,01...0,02% S, образование горячих трещин и ухудшает механические свойства отливок. Только связывая серу с сульфидами (MnS, CaS и т.д.), можно создать условия для получения отливок без указанных дефектов [5, С.307].

При содержании в углеродистой стали до 0,7...0,8% Mn наличие до 0,05% S не является причиной образования горячих трещин.

Для тонкостенных отливок и для отливок со сложной конфигурацией и резкими переходами от толстых сечений к тонким рекомендуется максимальное содержание серы (0,03%). При этом содержание марганца можно уменьшить до 0,6%.

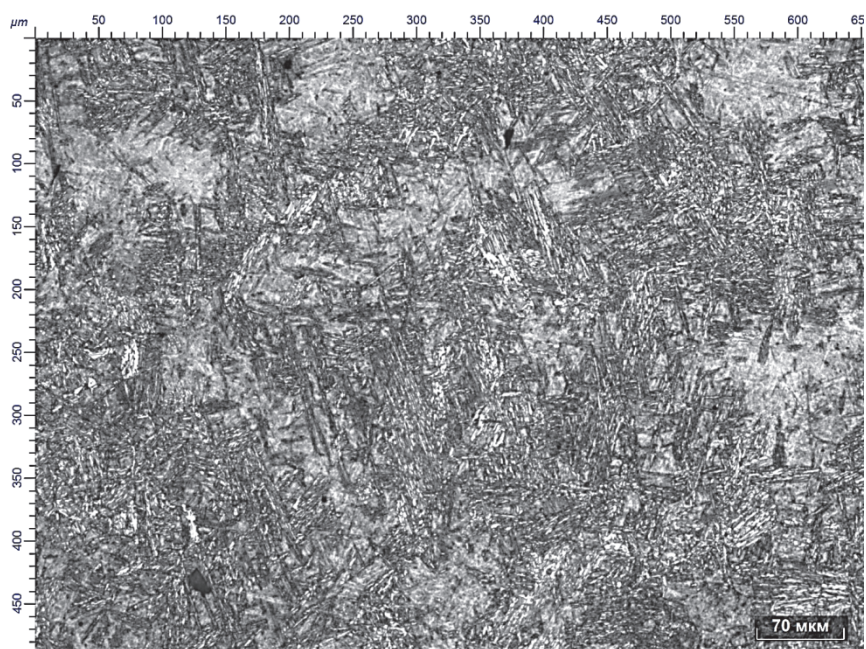
Присутствие фосфора в составе углеродистых сталей приводит к так называемой хладноломкости, к образованию холодных трещин и резкому снижению пластических свойств. Это связано с наличием хрупкого твердого раствора фосфора в железе и фосфидов железа, расположенных по границе зерен.

Неравномерная структура стали 35ХГСЛ стали и наличие в ней литейных напряжений требуют ее термообработки. В большинстве случаев цель этой обработки – получение равномерной структуры и уменьшение внутренних напряжений. На практике этого добиваются отжигом или гомогенизацией [6, С.61].

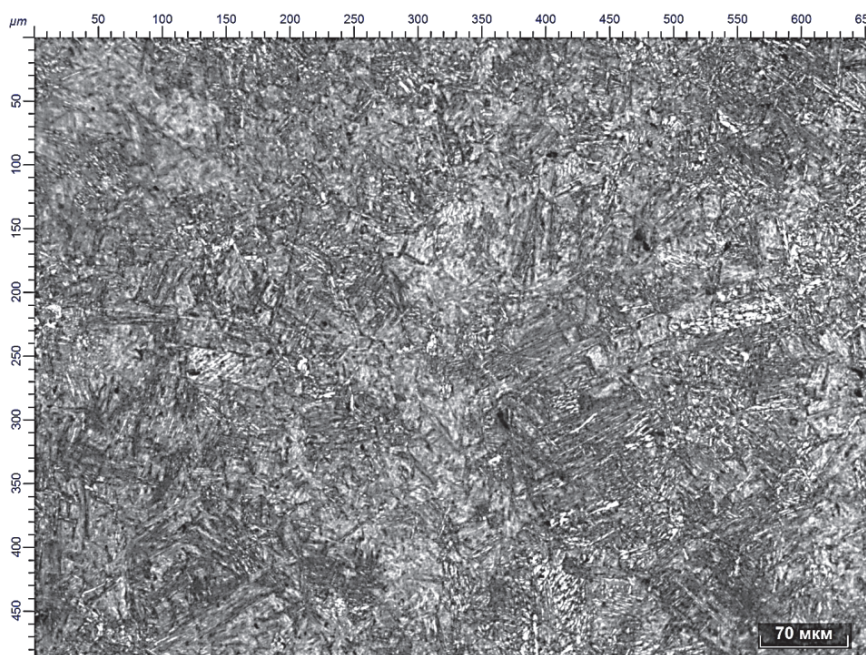
При исследовании стали 35ХГСЛ предварительная термическая обработка различных плавок была выполнена двумя путями. Несколько плавок были подвержены нормализации, остальные по серийной технологии – отжигу (микроструктура стали приведена на рисунке 1). Для лучшего снижения твердости после отжига образцы охлаждались до комнатной температуры вместе с печью. Нормализация проводилась для измельчения зерна (микроструктура стали приведена на рисунке 2).

После проведения предварительной термической обработки не заметна разница между микроструктурами и твердостью в зависимости от времени выдержки гомогенизации. Но заметно, что образцы, на которых предварительной термической обработки являлся отжиг, твердость значительно понизилась, по сравнению с образцами после нормализации.

В отливках из углеродистых сталей, легированных хромом, марганцем и кремнием, вследствие более высокой теплопроводности по сравнению кристаллизация протекает в широкой двухфазной зоне с медленным ростом поверхностного слоя. Температура поверхности этого слоя близка к температуре солидуса, поэтому он не обладает высокой прочностью. Вследствие небольшой разницы температурного градиента термические напряжения в этом случае незначительны, а горячие трещины образуются исключительно за счет напряжений усадки [7, С.162].

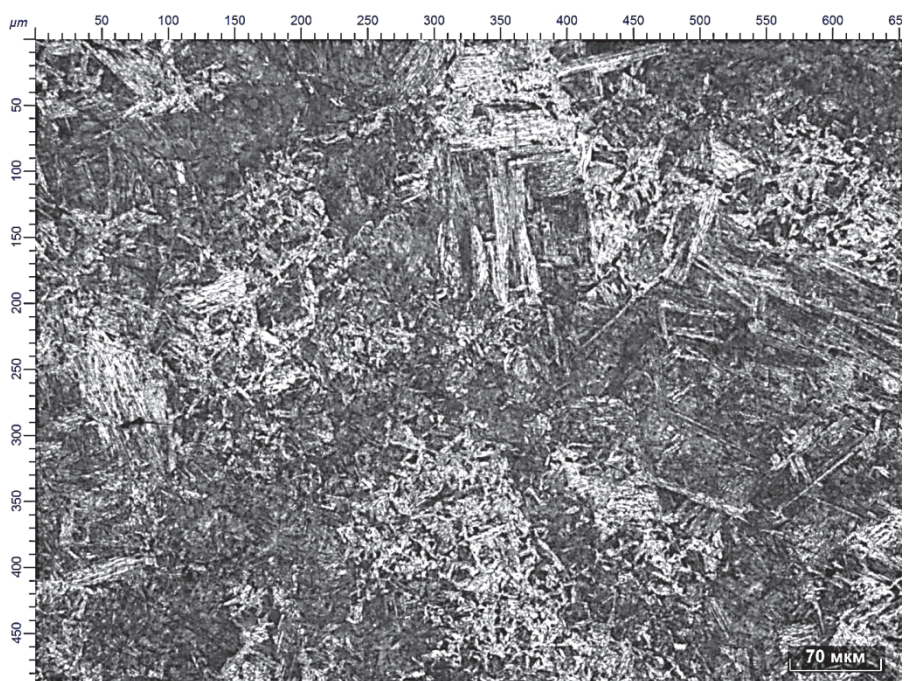


а)

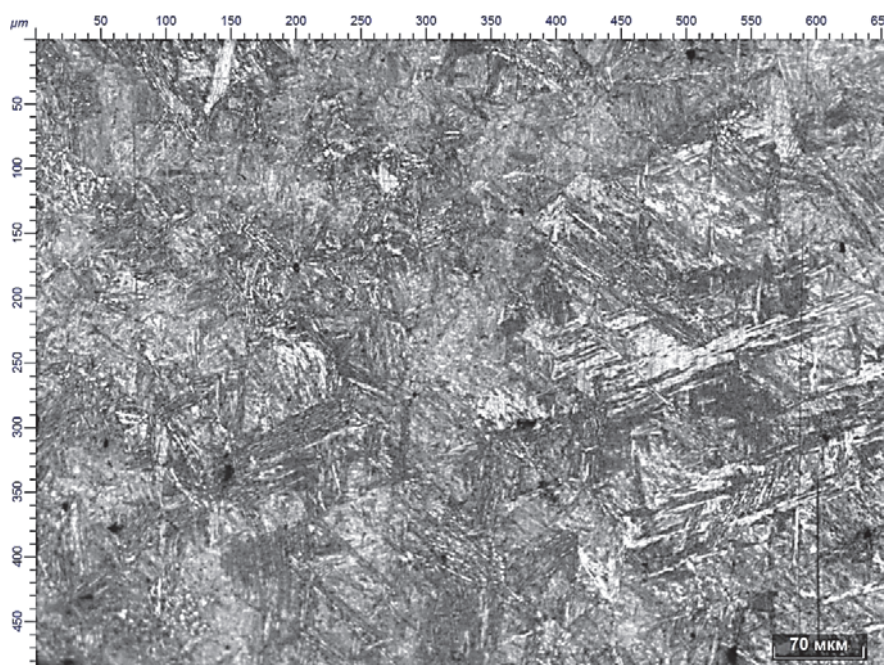


б)

Рисунок 1 – Микроструктуры отдельно отлитых образцов стали 35ХГСЛ после отжига: а) плавка № 11; б) плавка № 14



а)



б)

Рисунок 2 – Микроструктуры отдельно отлитых образцов стали 35ХГСЛ после гомогенизации: а) плавка № 16; б) плавка № 18

Установлено, что в отливках из сталей 35ХГСЛ трещины возникают в сравнительно широком температурном интервале. При этом трещины, образующиеся на внутреннем поверхностном слое, могут быть залечены жидким металлом из внутренних зон отливки. Когда из-за недостаточного питания отливки жидким металлом такое залечивание невозможно, несколько микротрещин сливаются в макротрещину, образуя четко выраженную трещину. В 35ХГСЛ такие трещины возникают при температуре около 1523 К. Эти трещины сначала разрушают внутреннюю зону отливки, а потом и поверхностный ее слой.

Трещины в фасонных отливках больших размеров из стали 35ХГСЛ можно устранить снижением сопротивления литейной формы при усадке стали за счет увеличения податливости формовочной смеси. В течение так называемого критического интервала образования трещин залитые формы нельзя перемещать.

Значительный объем в производстве отливок из сталей занимают отливки сравнительно большой массы. Известно, что массивные стальные отливки охлаждаются до температуры выбивки обычно в течение нескольких десятков часов.

В настоящее время большое внимание уделяют интенсификации технологического процесса литья за счет искусственного охлаждения формы. Искусственное охлаждение формы не только значительно сокращает время охлаждения отливки до ее выбивки, но и позволяет регулировать скорость охлаждения отдельных ее частей.

Отметим, что массовое производство стальных отливок в формах с искусственным охлаждением невозможно без тщательного исследования этого процесса. Обобщение теоретических и экспериментальных данных позволяет рассчитать режимы охлаждения сложных стальных отливок таким образом, чтобы охлаждение формы было равномерным и с максимальной скоростью.

На практике для фасонных отливок применяют следующие методы интенсификации процесса затвердевания посредством искусственного охлаждения формы: продувание воздухом внешней поверхности литейной формы и полых элементов, смонтированных внутри нее, принудительная фильтрация воздуха через формовочную смесь, охлаждение водой и др. Кроме того, скорость затвердевания различных частей отливки регулируют установкой в ее массивных частях полых элементов и циркуляцией в них охлажденной воды.

Рассматривая влияние некоторых технологических факторов на интенсификацию процесса охлаждения отливок можно отметить, что в начальный период затвердевания на скорость охлаждения решающее влияние оказывает теплота кристаллизации. При дальнейшем охлаждении скорость затвердевания стальной отливки зависит от ее удельного объемного теплосодержания.

Теплофизические свойства формы, которые существенно влияют на скорость охлаждения отливки, зависят от состава формовочной смеси. Например, введением в смесь различных наполнителей можно в несколько раз изменить скорость кристаллизации стального расплава и дальнейшего его охлаждения.

Толщина формовочной смеси (от опоки до отливки) также влияет на процесс охлаждения. Уменьшение толщины формовочной смеси в значительной степени повышает эффективность охлаждения формы на воздухе в результате

снижения ее термического сопротивления. Время выдержки стальной отливки в форме до заданной температуры значительно уменьшается. Чем ниже температура выбивки отливки, тем значительнее влияние искусственного охлаждения при больших толщинах слоя формовочной смеси [8, С.139].

Следовательно, изменяя толщину формовочной смеси, можно в несколько раз изменить продолжительность охлаждения стальной отливки до заданной температуры ее выбивки. Если по технологическим причинам применение достаточно гонкого слоя формовочной смеси невозможно или затруднительно, аналогичное влияние на процесс охлаждения оказывают смеси с высокой теплопроводностью.

Следует отметить, что толщина стенки опоки незначительно влияет на процесс охлаждения стальной отливки. Это объясняется тем, что термическое сопротивление слоя формовочной смеси приблизительно в 80 раз больше термического сопротивления стальной опоки той же толщины. Вот почему скорость охлаждения отливки зависит, прежде всего, от толщины формовочной смеси между отливкой и опокой [8, С.240].

Составные части отливки сложной конфигурации имеют разную массу. Вследствие неравномерного охлаждения составных частей сложной отливки в обычной форме возникает большая разница температур в ее сечениях, в результате чего появляются термические напряжения, трещины, изгибы отливки и т.д.

С помощью принудительного охлаждения формы можно изменять скорость охлаждения различных частей сложной отливки. При этом можно не только сокращать продолжительность охлаждения до температуры выбивки, но и регулировать скорость охлаждения отдельных ее частей таким образом, чтобы исключить указанную разницу температур.

Зная влияние различных факторов на процесс охлаждения отливки, можно выбрать оптимальные параметры формы для каждого конкретного случая, а, следовательно, интенсифицировать процесс охлаждения и создать условия для равномерного охлаждения отливки.

Литература

1. Гаранин В.Ф., Иванов В.Н., Казеннов С.А. Литье по выплавляемым моделям. М.: Машиностроение, 1994. 448 с.
2. Герасимова Л.П., Ершов А.А. Изломы конструкционных сталей. М: Металлургия, 1987. 272 с.
3. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов. Т. 1: Физические методы исследования металлов: Справочное пособие / под ред. А.Т. Туманова. М.: Машиностроение, 1971. 552 с.
4. Новоклещева С.М., Виноград М.И. Дефекты стали. М: Металлургия, 1984. 199 с.
5. Скрыбин М.Л. Исследование камневидного излома литой стали у сельскохозяйственных машин // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. Кокино. 2019. № 1(18). С. 304-310.

6. Скрябин М.Л., Чупраков А.И. Исследование камневидного излома стали 35ХГСЛ при электродуговой выплавке // Информационно-технологический вестник. 2019. № 3(121). С. 55-64.
7. Скрябин М.Л., Чухлова С.С. Исследование влияния тонких нитридных пленок алюминия на камневидный излом литой стали // Информационно-технологический вестник. 2018. № 3(17). С. 158-166.
8. Чернышов Е. А., Евстигнеев А.И., Евлампиев А.А. Литейные дефекты. Причины образования. Способы предупреждения и исправления: Учебное пособие. М.: Машиностроение, 2008. 282 с.

УДК 621.438:62-253.5:532.5.031

**Расчет напряжений на лопасти в потоке среды методом
комплексного потенциала**

Михаил Евгеньевич Соловьев, доктор физико-математических наук,
профессор кафедры Информационные системы и технологии,
Институт цифровых систем,
Ярославский государственный технический университет, г. Ярославль,
Сергей Сергеевич Кокарев, кандидат физико-математических наук,
директор регионального научно-образовательного центра «Логос», г. Ярославль,
Сергей Львович Балдаев, кандидат технических наук,
заместитель генерального директора по технологиям,
Лев Христофорович Балдаев, доктор технических наук, генеральный директор,
Мария Олеговна Федорова, начальник отдела,
ООО «Технологические системы защитных покрытий», г. Москва, г. Щербинка

Рассмотрено решение задачи аэродинамики об обтекании лопатки газотурбинного двигателя газовым потоком на основе теории комплексного потенциала. Получено дифференциальное уравнение линий тока поля скорости и рассмотрено его асимптотическое решение вблизи края лопатки. Решены задачи безвихревого обтекания, а также обтекания с разными типами вихрей, для которых получены картины обтекания и распределения давлений по профилю лопатки. Регуляризация потока произведена с использованием условия Чаплыгина, обеспечивающим конечность давления на острие лопатки. Проанализирована зависимость концентрации напряжений на кромке лопатки для трехмерной модели.

Лопатки газотурбинных двигателей, моделирование, теория комплексного потенциала, распределение давлений.

**Calculation of stresses on a blade in a medium flow using the complex
potential method**

Mikhail Evgenievich Soloviev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor of the Department of Information Systems and Technologies,
Institute of Digital Systems, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl,
Sergey Sergeevich Kokarev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Director of the Logos Regional Scientific and Educational Center, Yaroslavl,
Sergey Lvovich Baldaev, Candidate of Technical Sciences, Deputy General Director,
Lev Khristoforovich Baldaev, Doctor of Technical Sciences, General Director,
Maria Olegovna Fedorova, head of department,
Technological Systems of Protective Coatings LLC, Moscow, Shcherbinka

The solution to the aerodynamics problem of a gas flow flowing around a gas

turbine engine blade is considered based on the theory of complex potential. A differential equation of the velocity field streamlines is obtained and its asymptotic solution near the edge of the blade is considered. Problems of irrotational flow around, as well as flow around with different types of vortices, were solved, for which flow patterns and pressure distribution along the blade profile were obtained. The flow was regularized using the Chaplygin condition, which ensures a finite pressure at the tip of the blade. The dependence of stress concentration on the blade edge for a three-dimensional model is analyzed.

Blades of gas turbine engines, modeling, theory of complex potential, pressure distribution.

1. Введение

Одним из основных факторов, определяющих ресурс газотурбинных двигателей (ГТД), является долговечность лопаток турбокомпрессора [2,3,7,9]. К основным механизмам разрушения лопаток можно отнести механические факторы, такие как вибрации и флаттер [10], приводящие к усталости и ползучести, и физико-химические, такие как эрозия и коррозия, вызванная термоокислением и сульфатацией [11]. Для повышения стойкости лопаток к термомеханическим воздействиям на их поверхность наносят специальные защитные покрытия [12-14]. Наиболее распространенным методом нанесения защитных покрытий является газотермическое напыление [1,4,15]. Выбор состава покрытия и технологии его нанесения должен быть основан на компьютерном моделировании термомеханических воздействий на поверхность лопатки [16].

Практика работы ГТД обнаруживает, что максимальный износ лопасти в процессе ее эксплуатации происходит вблизи краев [6,17]. Из элементарных физических соображений очевидно, что вблизи края вращающейся лопасти градиенты скоростей жидкой или воздушной среды максимальны, что приводит к значительной концентрации напряжений вблизи краев и связанному с этим увеличению скорости износа поверхности лопасти. Для теоретического изучения износа и возможностей его уменьшения за счет надлежащей технологии покрытия поверхности, представляет интерес количественная картина распределения напряжений вблизи краев вращающейся в среде лопасти. В своей точной постановке такая задача чрезвычайно сложна. В настоящей статье мы рассматриваем упрощенную модель обтекания лопасти, в которой нас, главным образом, интересует распределение напряжений в окрестности ее кромки. Если линия кромки не имеет участков с резко возрастающей кривизной (это имеет место вдали от концов лопасти), то разумно ожидать, что локально картина обтекания кромки похожа на обтекание цилиндрида, сечение которого совпадает с локальным поперечным сечением лопасти. Это обстоятельство позволяет использовать теорию комплексного потенциала для задач эффективно 2-мерной гидродинамики [5,18,19], а затем собрать локальные 2-мерные решения, зависящие от продольной координаты лопасти как от параметра, в модельное решение для реальной 3-мерной лопасти. Разумеется, построенное таким образом решение не будет удовлетворять точным уравнениям вязкой или даже идеальной гидродинамики, одна-

ко, как мы покажем в специальном разделе, это решение, давая весьма грубую общую картину обтекания 3-мерной лопасти, правильно воспроизводит асимптотическое поведение вблизи кромки и, следовательно, может быть положено в основу теоретического описания концентрации напряжений на кромке и ее износа в качестве некоторого разумного и относительно простого приближения. Разумеется, без учета вязкости среды картина концентрации напряжений на кромке лопасти будет неполна: именно вязкость отвечает за касательные к поверхности компоненты тензора напряжений, в то время как модель идеальной жидкости дает лишь его нормальные к поверхности компоненты. Кроме того, вязкость играет важную роль в образовании пограничного слоя с сильной завихренностью. Несмотря на это, наше относительно простое рассмотрение имеет смысл, поскольку нормальные напряжения в большинстве задач являются доминирующими, а завихренность потока при обтекании мы моделируем добавлением естественного вихря Чаплыгина, который регулирует поток.

Основной целью настоящей статьи является разработка общей удобной и актуальной методики расчета напряжений на вращающейся в сплошной среде лопасти с помощью теории функций комплексной переменной и элементов моделирования. Более точные количественные расчеты с учетом геометрии реальных сечений используемых в турбинах лопаток, мы сделаем на основе разработанной методики в отдельной публикации.

2. Уравнения движения идеальной несжимаемой жидкости и метод комплексного потенциала

Основными уравнениями гидродинамики идеальной (невязкой) жидкости или газа являются уравнение Эйлера, выражающие второй закон Ньютона, адаптированный к движению непрерывной невязкой среды:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \vec{f}, \quad (1)$$

где $\vec{v}(t, \vec{r})$ – поле скоростей в картине Эйлера (\vec{r} – координаты точек пространства неподвижной системы отсчета), p – давление среды, ρ – ее плотность, \vec{f} – массовая плотность внешних сил (например, для силы тяжести $\vec{f} = \vec{g}$), $\vec{\nabla}$ – векторный оператор пространственного дифференцирования Гамильтона, уравнение непрерывности, выражающее закон сохранения массы в процессе движения:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{v}) = 0, \quad (2)$$

и уравнение состояния среды, которое обычно записывают в виде заданной зависимости $p = p(\rho, s)$, где s – удельная энтропия среды.

Для целей нашей основной задачи мы, во-первых, будем рассматривать только стационарное течение, т.е. все производные по времени в уравнениях (1)–(2) полагаются равными нулю. Далее, мы везде будем полагать $\vec{f} = 0$ (действием внешних массовых сил по сравнению с внутренними напряжениями вблизи лопасти можно пренебречь). Кроме того, при обтекании лопасти потоком нас не будут интересовать процессы теплообмена, которые при любых реальных скоростях обтекания просто не успевают произойти и их влияние на картину напряжений пренебрежимо мало. Это означает, что мы можем ограничиться случаем так

называемого изоэнтропического течения, при котором $s = \text{const}$ во всем объеме среды и не учитывать потоков тепла. Далее, при скоростях обтекания, меньших скорости звука в среде, хорошим приближением является несжимаемая жидкость, для которой $\rho = \text{const}$. Наконец, важный тип течений, с которого обычно начинается анализ гидродинамических проблем, является случай, так называемого, потенциального обтекания, при котором $\vec{\nabla} \times \vec{v} \equiv \text{rot} \vec{v} = 0$. Для приближения потенциального обтекания к реальной ситуации к решению в виде потенциала добавляют завихренность, моделирующую отрыв струи и поверхность тангенциального разрыва, на которой условие потенциальности нарушается.

При сделанных предположениях уравнение (2) превращается в более простое:

$$\nabla \cdot \vec{v} \equiv \text{div} \vec{v} = 0, \quad (3)$$

а уравнение (1) локально интегрируется с помощью тождества векторного анализа:

$$\vec{v} \times (\vec{\nabla} \times \vec{v}) = \vec{\nabla} \frac{v^2}{2} - (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v}. \quad (4)$$

С учетом условия потенциальности, левая часть (4) равна нулю. Выражая конвективную часть производной $(\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v}$ из (4) и подставляя ее в (1) при $\vec{v} = \vec{f} = 0$, получаем:

$$\vec{\nabla} \left(\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right) = 0, \quad (5)$$

откуда интегрированием получаем интеграл Бернулли:

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = B = \text{const}, \quad (6)$$

где B – константа интегрирования (постоянная Бернулли). Для нашей постановки задачи ее следует положить равной $p_\infty + v_\infty^2/2$, где p_∞ и v_∞ – давление и скорость потока вдали от обтекаемого тела. Таким образом, формула для расчета давления (нормального напряжения) в потоке принимает вид:

$$p = B - \frac{\rho v^2}{2}, \quad (7)$$

а поле скорости \vec{v} подлежит определению. Уравнения на это поле в рассматриваемом нами случае сводятся к паре условий:

$$\vec{\nabla} \times \vec{v} = 0; \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0, \quad (8)$$

выражающих факт потенциальности и соленоидальности потока. Из первого уравнения следует, что локально существует потенциал φ , такой, что:

$$\vec{v} = \vec{\nabla} \varphi. \quad (9)$$

Подставляя это во второе условие, получаем:

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \varphi) = \nabla^2 \varphi \equiv \Delta \varphi = 0 \quad (10)$$

– уравнение Лапласа на потенциал скоростей. При обтекании неподвижных тел или препятствий соответственным граничным условием является требование равенства нулю нормальной к поверхности тела компоненты скорости: $v_n|_\Sigma = 0$, где Σ – граница поверхности тела. На языке потенциала это условие принимает вид краевого условия Неймана:

$$\nabla_n \varphi|_\Sigma = 0. \quad (11)$$

В случае плоских сечений поле скорости не зависит от одной из координат (координаты z). В этом случае, как хорошо известно из ТФКП [8,20], любая гармоническая в некоторой плоской односвязной области функция φ допускает гармонически сопряженную с ней функцию χ , такую, что в совокупности они образуют голоморфную функцию комплексной переменной

$$F(z) = \varphi(x, y) + i\chi(x, y). \quad (12)$$

При этом вещественная и мнимая части этой функции связаны между собой условиями Коши-Римана:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \chi}{\partial y}, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial y} = -\frac{\partial \chi}{\partial x}, \quad (13)$$

выражающими комплексную дифференцируемость функции F . Введенная таким образом функция F называется *комплексным потенциалом*. Для полного перехода на комплексный язык введем пару комплексных координат:

$$z = x + iy; \quad \bar{z} = x - iy \quad (14)$$

и пару соответствующих формальных операторов частного дифференцирования:

$$\frac{\partial}{\partial z} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x} - i \frac{\partial}{\partial y} \right); \quad \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x} + i \frac{\partial}{\partial y} \right). \quad (15)$$

В этих координатах условия Коши-Римана записываются более компактно в виде одного комплексного дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial F}{\partial \bar{z}} = 0. \quad (16)$$

Введем «комплексный вектор», скорости:

$$V = v_x + i v_y. \quad (17)$$

Тогда имеем с учетом (12), (15) имеем:

$$\frac{\partial F}{\partial \bar{z}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} - i \frac{\partial}{\partial y} \right) (\varphi + i\chi) = \frac{1}{2} (\varphi_{,x} + \chi_{,y} + i(\chi_{,x} - \varphi_{,y})) = (18)$$

$$= \varphi_{,x} - i\varphi_{,y} = \bar{V},$$

откуда

$$V = \overline{F'}, \quad (19)$$

где штрих обозначает производную по z , а черта, как обычно, комплексное сопряжение. Формула (19) объясняет термин «комплексный потенциал». Поскольку, согласно (16), потенциал F зависит лишь от одной комплексной координаты z дифференцируемым образом (F – голоморфная функция комплексной переменной), то $V = \overline{F'}$ зависит только от дополнительной координаты \bar{z} тоже дифференцируемым образом (V – антиголоморфная функция переменной z). Условие антиголоморфности V записывается в виде:

$$\frac{\partial V}{\partial z} = 0. \quad (20)$$

С использованием (15) легко проверяется, что уравнение (20) на комплексном языке выражает систему уравнений (8) – мнимая часть выражает усло-

вие потенциальности, а вещественная – условие соленидальности. Эквипотенциальные поверхности функции φ ортогональны векторному полю \vec{v} в каждой точке как полю градиента. Для линий уровня функции χ имеем:

$$\chi = \text{const} \Rightarrow \chi_{,x}dx + \chi_{,y}dy = 0 \Rightarrow -\varphi_{,y}dx + \varphi_{,x}dy = 0 \Rightarrow \quad (21)$$

$$-v_y dx + v_x dy = 0 \Leftrightarrow \frac{dx}{v_x} = \frac{dy}{v_y}$$

– систему дифференциальных уравнений на линии поля (линии тока поля скорости), интегралом которых является функция χ . По этой причине она называется *функцией тока*. Таким образом, эквипотенциальные линии функции тока – это в точности линии тока среды. На границе обтекаемых тел одна из линий тока должна совпасть с линией границы. Если говорить в целом, то задача обтекания тела на языке комплексного потенциала сводится к отысканию такой аналитической функции $F(z)$, которая отображает связные компоненты границы обтекаемых тел в линии $\text{Im}w = \text{const}$, где $w = F(z)$.

3. Универсальные законы обтекания вблизи края

Любое решение, описывающее обтекание острой кромки, должно иметь универсальный асимптотический вид вблизи нее, отысканию которого и посвящен этот раздел. Сравнение результатов вычислений любой реалистичной и более сложной модели обтекания должно согласовываться с этим асимптотическим решением, что обосновывает актуальность его поиска в качестве первого шага.

Технически мы рассматриваем общее решение задачи обтекания в асимптотическом пределе, описывающем поведение функции тока вблизи ребра клина, моделирующего край лопасти, который будем считать прямолинейным. Введем цилиндрическую систему координат с осью Z , ориентированной вдоль ребра. Пространство вне клина описывается диапазоном полярного угла: $\alpha < \phi < 2\pi$. Уравнение Лапласа в цилиндрической системе координат, с учетом отсутствия зависимости функции тока от координаты z , принимает вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \chi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \chi}{\partial \phi^2} = 0. \quad (22)$$

Будем искать его асимптотическое решение в виде $\chi = r^a \Phi(\phi)$. Подставляя этот анзац в (19), приходим после простых преобразований к уравнению:

$$r^{a-2}(\Phi'' + a^2 \Phi) = 0, \quad (23)$$

которое удовлетворяется тождественно при $\Phi = A \sin(a\phi + \phi_0)$. Функция тока на гранях клина постоянна, так как эти грани (их проекции) совпадают с линиями тока среды. Положим функцию тока на гранях клина равной нулю: $\chi(r, \alpha) = \chi(r, 2\pi) = 0$, тогда угловая часть решения принимает вид:

$$\Phi = A \sin \left(\frac{\pi n(2\pi - \phi)}{2\pi - \alpha} \right), \quad (24)$$

так что $a = a_n = -\pi n / (2\pi - \alpha)$, $n \in \mathbb{Z}$. Асимптотическое решение при $r \rightarrow 0$ получится, если мы из всех a_n выделим: а) положительную степень (отрицательная степень расстояния описывала бы источники потока, которые отсутствуют на ребре клина) и б) минимальную положительную степень, поскольку при $r \rightarrow 0$ все остальные положительные степени становятся малыми. Легко заметить, что $a_{\min} = a_{-1} = \pi / (2\pi - \alpha)$. Таким образом, окончательно асимптотический вид функции тока вблизи ребра клина имеет вид:

$$\chi = Ar^{\pi/(2\pi-\alpha)} \sin\left(\frac{\pi(2\pi-\phi)}{2\pi-\alpha}\right), \quad (25)$$

где коэффициент A может быть определен уже только из решения полной задачи обтекания (очевидно, что он должен зависеть, как минимум, от скорости потока и от угла ориентации клина к направлению потока). Вид линий тока вблизи острия клина представлен на рисунке 1.

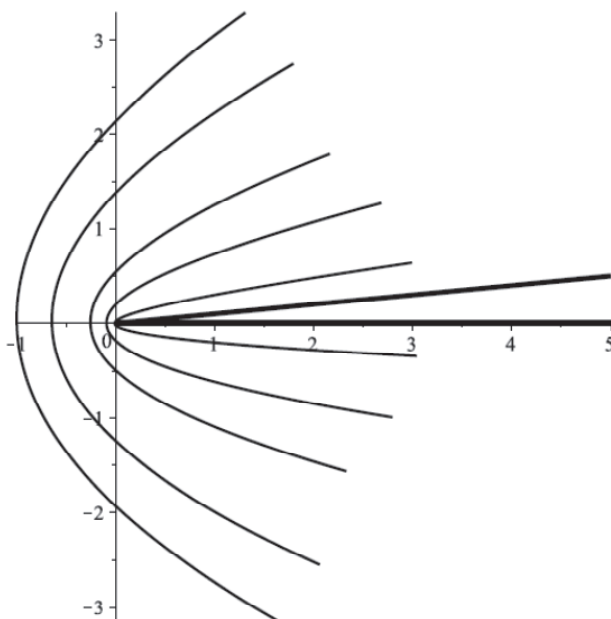


Рисунок 1 – Картина линий тока вблизи ребра (топологически тривиальный случай)

Если угол раствора клина α меняется в пределах $0 < \alpha < \pi$, то показатель степени $a = \pi/(2\pi - \alpha)$ в (22) меняется в пределах $1/2 < a < 1$ соответственно. Это означает, что, несмотря на то, что функция тока регулярна на ребре клина, ее градиент, связанный с компонентами скорости, будет сингулярен, а значит скорость и ее квадрат на острие неограниченно растут вместе с напряжениями. Действительно,

$$\begin{aligned} v^2 &= (\vec{\nabla}\chi)^2 = \chi_{,r}^2 + \frac{1}{r^2}\chi_{,\phi}^2 \\ &= a^2 A^2 r^{2a-2} \sin^2(a\phi + \phi_0) + a^2 A^2 r^{2a-2} \cos^2(a\phi + \phi_0) = \\ &= A_1 r^{-(2\pi-2\alpha)/(2\pi-\alpha)} \end{aligned}$$

и по формуле (7) получаем:

$$p = B - \frac{A_1}{2} r^{-(2\pi-2\alpha)/(2\pi-\alpha)} \xrightarrow{r \rightarrow 0} \infty, \quad (26)$$

причем эти напряжения отрицательны. Отметим, что среднее давление в окрестности кромки, равно как и средняя сила, оказываются конечными, поскольку интегрирование по тонкой прилегающей к ребру полосе на одной одной

из граней:

$$\langle p \rangle_d \equiv \frac{1}{d} \int_0^d p(r) dr = B - \frac{A_1(2\pi-\alpha)}{2\alpha} d^{-(2\pi-2\alpha)/(2\pi-\alpha)} < \infty \quad (27)$$

дает конечный результат.

Решение, описываемое формулой (22), представляет одну (самую простую) из бесконечного числа картин обтекания кромки клина, которые отличаются друг от друга целочисленным топологическим индексом. Чтобы более наглядно представить геометрический смысл этого индекса, рассмотрим еще одно решение, которое описывается выражением:

$$\chi_1 = Ar^{2\pi/(2\pi-\alpha)} \sin\left(\frac{2\pi(\phi-\alpha)}{2\pi-\alpha}\right). \quad (28)$$

Непосредственной проверкой можно убедиться, что χ_1 является решением уравнения Лапласа с граничными условиями $\chi_1(r, \alpha) = \chi_1(r, 2\pi) = 0$ и еще одним дополнительным свойством, выражаемым соотношением: $\chi_1(r, \pi + \alpha/2) = 0$, которое означает, что направление $\phi = \pi + \alpha/2$ (это биссектрисса внешности клина) является дополнительной асимптотой линий тока. Картина линий тока в этом случае представлена на рисунке 2.

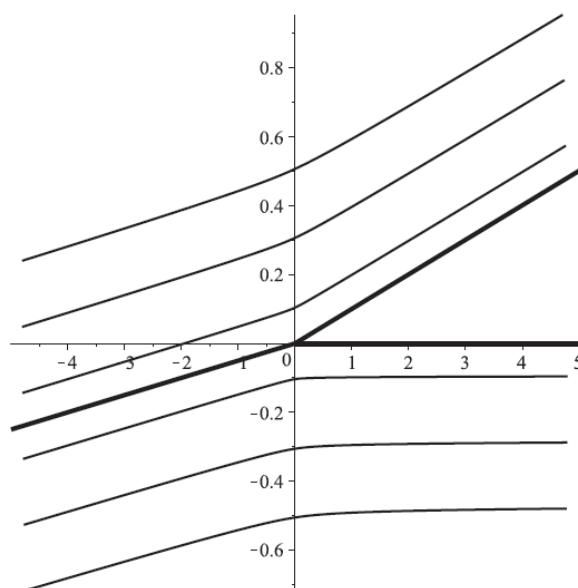


Рисунок 2 – Картина линий тока вблизи ребра (топологически нетривиальный случай): имеется одна «перегородка», содержащая точку бифуркации потока

Такая картина обтекания содержит разбиение потока на две части и соответствует симметричному положению клина относительно потока. Отметим, что степень радиальной координаты в (25) в два раза больше, чем в (22) и это – минимальная положительная степень, при которой существует одна «перегородка». Квадрат скорости теперь дается выражением:

$$v^2 = (\vec{\nabla}\chi)_1^2 = A_2 r^{2\alpha/(2\pi-\alpha)},$$

которая стремится к нулю при $r \rightarrow 0$. По формуле (7) получаем:

$$p = B - \frac{A_2}{2} r^{2\alpha/(2\pi-\alpha)} \xrightarrow{r \rightarrow 0} p_{\max} = B = p_{\infty} + \frac{\rho v_{\infty}^2}{2}, \quad (29)$$

то есть концентрация напряжений имеет место и в этом случае, хотя теперь они конечны на ребре клина.

В общем случае, решения для обтекания ребра клина могут содержать любое натуральное число $k = -n - 1$ радиальных «перегородок», в пространстве вне клина, которые являются асимптотами линий тока. Число k , связанное с n , и можно принять за определение топологического индекса потока. k перегородок формируют $k + 1$ ячейку, внутри которой поток однократно набегае на ребро из бесконечности и уходит от него на бесконечность. При этом зависимость квадрата скорости от r в такой картине обтекания будет иметь вид:

$$v_k^2 = Ar^{2(\pi(k-1)+\alpha)/(2\pi-\alpha)}, \quad (30)$$

так что степень r возрастает с возрастанием топологического индекса потока, что делает концентрацию напряжений на ребре более выраженной с ростом k . На самом деле, потоки с четными и нечетными k объединяются в классы эквивалентности. Это связано с тем, что вращение векторного поля при обходе острия по незамкнутой окружности небольшого радиуса с центром в острие и концами на гранях клина равно $2\pi - \alpha$ для четных k и α для нечетных k , что легко устанавливается из картин рисунков 1 и 2. Сложно устроенные потоки с высокими значениями k из-за неизбежных возмущений будут перестраиваться в максимально простые, при этом потоки с четным k будут перестраиваться в картину 1, поскольку их объединяет общая дискретная топологическая характеристика – общий угол поворота $2\pi - \alpha$ – которую невозможно изменить непрерывной перестройкой. Аналогично потоки с высоким нечетным k будут перестраиваться в картину 2.

Подкрепим сказанное прямым вычислением. Пусть течение с топологическим индексом k описывается функцией тока вида:

$$\chi_k = Ar^{a_k} \sin(a_k \phi + \phi_0), a_k = 2(\pi(k-1) + \alpha)/(2\pi - \alpha).$$

Тогда $v^2 = A^2 a_k^2 r^{2(a_k-1)}$ и кинетическая энергия объема жидкости, прилегающего ребру и приходящегося на единицу его длины, дается интегралом:

$$E_n(R) = \int_{\alpha}^{2\pi} d\phi \int_0^R \frac{\rho v^2}{2} \cdot r dr = \frac{(2\pi - \alpha) \rho A^2}{4} a_k R^{2a_k}.$$

Найдем экстремум этого выражения по k . Для этой цели продифференцируем последнее выражение по a_k и приравняем производную к нулю. В результате получим:

$$1 + 2a_k \ln R = 0 \Rightarrow a_k = -\frac{1}{2 \ln R} \xrightarrow{R \rightarrow 0} 0,$$

откуда получаем уравнение на k :

$$\pi(k-1) + \alpha = 0 \Rightarrow k = 1 - \frac{\alpha}{\pi}. \quad (31)$$

Когда α пробегает значения от 0 до π , экстремальное k пробегает значения от 1 до 0. Таким образом, а) конфигурации с минимальными топологическими индексами действительно являются наиболее энергетически выгодными; б) обтекание клина с острым углом энергетически выгоднее с конфигурацией $k = 1$ (по типу рис. 2), а с тупым – с конфигурацией $k = 0$ (по типу рис. 1).

Разумеется, все вышесказанное имеет смысл только в рамках предположений рассматриваемой модели, которая дает качественно правильную картину концентрации напряжений на ребре клина, хотя ее количественные выводы весьма приблизительны ввиду большого числа факторов, которые не были учтены. В дальнейшем мы увидим, что из-за значительной завихренности набегающего потока в рассматриваемой нами задаче реализуется картина обтекания с $k = 0$, в чем мы убедимся непосредственно в разделе 6.1.

Отметим в конце этого раздела, что рассматриваемая модель содержит один гидродинамический парадокс, который легко выявить с помощью соображений размерности. Действительно, размерный анализ формулы (22) обнаруживает, что для согласования размерностей левой и правой частей в задаче должен присутствовать размерный параметр длины. Рассмотрим теперь задачу стационарного обтекания бесконечно протяженного клина. Вблизи его острия должно быть справедливо наше решение (22), но никакого параметра длины у бесконечно протяженного клина нет! Решение парадокса заключается в том, что обтекание бесконечно протяженных тел физически не может быть стационарным: если в некоторый момент поток падает на клин с конечной скоростью потока на бесконечности, то потребуются бесконечно большое время, чтобы поток достиг бесконечно удаленных точек клина. Таким образом, в реальной задаче появляется параметр нестационарности T – время, прошедшее с момента начала обтекания – и в комбинации $v_{\infty}T$ мы получаем требуемый параметр длины.

4. Обтекание финитного профиля

В основе метода решения задач обтекания конечных профилей с помощью теории комплексного потенциала лежит задача обтекания простейшего кругового профиля, решенная Н.Е. Жуковским и усовершенствованная С.А. Чаплыгиным, теорема Римана о существовании конформных отображений односвязных областей и нарушение конформности в точках нулей производной голоморфной функции. Жуковский обнаружил, что функция

$$w = \frac{1}{2}(z + z^{-1}) \quad (32)$$

отображает единичный круг и его внешность на C с вырезом вдоль вещественного единичного отрезка $[-1; 1]$, то есть этот отрезок является образом границы единичного круга (граничная окружность как бы сплющивается отображением (29) – см. рис. 3).

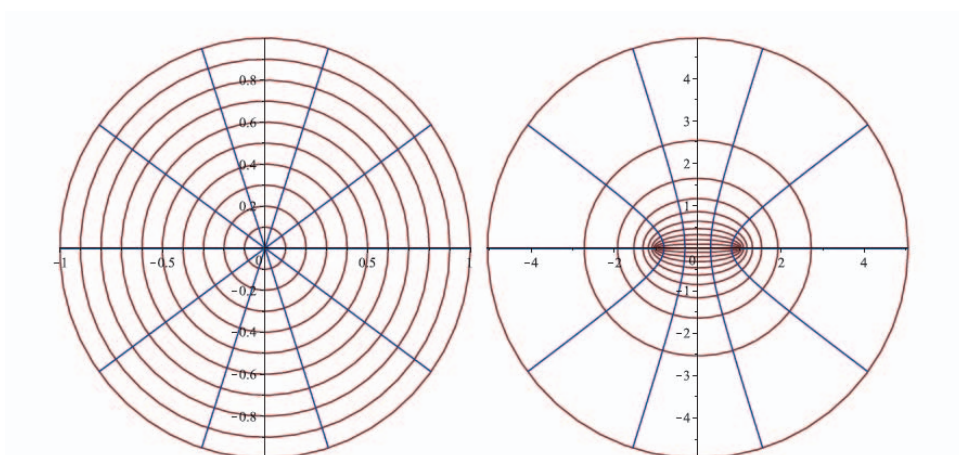


Рисунок 3 – Отображение функцией Жуковского полярной сетки единичного круга на эллиптически-гиперболическую сетку внешности вещественного отрезка $[-1; 1]$

Это отображение получило в дальнейшем название функции Жуковского и послужило основой для первых расчетов в области аэродинамики крыла. Если переписать (29) в более физических обозначениях:

$$F_0(z) = v_{\infty} \left(z + \frac{R^2}{z} \right), v_{\infty}, R \in \mathbb{R}, \quad (33)$$

то, в соответствии с общей идеологией теории комплексного потенциала, изложенной в разделе 2, функция (33) решает задачу обтекания цилиндра, помещенного в плоскопараллельный поток идеальной несжимаемой среды, поскольку на границе цилиндра функция тока (мнимая часть F_0) равна нулю в силу упомянутого выше свойства функции Жуковского (рис. 4).

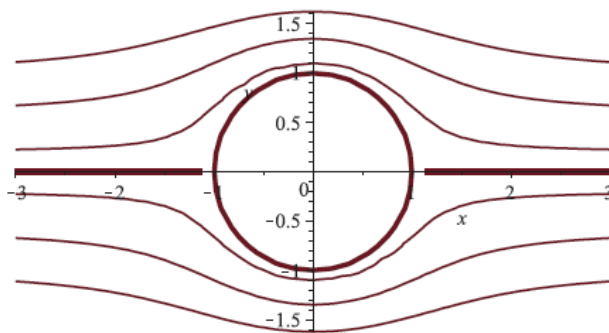


Рисунок 4 – Безвихревое обтекание цилиндра (линии уровня мнимой части (30)). Жирным выделен профиль цилиндра и линии тока, содержащие критические точки потока ($v = 0$) на поверхности цилиндра

Вычисление суммарной силы аэродинамического давления F с помощью интеграла Бернулли и комплексного потенциала приводит к известной формуле

Чаплыгина [16]:

$$\overline{F} = - \int_{C_R} (B - \rho v^2 / 2) i d\overline{z} = \frac{i\rho}{2} \int_{C_R} F'^2_0(z) dz. \quad (34)$$

Подставляя в нее функцию (33), легко получаем с помощью вычетов, что интеграл в (34) равен нулю. Этот результат выражает на комплексном языке известный гидродинамический парадокс Даламбера: потенциальное обтекание конечного профиля (любого, а не только кругового!) не создает никакой силы аэродинамического сопротивления. В теории комплексного потенциала этот парадокс решается введением в обтекание точечного вихря с центром на оси цилиндра:

$$Z_0 = \frac{\Gamma}{2\pi i} \ln z, \quad (35)$$

где Γ – вещественная константа, отвечающая за мощность вихря. Для этого потенциала $\chi = \text{Im} Z_0 = -(\Gamma/2\pi) \ln(\sqrt{x^2 + y^2})$ и линиями тока являются окружности, концентричные с профилем цилиндра. Теперь $F_1 = F_0 + Z_0$ и

$$F'^2_1 = \left(v_\infty - v_\infty \frac{R^2}{z^2} + \frac{\Gamma}{2\pi i z} \right)^2 = \frac{v_\infty \Gamma}{\pi i z} + \dots$$

т.е. подынтегральное выражение в (31) содержит член, соответствующий ненулевому вычету внутри контура интегрирования (остальные слагаемые в контурный интеграл вклада не дают). В итоге получаем:

$$\overline{F} = \frac{i\rho}{2} \int_{C_R} F'^2_1(z) dz = \frac{i\rho}{2} \cdot 2\pi i \cdot \text{Выч}(F'^2_1(0)) = i\rho v_\infty \Gamma \quad (36)$$

– формулу Жуковского-Кутта, описывающую поперечную к потоку аэродинамическую силу, которая будет подъемной (положительной) при $\Gamma < 0$ (т.е. для вихря, закрученного по часовой стрелке).

Геометрически наложение потоков вихря и симметричного обтекания представлено на рисунке 5.

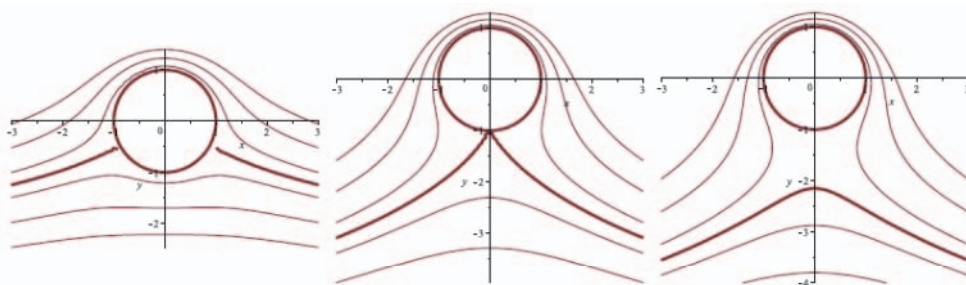


Рисунок 5 – Обтекание цилиндра вихревым потоком с $\omega = -3/\pi$ (слева), $\omega = -2$ (посередине), и $\omega = -2.2$.

Здесь $\omega = \Gamma/2\pi v_\infty R$ – безразмерный параметр завихренности

Как это хорошо видно из приведенных рисунков роль вихря сводится к

деформации потока в поперечном направлении и смещению критических точек потока, в которых скорость равна нулю. При симметричном безвихревом обтекании критические точки расположены на вещественной оси в точках $x = \pm R$ (см. рис. 4). Ненулевой вихрь перемещает эти точки вдоль окружности цилиндра симметрично навстречу друг другу в верхней половине, когда вихрь положителен ($\Gamma > 0$), и в нижней, когда вихрь отрицателен ($\Gamma < 0$), как это и представлено на рисунке 5. Точное положение критических точек определяется решением уравнения: $F'_1(z_*) = 0$, которое сводится к квадратному. Его решение можно привести к виду:

$$z_* = \frac{R}{2}(\pm\sqrt{4 - \omega^2} + i\omega). \quad (37)$$

где $\omega = \Gamma/2\pi v_\infty R$ – безразмерный параметр завихренности потока. При $|\omega| < 2$ две критические точки потока расположены на окружности профиля цилиндра и характеризуются углами $\phi_1 = \arctan(\omega/\sqrt{4 - \omega^2})$ и $\phi_2 = \pi - \phi_1$ (левый рис. 5). При $\omega = 2$ критические точки сливаются при $\phi_1 = \phi_2 = \pm\pi/2$ (центральный рис. 5), а при $\omega > 2$ одна критическая точка уходит в поток, а вторая становится нефизической (она лежит внутри цилиндра) (рис. 3 справа). Таким образом, параметр завихренности является полезным дополнительным параметром задач обтекания идеальной жидкостью, позволяющий придать им более реалистичный характер.

Для нашей задачи задача Жуковского является вспомогательной. Поперечный профиль лопасти имеет перьевидную форму. Для решения задачи обтекания такого профиля следует сначала найти конформное отображение перьевидной области на окружность радиуса R , а затем использовать функцию Жуковского в форме (30) или модифицированную вихрем. Если G – искомое отображение профиля лопасти на окружность (а оно всегда существует в силу общей теоремы Римана об отображениях областей (см. [19]), но не всегда известно как его найти), то композиция $Z \circ G$ дает отображение границы профиля лопасти на вещественную ось и, следовательно $\text{Im}(Z \circ G) = \chi$ будет искомой функцией тока. Таким образом, если отображение G найдено, то комплексный потенциал задачи имеет вид:

$$F(z) = v_\infty \left(G(z) + \frac{R^2}{G(z)} \right) + \frac{\Gamma}{2\pi i} \ln G(z), \quad (38)$$

где для общности мы добавили и вихревое слагаемое. Для сохранения физической интерпретации координатной бесконечности на функцию G следует наложить два условия нормировки:

$$G(\infty) = \infty; G'(\infty) = 1. \quad (39)$$

Первое условие сохраняет бесконечно удаленные точки, а второе – сохраняет физический смысл параметра v_∞ как скорости потока на бесконечности.

5. Моделирование семейства профилей

Ввиду сложной формы профиля лопасти, попытки непосредственного отыскания отображения G на окружность обречены на неудачу. Гораздо более продуктивной является обратная задача: искать обратные отображения $G = G^{-1}$ круговой области на область, напоминающую по форме профиль лопасти. Если функция G содержит параметры, то ими можно распоряжаться для того, чтобы

приблизить профиль к желаемому реальному, насколько это возможно. С другой стороны, функция G не должна быть слишком сложной для аналитических выкладок с ней. В качестве функции G мы выбираем следующее семейство:

$$G(z) = z \left(1 - \frac{Re^{i\psi}}{z} \right)^a \left(1 + \frac{cR}{z} \right), \quad (40)$$

где $R, \psi, a \in R$, $c \in C$. Функция $G(z)$ обладает следующими полезными для нашей задачи свойствами:

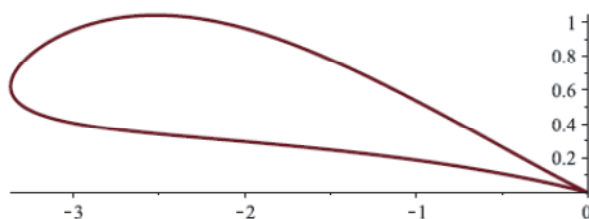
1. Она удовлетворяет условиям нормировки (36), а значит, по теореме об обратной функции им удовлетворяет и $G = G^{-1}$;

2. Ее производная обращается в точке $z = Re^{i\psi}$ в ноль при $a > 1$. В соответствии с геометрической интерпретацией голоморфных функций в этой точке отображение перестает быть конформным и у образа окружности в этой точке появляется излом (острие), равный $\pi(2 - a)$. Таким образом, физический смысл для моделирования лопастей с острой кромкой имеет диапазон параметра $a \in (1; 2)$.

3. Функция G зависит от трех вещественных параметров a, ψ, R и одного комплексного c , так что в целом мы имеем вещественно 5-параметрическое семейство.

4. Все параметры, кроме R – безразмерны, поэтому все размерные характеристики лопасти будут выражаться в единицах R .

Типичный вид образа окружности при отображении (37) показан на рисунке 6. Мы примем его условно за эталонный.



**Рисунок 6 – Образ окружности при отображении (37), взятom при $a = 1.95$
 $R = 1, c = 0.1 - 0.1i, \psi = -0.3$.**

Наша ближайшая задача – связать параметры зависимости (40) с визуальными геометрическими параметрами профиля лопасти и найти ограничения на первые, при которых отображение переводит окружность в замкнутую кривую без самопересечений. Даже в случае выбранной нами относительно простой зависимости (40), вывод явных формул проблематичен в виду их громоздкости, связанной с правильным выделением вещественной и мнимой частей выражения с нецелой степенью. По этой причине мы поступим другим путем: отталкиваясь от эталонного профиля на рисунке 6 (который на всех рисунках для удобства

сравнения выделен красным), мы проследим как он меняется при изменении одного из параметров при фиксированных остальных. Зависимость от R в формуле (40), ограниченной на окружность $z = Re^{i\varphi}$, тривиальна: уравнения профиля содержат R как общий масштабный множитель. Характер зависимости формы профиля от степени a в окрестности эталонного профиля представлен на рисунке 7.

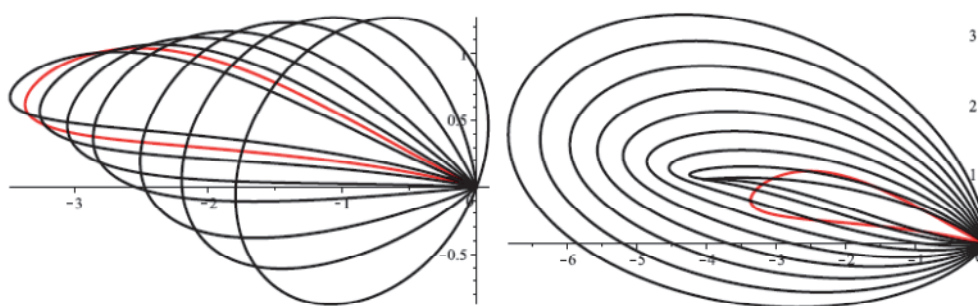


Рисунок 7 – Слева: семейство профилей при $1 \leq a \leq 2$; при возрастании a профиль из округлого становится более вытянутым и заостренным.

Справа: семейство профилей при $2.23 \leq a \leq 3$; при возрастании a профиль из заостренного становится более округлым и «раздутым»

Как хорошо видно из приведенных рисунков, параметр a играет ключевую роль в определении формы обтекаемого профиля. В частности, от него зависит величина угла на задней (правой) заостренной кромке:

$$\alpha = |\pi(2 - a)| \quad (41)$$

Исследование обнаруживает, что в диапазоне $(2; 2.23)$ образ окружности имеет самопересечение (типа восьмерки) и не годится для моделирования формы лопатки. Практически наиболее значимой областью является небольшая левая полуокрестность точки $a = 2$ и небольшая правая полуокрестность точки $a = 2.23$.

Характер зависимости формы профиля от угла ψ в окрестности эталонного профиля представлен на рисунке 8 слева.

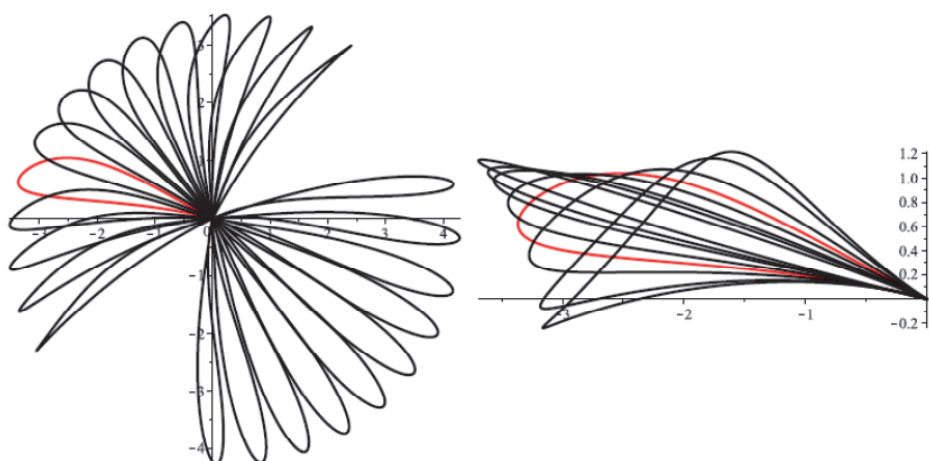


Рисунок 8 – Слева: семейство профилей при различных ψ ; при возрастании ψ от эталонного значения $\psi_0 = -0.3$ профиль вращается против часовой стрелки, при убывании – по часовой. Справа: семейство профилей при $0 \leq \rho \leq 0.35$; при возрастании ρ профиль непрерывно утолщается, изгибается и вращается

Из рисунка хорошо видно, что этот параметр влияет на форму незначительно, а в основном отвечает за ориентацию профиля. В диапазонах ψ (0.6; 1.5) рад и $(-2.9; -2.1)$ рад (секторы без профилей на рис.) образ окружности имеет самопересечения. Для обтекания горизонтальным потоком слева–направо практически значимой областью является небольшая окрестность эталонного значения $\psi_0 = -0.3$.

На правом рисунке 8 показано семейство профилей с различными значениями параметра ρ и фиксированными остальными, где $\rho = |c|$. Из рисунка видно, что параметр ρ довольно сложным образом влияет на вид и положение профиля: из уплощенного и заостренного при малых ρ он при увеличении этого параметра утолщается в средней части, при этом выпуклость сверху и вогнутость снизу становятся все более выраженными, а при значениях ρ близких к 0.35 у него формируется второе (переднее) острие. При $\rho > 0.35$ образ содержит самопересечения.

Зависимость формы профиля от угла $\chi = \arg c$ в окрестности эталонного профиля представлена на рисунке 9 слева.

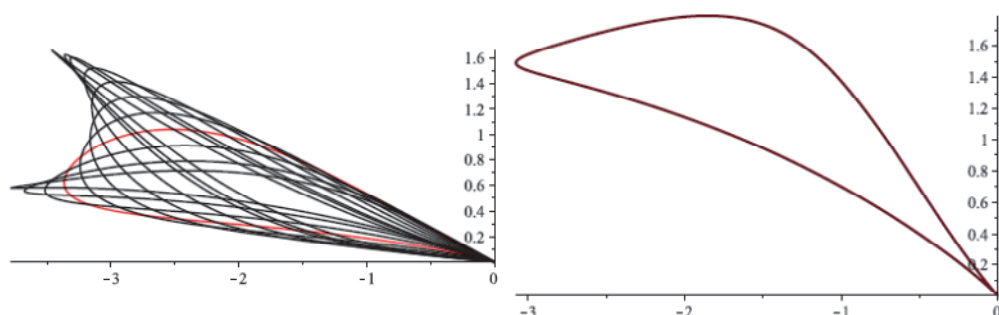


Рисунок 9 – Слева: семейство профилей при различных $\chi \in [-1.58; 1.02]$ рад; при возрастании χ передний край профиля поднимается снизу вверх, при этом перестраивается и направление его выпуклости (в обратную сторону – сверху вниз); Справа: улучшенный профиль, более близкий к форме одного из сечений лопасти турбины: $R = 1, a = 2, \rho = 0.25, \psi = -0.7, \chi = -1.28$

Зависимость от параметра χ также оказывается нетривиальной: при увеличении χ в сторону положительных значений профиль поворачивается вверх (по часовой стрелке), при этом он становится выпуклым вниз а на переднем (левом крае) появляется заостренная кромка. При уменьшении ψ в сторону отрицательных значений, профиль поворачивается вниз (против часовой стрелки), его направление выпуклости перестраивается в противоположную сторону, а на переднем крае тоже формируется острие. При значениях ψ вне интервала $[-1.58; 1.02]$ рад. у образа окружности появляются самопересечения. Рабочим диапазоном параметра ψ является небольшая окрестности эталонного значения $\psi_0 = -\pi/4 \approx -0.78$, лежащая в отрицательной области.

Приведенные зависимости позволяют количественно более точно подойти к моделированию формы профиля лопасти. На рисунке 9 справа приведена форма, быстро найденная с помощью приведенных закономерностей, – она лучше приближает форму одного из сечений лопасти, хотя для количественной оценки качества приближения, необходимо перевести приведенные семейства профилей на количественный язык, что не входит в цели настоящей статьи. В дальнейшем мы будем называть сечение на рисунке 9 справа вместе с его параметрами профилем лопасти и все расчеты, которые все равно носят оценочный характер, приводить для этого профиля. Также в этом и следующем разделах мы везде полагаем $R = 1, v_\infty = 1, \rho = 1$, что никак не умаляет общности рассмотрения, поскольку в общем случае этого всегда можно добиться переопределением единиц измерения длины, времени и массы. В разделе 7 для моделирования 3-мерного потока нам придется вернуться к явным размерным формулам. Таким образом, наше решение задачи обтекания профиля лопасти, задаваемое общей формулой (38), принимает более конкретный вид:

$$F(z) = G^{-1}(z) + \frac{1}{G^{-1}(z)} - i\omega \ln G^{-1}(z), \quad (42)$$

где функция $G^{-1}(z)$ – обращение формулы (40) (не степень -1 !) при зна-

чениях параметров: $R = 1, a = 2, \rho = 0.25, \psi = -0.7, \chi = -1.28$, а безразмерный параметр вращения ω в выбранных единицах равен $\Gamma/2\pi$.

Мы рассмотрим и рассчитаем подробно пять случаев: 1) $\omega = 0$ (безвихревое обтекание); 2) $\omega = 1$ – вихревое обтекание со слабым вихрем; 3) $\omega = 2$ – вихревое обтекание с пограничным вихрем; 4) $\omega = 3$ – вихревое обтекание с сильным вихрем; 5) $\omega = \omega_*$ – вихревое обтекание со специальным вихрем, удовлетворяющим условию Чаплыгина (см. ниже).

Для всех случаев справедлива теорема Жуковского-Кутта, которую целесообразно доказать для произвольных профилей класса (40). Технически проблема заключается в выполнении интегрирования в формуле Чаплыгина (34), поскольку явные формулы обращения (40) связаны с решениями кубического уравнения и очень громоздки. Явных формул обращения можно не использовать, если сделать замену переменной в интеграле Чаплыгина и воспользоваться теоремой о производной обратной функции. Вводя обозначение $w = G^{-1}(z)$ имеем по формуле Чаплыгина:

$$\bar{F} = \frac{i\rho}{2} \int_C F'^2(z) dz = \frac{i\rho}{2} \int_C \Phi'^2(w) \left(\frac{dw}{dz} \right)^2 dz, \quad (43)$$

где в соответствии с принятым нами определением переменной w

$$\Phi(w) = w + w^{-1} - i\omega \ln w.$$

Переходя в интеграле (43) полностью к новой переменной w с учетом соотношения:

$$\frac{dw}{dz} = \frac{dG^{-1}}{dz} = \frac{1}{G'(w)},$$

получаем:

$$\bar{F} = \frac{i\rho}{2} \int_C \Phi'^2(w) \left(\frac{dw}{dz} \right)^2 dw = \frac{i\rho}{2} \int_C \frac{\Phi'^2(w)}{G'(w)} dw. \quad (44)$$

Поскольку контур интегрирования можно непрерывно деформировать без пересечения им особых точек подынтегральной функции (контурные интегралы на комплексной плоскости постоянны в классе гомотопных замкнутых путей), то контур интегрирования C можно выбрать, скажем, в виде окружности большого радиуса R_C , так что подынтегральную функцию можно разложить в ряд Тейлора в окрестности бесконечно удаленной точки по степеням $1/z$. Имеем:

$$G'(w) = (w + \text{const} + O(1/w))' = 1 + o(1/w); \quad \Phi'^2(w) = 1 - \frac{2i\omega}{w} + o(1/w),$$

поэтому

$$\frac{\Phi'^2(w)}{G'(w)} = 1 - \frac{2i\omega}{w} + o(1/w)$$

и интеграл (44) по теореме о вычетах равен:

$$\bar{F} = \frac{i\rho}{2} \int_{C_{R \rightarrow \infty}} \frac{-2i\omega}{w} dw = 2\pi i \rho \omega = i\rho \Gamma, \quad (45)$$

что соответствует формуле Жуковского-Кутта (44) в наших обозначениях и лишний раз подтверждает, что наличие вихря при обтекании конечного тела

необходимо для получения интегральной подъемной (или в нашем случае тяговой) силы.

6. Конкретные картины обтекания и расчет напряжений на профиле

Перейдем к исследованию перечисленных выше случаев обтекания. Главная проблема расчетов конкретной картины обтекания заключается в сложности обращения функции G , которое входит в расчетную формулу (42): при $a = 2$ получается кубическое уравнение общего типа, которое имеет три ветви решений. Эти ветви нетривиальным образом взаимодействуют друг с другом в общей картине обтекания (например, одна и та же линия тока может склеиваться из двух различных ветвей), а некоторые ветви или их части не имеют физического смысла в данной задаче и должны быть просто отброшены. Для учета этих тонкостей была написана специальная программа–процедура, которая отслеживала необходимые части ветвей и позволяла скомпоновать общую наглядную картину обтекания в каждом из рассматриваемых случаев.

6.1. Случай безвихревого обтекания: $\omega = 0, -1, -2, -3$

Картина безвихревого обтекания при $\omega = 0$, которое, в силу формулы Жуковского-Кутта, не дает никакой подъемной или движущей силы и имеет чисто сравнительный интерес с другими более реалистичными картинами, приведена на рисунке 10.

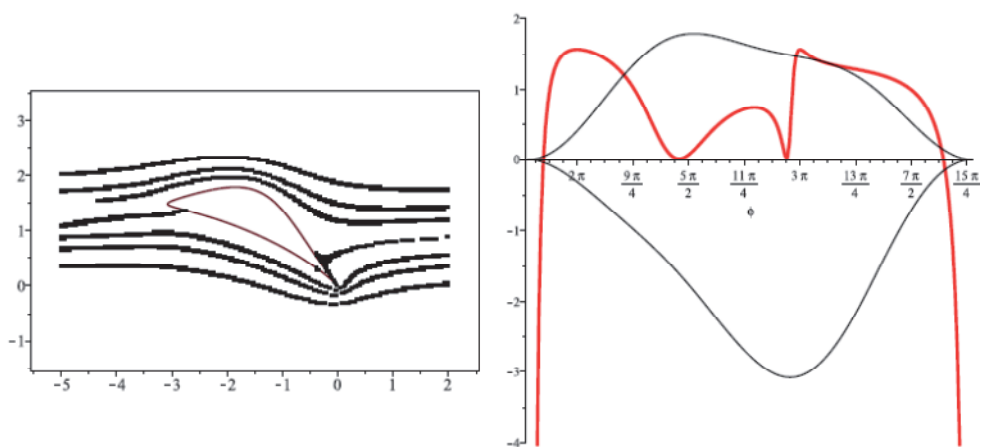


Рисунок 10 – Слева: линии тока около профиля лопатки, задаваемые неявным уравнением $\text{Im}F = A = \text{const}$ для значений $A = 0, \pm 0.3, \pm 0.5, \pm 0.8$; справа: красным – распределение давления (нормального напряжения) вдоль контура лопатки в зависимости от вспомогательной угловой переменной φ , черным сверху зависимость Y –координаты профиля лопатки от того же параметра, черным снизу – зависимость X –координаты профиля от того же параметра φ

Распределение давления по поверхности лопасти вычисляется по формуле (7) с учетом того, что:

$$v^2 = |V|^2 = |F'(z)|^2 = |\Phi'(w)|^2 |w'(z)|^2 = \frac{|\Phi'(w)|^2}{|G'(w)|^2}. \quad (46)$$

На поверхности лопасти $w = e^{i\varphi}$, так что формула для вычислений еще

более конкретизируется:

$$v^2|_{bl}(\varphi) = \frac{|d\Phi(e^{i\varphi})/d\varphi|^2}{|dG(e^{i\varphi})/d\varphi|^2}. \quad (47)$$

Явные формулы довольно громоздки и мы их не приводим. Результаты расчета для нормальных напряжений p_{bl} на поверхности профиля экономичнее всего выглядят в параметризации φ на вспомогательной единичной окружности, которая фигурирует в функции Жуковского. Они представлены на сводном графике 10 справа. Постоянная Бернулли B выбрана таким образом, чтобы давление на самой крайней левой выступающей кромке лопатки было равным нулю – при условии $v_\infty = 1$ это соответствует $p_\infty = 1.07$ в принятых единицах. Обсудим некоторые особенности полученных зависимостей.

1. Начало приведенных графиков приведено к заднему острию лопатки и возрастание угла φ соответствует обходу профиля в положительном направлении (против часовой стрелки). Начальные и конечные точки приведенных графиков следует отождествить, так как их разделяет величина $\Delta\varphi = 2\pi$, что соответствует полному обороту вокруг контура лопатки.

2. Как это видно по красной кривой (именно она отвечает за величину давления), давление на профиле лопатки меняется существенно немонотонно: оно имеет три промежутка возрастания, чередующихся с тремя промежутками убывания. Максимумы давления соответствуют критическим точкам потока на поверхности, в которых скорость потока обращается в нуль (на рис. слева они показаны, как линии заканчивающиеся на профиле лопатки). Еще один меньший локальный максимум соответствует точке, расположенной чуть правее и выше левого выступа. Регулярные минимумы давления возникают на самых выпуклых частях вблизи самой верхней части профиля и самой левой, – там, где скорость обтекающего потока максимальна.

3. Вблизи заднего острия, как это было установлено выше при общем рассмотрении, давление ведет себя сингулярно – оно там неограничено снизу. Закон его возрастания при приближении к острию легко устанавливается, так как вблизи острия $z = G^{-1}(w) \sim (w - w_0)^2$, где w_0 – комплексная координата точки окружности Жуковского, которой соответствует положение точки острия. Таким образом:

$$\sim A\sqrt{z} + w_0 \Rightarrow F(z) \sim A\sqrt{z} + w_0 + \frac{1}{A\sqrt{z} + w_0} \Rightarrow |F'|^2 \sim \frac{1}{|z|} \sim \frac{1}{r} \quad (48)$$

в полном соответствии с общей формулой (26), которая должна быть взята для нашей лопатки, как это следует из (41), при $\alpha \rightarrow 0$.

Наличие сингулярного давления, разумеется, выводит нас из области применимости рассматриваемой модели, однако эта сингулярность ожидаема из общего рассмотрения, полностью согласуется с ним и свидетельствует о том, что модель необходимо уточнить с помощью дополнительного вихря, к рассмотрению которого мы и переходим.

Расчет линий тока при $\omega = -1$ (мы выбираем отрицательные вихри, которые дают правильное направление силы тяги лопатки), представлен на рисунке 11.

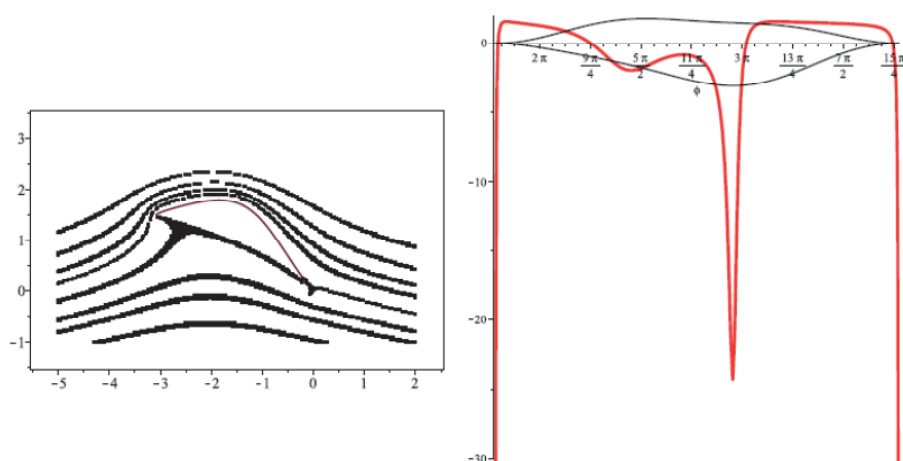


Рисунок 11 – Слева: линии тока около профиля лопатки, задаваемые неявным уравнением $\text{Im}F = A = \text{const}$ для значений $A = 0, \pm 0.3, \pm 0.5, \pm 0.8, \pm 1.2$; справа: красным – распределение давления (нормального напряжения) вдоль контура лопатки в зависимости от вспомогательной угловой переменной ϕ и компоненты параметрической зависимости профиля

Критические точки, как это и было отмечено раньше (см. рис. 5) сблизились на поверхности профиля по сравнению с предыдущим их положением. При этом за счет вихря скорость на передней (левой) кромке лопасти заметно возрастает, что приводит к заметному отрицательному скачку напряжения: материал лопатки как бы выдавливается в направлении от заднего острия к передней кромке. На фоне этого пика колебания давления представляются более сглаженными. Сингулярность на заднем острие не исчезает и ее зависимость от координаты $\sim 1/r$ остается прежней.

На рисунке 12 представлены результаты расчетов напряжений (без картин обтекания) для $\omega = -2, -3$.

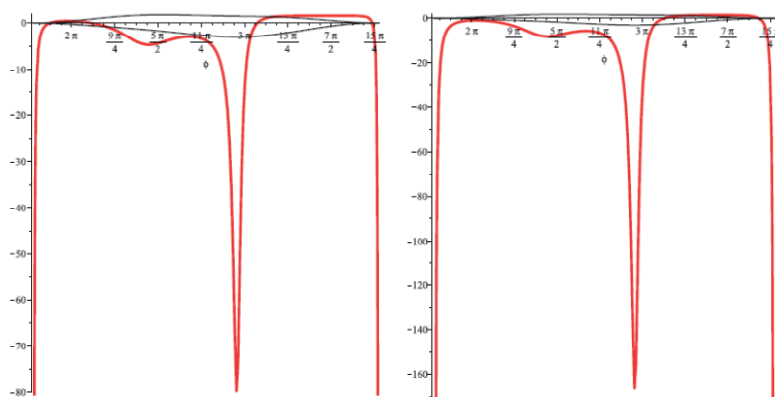


Рисунок 12 – Распределение напряжений на профиле лопатки при $\omega = -2$ (красным слева) и при $\omega = -3$ (красным справа)

Графики обнаруживают, что с увеличением модуля параметра завихренности концентрация отрицательных напряжений на передней кромке лопатки заметно возрастает, а сингулярность на заднем острие остается. При этом при возрастании модуля ω давление на верхней части лопатки становится всюду отрицательным (ввиду значительного возрастания скорости обтекания за счет вихревой составляющей потока), а на нижней части оно положительно и практически постоянно. Это обстоятельство объясняет на количественном уровне природу подъемной силы (или силы реактивной тяги) обтекаемого профиля.

6.2. Естественный вихрь $\omega = \omega_*$ и условие Чаплыгина

Предыдущее рассмотрение обнаруживает два обстоятельства, затрудняющих применение модели к реалистичным ситуациям обтекания: теоретическое и прикладное. Первое заключается в том, что в модели существует произвольный кинематический параметр ω , значение которого ничем не регламентируется – это произвольный свободный параметр. С другой стороны, наличие сингулярности скорости и давления на острие профиля, как это уже отмечалось, заведомо выводит нас за рамки рассматриваемых приближений и теоретическая модель теряет внутреннюю самосогласованность. С.А. Чаплыгин первым заметил, что обе проблемы решаются, в некотором смысле, только одновременно: существует единственное значение вихревого параметра $\omega = \omega_*$, при котором критическая точка потока попадает в точности на острие профиля и скорость там становится финитной (равной нулю). Это – довольно нетривиальный факт рассматриваемой модели, который можно установить следующим образом. Как это было установлено в рассуждениях ситуации с $\omega = 0$ вблизи острия $w \sim A\sqrt{z} + w_0$, но теперь комплексный потенциал имеет логарифмическую добавку:

$$F(z) \sim A\sqrt{z} + w_0 + \frac{1}{A\sqrt{z} + w_0} - i\omega \ln(A\sqrt{z} + w_0), \quad (49)$$

откуда для производной, отвечающей за скорость, получаем:

$$F'(z) \sim \frac{A}{2\sqrt{z}} - \frac{A}{2(A\sqrt{z} + w_0)^2\sqrt{z}} - \frac{iA\omega}{2(A\sqrt{z} + w_0)\sqrt{z}} = \quad (50)$$

$$\frac{A}{2\sqrt{z}} \left(1 - \frac{1}{(A\sqrt{z} + w_0)^2} - \frac{i\omega}{(A\sqrt{z} + w_0)} \right).$$

Последнее выражение может стать регулярным при $z \rightarrow 0$ только при одном единственном условии: выражение в скобках при $z \rightarrow 0$ должно обращаться в ноль. Это приводит к уравнению:

$$1 - \frac{1}{w_0^2} - \frac{i\omega}{w_0} = 0 \Leftrightarrow \omega = \omega_* = \frac{w_0 - w_0^{-1}}{i}. \quad (51)$$

Проблема могла бы возникнуть в связи с тем обстоятельством, что ω – чисто вещественная величина, а выражение справа не является вещественным при произвольном w_0 . Однако, по определению переменной w число w_0 является прообразом острия на единичной окружности Жуковского и в наших обозначениях $w_0 = e^{i\psi}$. Таким образом, это приводит к корректной формуле:

$$\omega_* = \frac{e^{i\psi} - e^{-i\psi}}{i} = 2 \sin \psi. \quad (52)$$

Таким образом, при обтекании профилей с заострениями возникает чрезвычайно важная возможность регуляризации потока условием Чаплыгина: одна

из критических точек потока должна попасть на острие! При этом параметр завихренности определяется единственным образом, а поток полностью регулируется – скорость и давление становятся конечными на всем обтекаемом профиле. Разумеется, эта возможность выглядит чисто математической, но в реальном потоке, обтекающем заостренные профили, нет бесконечных величин, поэтому вполне разумно предположить, что поток подстраивает свою завихренность именно таким образом, чтобы в нем не было сингулярностей. По этой причине его можно назвать естественным. Возникает важный вопрос о механизме этой подстройки, но для нашей прикладной задачи моделирования он не столь важен – модель имеет полуэмпирический характер, что вполне оправдано ее простотой с одной стороны и сложностью точной постановки гидродинамической задачи с другой.

На рисунке 13 представлены результаты расчетов картины обтекания и напряжений для $\omega = \omega_* = 2 \sin(-0.7) \approx -1.288$.

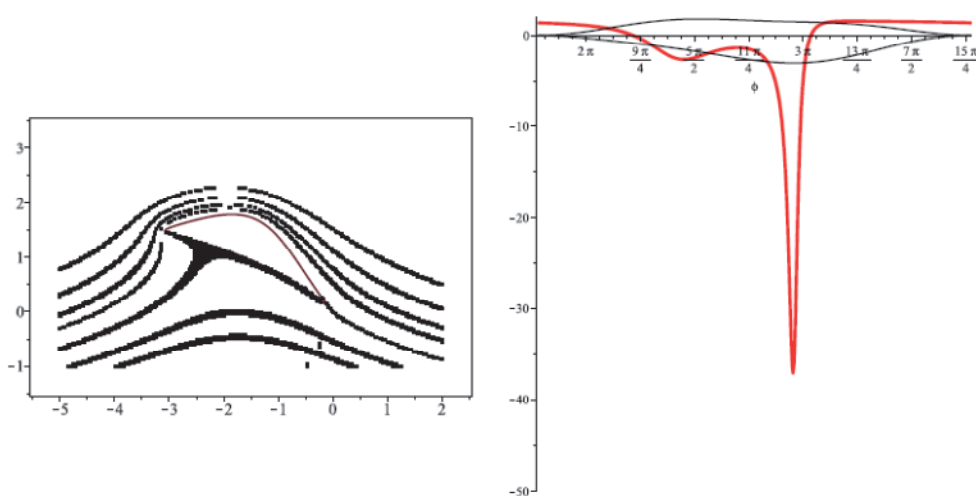


Рисунок 13 – Картина течения и распределение давления в обтекании с естественным вихрем при $\omega = \omega_* = 2 \sin(-0.7) \approx -1.288$

Как видно из рисунков цель моделирования достигнута: скорость на острие при обтекании с естественным вихрем стала регулярной (она равна нулю, т.к. одна из линий тока выходит из острия), давление на всем профиле установилось конечным с умеренным колебанием на всем его периметре, за исключением передней кромки, на которой наблюдается его конечная концентрация. Нашей ближайшей целью является вывод простых формул для ее количественного описания. Для этого необходимо подобрать простой аппроксиматор, отражающий все основные детали концентрации давления на передней кромке профиля. Несложные численные эксперименты обнаруживают, что среди относительно простых регрессионных зависимостей, содержащих небольшое число параметров, подходит следующая нелинейная трансцендентно-степенная 8-параметрическая зависимость:

$$H(x) = d + a \cdot \tanh(\alpha x) + \frac{-a\alpha x + b|x|^k + c}{1 + e \cdot |x|^n}, \quad (53)$$

которая должна описывать в окрестности точки $\varphi = \varphi_0 = 2.997$ или $x = \varphi - \varphi_0 = 0$ концентрацию давления. Эта окрестность показана на рисунке 14 слева (красная кривая).

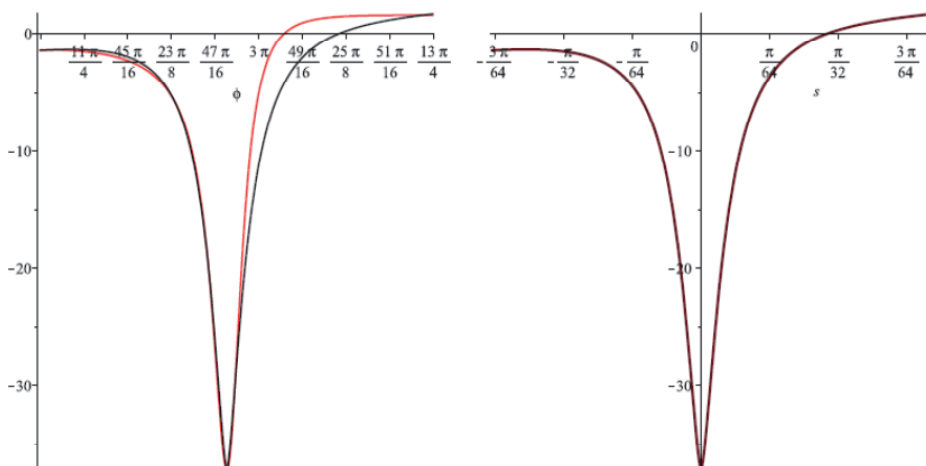


Рисунок 14 – Аппроксимация области концентрации давлений аппроксиматором (53) при $a = 3 \cdot 10^6$, $\alpha = 6 \cdot 10^{-7}$, $c = 0.5$, $b = 1350$, $k = 1.53$, $n = 1.57$, $e = 34.8$, $d = -37.646$

При указанных в подписи к рисунку параметрах зависимость (53) удовлетворительно отражает все основные закономерности области концентрации давлений (с максимальной погрешностью около 10% в правой верхней части зависимости – черная кривая на рисунке 14 слева). С учетом того, что в области передней левой кромки профиля лопатки $\dot{X}(\varphi_0) \approx 0$, а $\dot{Y}(\varphi_0) = -0.179 \approx \text{const}$, можно перейти к зависимости от более удобной переменной $s = |\dot{Y}(\varphi_0)|(\varphi - \varphi_0)$, которая по модулю равна длине дуги профиля, отсчитываемой от точки концентрации давления. Таким образом, рабочая зависимость принимает вид:

$$H(s) = -37.6 + 3 \cdot 10^6 \tanh(3.36 \cdot 10^{-6}s) + \frac{-10.1s + 18839s^{1.53} + 0.5}{1 + 520s^{1.57}}, \quad (54)$$

а ее вид представлен на рисунке 14 справа.

Разумеется, параметры зависимости (54) сложным образом зависят от параметров профиля и параметров потока и для различных форм профиля лопатки они будут варьироваться в небольших пределах. Отметим, что в нашем конкретном примере поведение давления в малой окрестности точки концентрации описывается зависимостью

$$P \sim A + Bs^{1.53}, \quad (55)$$

а в общем случае следует ожидать зависимость типа (55) с некоторой степенью $1 < k < 2$, которая зависит от отношения кривизны поверхности в точке концентрации к размеру лопатки (или к параметру R) и безразмерного параметра естественной завихренности потока ω_* .

7. Моделирование 3-мерного обтекания лопатки конечной длины

Для моделирования обтекания 3-мерной вращающейся в среде лопатки введем продольную (перпендикулярную плоскости сечений в предыдущих разделах) осевую координату ζ и запишем зависимости (38) и (40) в более общем виде:

$$z = G(w, \zeta) = w \left(1 - \frac{R(\zeta)e^{i\psi(\zeta)}}{w} \right)^{a(\zeta)} \left(1 + \frac{c(\zeta)R(\zeta)}{w} \right), \quad (56)$$

$$F(w, \zeta) = v_\infty(\zeta) \left(w + \frac{R^2(\zeta)}{w} \right) + \frac{\Gamma(\zeta)}{2\pi i} \ln w,$$

где зависимости $R(\zeta), \psi(\zeta), c(\zeta), a(\zeta), v(\zeta)$ описывают 3-мерный профиль лопасти и неоднородность набегающего потока вдоль осевой координаты ζ . Уравнение поверхности лопасти получается в виде параметрической зависимости:

$$\vec{r}_{bl} = \{\text{Re}(G_{bl}(\varphi, \zeta)), \text{Im}(G_{bl}(\varphi, \zeta)), \zeta\}, \quad (57)$$

где $G_{bl}(\varphi, \zeta) \equiv G(R(\zeta)e^{i\varphi}, \zeta)$. В совокупности два уравнения в (56) можно понимать как комплексно-параметрическую форму записи полукомплексного потенциала $F(z, \zeta)$, который теперь моделирует обтекание 3-мерного профиля лопасти (57).

В качестве примера рассмотрим следующую параметризацию формы лопасти и набегающего потока:

$$R(\zeta) = -\frac{3}{20}\zeta^2 + \frac{7}{10}\zeta^2 + \frac{1}{4}; \psi = -1 + 0.1\zeta; v_\infty = 0.1 + 0.3\zeta, \quad (58)$$

где $\zeta \in [0, 5]$, при этом оставшиеся параметры ρ, χ, a остаются постоянными и равными значениям предыдущего раздела (см. рис. 9 справа и подпись к нему). Форма моделируемой лопасти представлена на рисунке 15.

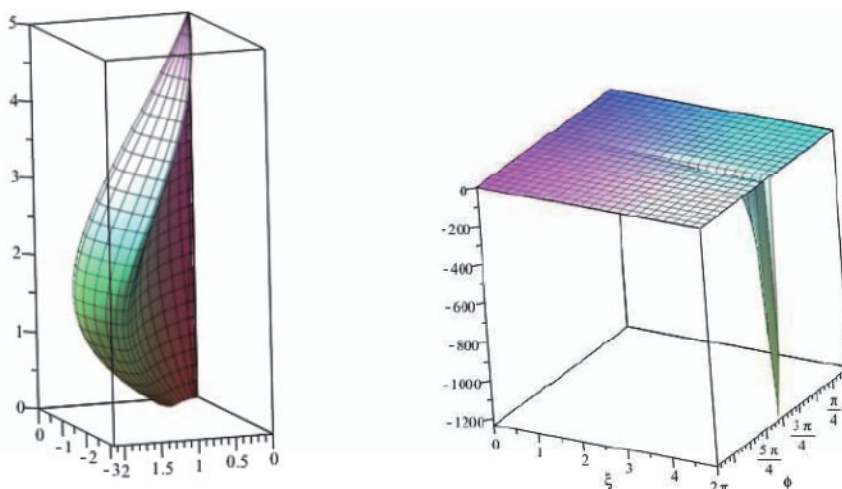


Рисунок 15 – Слева: 3-мерный профиль лопасти (58); справа: 2-мерный график распределения нормальных напряжений на поверхности лопасти как функция круговой и осевой координат φ и ζ

Зависимости (57) подобраны так, что эталонное сечение ((9) справа) с его параметрами реализуется при $\zeta = 3$. Остальные сечения получаются из него непрерывной деформацией, которая зависит от параметра ζ . Формула (47), модифицированная с учетом зависимости от ζ , приводит к обобщенной формуле для давления на поверхности лопасти:

$$p = 1.57 - \frac{1}{2} \frac{|dF(R(\zeta)e^{i\varphi}, \zeta)/d\varphi|^2}{|dG(R(\zeta)e^{i\varphi}, \zeta)/d\varphi|^2}, \quad (59)$$

где на пространственной бесконечности приняты те же значения v_∞ и p_∞ , что и в предыдущих разделах. При этом регуляризирующий вихрь Чаплыгина становится зависящим от осевой координаты ζ :

$$\frac{\Gamma_*(\zeta)}{2\pi} = \omega_*(\zeta)v_\infty(\zeta)R(\zeta) = 2 \sin(\psi(\zeta))v_\infty(\zeta)R(\zeta), \quad (60)$$

что обеспечивает регулярность картины обтекания при каждом значении ζ , то есть в каждом сечении. Это наглядно видно на рисунке 15 справа, на котором представлен результат расчета давления по формуле (59) – нормальное давление в каждой точке поверхности лопасти оказывается конечным, хотя оно заметно возрастает по модулю по мере приближения к вращающемуся концу лопасти в области выступающей в набегающий поток ее части. Увеличение напряжений на конце лопасти связано, в первую очередь, с увеличением линейной скорости вращения ее точек по мере продвижения в сторону возрастания осевой координаты. Характер концентрации напряжений на выступающей кромке лопасти можно проследить на сводном 2-мерном графике (рис. 16 слева), который представляет собой сечения зависимости 15 (справа) плоскостями $\zeta = \text{const}$.

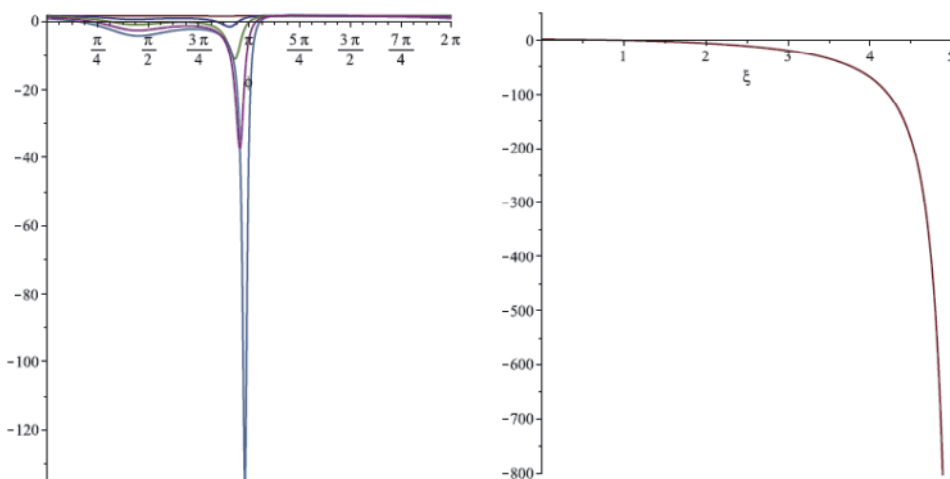


Рисунок 16 – Слева: сечения 15 (справа) плоскостями $\zeta = 0, 1, 2, 3, 4$ (глубина отрицательных пиков увеличивается с ростом ζ); справа: сечение 15 плоскостью $\zeta = 8.5 (\varphi - 2.56)$, примерно проходящей через дно ложбины 3-мерной зависимости

Как это видно из левого графика, концентрация отрицательных напряжений усиливается с увеличением ζ , но всюду остается конечной и сдвигается в

сторону увеличения φ вслед за поворотом локальных сечений лопасти. На правом графике показана зависимость концентрации напряжений от осевой координаты ζ на сечении 15, проходящем через дно ложбины, т.е. зависимость максимумов модуля напряжения на выступающих частях 2-мерных сечений лопасти от ζ . Из графика видно, что на крайней пятой части длины лопасти модуль нормальных напряжений возрастает почти в 10 раз. Это соответствует благоприятным условиям износа концевых частей лопасти, что подтверждается обширной практикой.

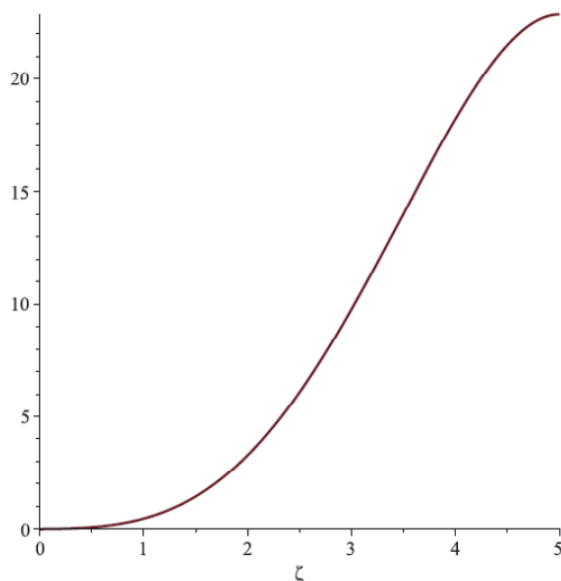


Рисунок 17 – Зависимость силы тяги (61) части лопасти от ее осевой границы

В заключение приведем зависимость подъемной силы (или правильнее, силы тяги лопасти) как функции осевой координаты ζ . Выражение для нее получается интегрированием формулы Жуковского–Кутта (36), зависящей теперь от параметра ζ (формула дает силу, приходящуюся на единицу осевой координаты):

$$F_{\text{тяг}}(\zeta) = - \int_0^{\zeta} \rho v_{\infty}(\xi) \Gamma_*(\xi) d\xi. \quad (61)$$

С учетом (58), (60) и $\rho = 1$ результат интегрирования представлен на графике 17. Как это хорошо видно из приведенного графика, основная часть тягового усилия приходится на среднюю часть лопасти: нижняя часть, примыкающая к оси, вращается медленно, а верхняя, быстро вращающаяся часть лопасти, имеет малое поперечное сечение и, соответственно, исчезающе малый вихрь.

Литература

1. Газотермическое напыление / под общей ред. Л.Х. Балдаева. М.: Маркет ДС, 2007. 344 с.
2. Гецов Л.Б. Детали газовых турбин. Л.: Машиностроение, 1982. 296 с.

3. Крымов В.В., Елисеев Ю.С., Зудин К.И. Производство лопаток газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 2002. 376 с.
4. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. М.: Металлургия, 1992. 432 с.
5. Лаврентьев М.А., Шабат Б.О. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1977. 416 с.
6. Панков В.П., Бабаян А.Л., Куликов М.В., Косой В.А., Варламов Б.С. Теплозащитные покрытия лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей // Ползуновский вестник. 2021. № 1. С. 161-172. doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.023.
7. Соляников В.А., Жужукин А.И. Прогнозирование долговечности лопаток турбин методом паузовых эквивалентных испытаний // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 6. С. 240-245.
8. Шабат Б.О. Введение в комплексный анализ. М.: Наука, 1985. 577 с.
9. Mishra N.K., Shyam Raja Puppala S.R., et al. Design and analysis of a gas turbine blade // AIP Conf. Proc. 22 May 2023. 2492 № 1. 020040. doi.org/10.1063/5.0113346.
10. Nozhnitsky Yu.A. The problem of ensuring reliability of gas turbine engines // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. 302. 012082. 10 P. doi.org/10.1088/1757-899X/302/1/012082.
11. Rao V.N.G., Kumar I.N.N., Prasad K.B., Madhulata N., Gurajrapu N. Failure mechanisms in turbine blades of a gas turbine Engine – an overview // International Journal of Engineering Research and Development e-ISSN: 2278-067X, p-ISSN: 2278-800X, www.ijerd.com. V. 10. № 8. P. 48-57. doi.org/10.4314/ijest.v6i1.5.
12. Ghoshal A., Murugan M., Barnett B., Walock M., Kerner K. Turbomachinery blade thermomechanical interface science and sandphobic coatings research // AHS 71st Annual Forum Proceedings. Virginia Beach, USA. 2015. № 4. 8 p.
13. Cernuschi F., Lorenzoni L., Capelli S., et al. Solid particle erosion of thermal spray and physical vapour deposition thermal barrier coatings // Wear. V. 271. 11-12. 2011. P. 2909-2918. doi.org/10.1016/j.wear.2011.06.013.
14. Ray A.K., Bose S.C., De P.K., Das D.K. Lifetime evaluation of a thick thermal barrier coated superalloy used in turbine blade // Materials Science and Engineering. 2010. A 527. P. 5474-5483. doi.org/10.1016/j.msea.2010.06.005.
15. Davis J.R. Handbook of thermal spray technology. ASM International, 2004. 338 p.
16. Dixit S., Kumarappa S. Thermo-mechanical analysis of thermal barrier coating system using finite element method // International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR). 2014. V. 2. 11 P. 317-324.
17. Talal A.Q., Rahman K.F. Design and analysis of a gas turbine blade // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2020. V. 7. № 11. P. 479-486.
18. Chattot J.J., Hafez M.M. Theoretical and applied aerodynamics and related numerical methods. – Dordrecht, Heidelberg, New York, London: Springer Science, 2015. 620 p. doi.org/10.1007/978-94-017-982-9.

19. Kaushik M. Theoretical and Experimental Aerodynamics. Singapore: Springer Nature, 2019. 512 p. doi.org/10.1007/978-981-13-1678-4.
20. Ravi P.A., Perera K., Pinelas S. An Introduction to Complex Analysis. – New York, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2011. 331 p. doi.org/10.1007/978-1-4614-0195-7.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Адрес редакции:
141070, Королев,
Ул. Октябрьская, 10а
Тел. (495) 543-34-31 (доб.138),
E-mail: rio-kimes@mail.ru,

Site: www.unitech-mo.ru

Подписано в печать 25.03.2024

Формат В5

Печать офсетная. Усл.печ.л. 13,0

Тираж 500 экз.

Заказ № 97-01

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