

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 – Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «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], *(не входит в Перечень ВАК);
2.5. Машиностроение [2.5.13. Проектирование конструкции и производство летательных аппаратов], *(входит в Перечень ВАК);
2.6. Химические технологии, науки о материалах, металлургия; [2.6.17. Материаловедение] *(входит в Перечень ВАК)

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.
Багдасарян А.А.
Харитонов А.А.

Адрес редакции:
141070, Королев,
Ул. Октябрьская, 10а
Тел. (495)543-34-31 (доб.138),
E-mail: rio-kimes@mail.ru,
Site: www.unitech-mo.ru

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

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Аббасова Т.С., Златов М.М.

**ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАБОЧЕГО МЕСТА.....3**

Артюшенко В.М., Воловач В.И.

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ
ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ ПРИ
ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОГЕРЕНТНОГО И
НЕКОГЕРЕНТНОГО ПРИЕМА СИГНАЛОВ
УПРАВЛЕНИЯ.....15**

Виноградов Д.Ю.

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ РАСЧЁТА
НАЧАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ
ПРОГРАММНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ УСТОЙЧИВЫХ
СОЛНЕЧНО-СИНХРОННЫХ ОРБИТ.....34**

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Истратова Е.Е., Бородина А.О.

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КИРПИЧА
НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ.....47**

Стреналюк Ю.В., Леандров И.Н.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ
КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ, ПОВЫШЕНИЕ ИХ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ПУТЁМ ВНЕДРЕНИЯ
ПРИНЦИПОВ И КОМПОНЕНТОВ
ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ СЕТИ (ЧАСТЬ 1).....59**

Суркова Л.Е., Булычева С.А.

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ
РЕГРЕССИОННОГО ТЕСТИРОВАНИЯ ПРИ
РАЗРАБОТКЕ И МОДЕРНИЗАЦИИ ПРОГРАММНОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ.....73**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Бершадский В.А.

**СПОСОБ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ
РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ
ТОПЛИВОПОДАЧИ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ
ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ В ТОПЛИВЕ.....82**

Меньшикова Л.В., Найденкова Д.М.

**ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ СЕТИ
СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ С КОСМИЧЕСКИМ
СЕКТОРОМ – ГЕОСТАЦИОНАРНЫМ
ИСКУССТВЕННЫМ СПУТНИКОМ ЗЕМЛИ.....89**

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 28.09.2022

Формат В5

Печать офсетная. Усл.печ.л. 10,5

Тираж 500 экз.

Заказ № 91-07

Отпечатано в типографии

ООО «Научный консультант»

г. Москва

Хорошевское шоссе, 35, корп. 2

Рудаков В.Б., Макаров М.И.

**ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ КОНТРОЛЯ
НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ
ТЕХНИКИ ПРИ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКЕ НА ОСНОВЕ
УЧЕТА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЕДШЕСТВУЮЩЕГО
КОНТРОЛЯ ИХ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ.....106**

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Баринков В.М., Пиирайнен В.Ю.

**НОВЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ КАК
ШИХТА ДЛЯ ПРЯМОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ЖЕЛЕЗА.....118**

Серёгин Н.Г., Сигутин И.А.

**КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЛОПАТОК ТУРБИН
АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ...128**

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

**АППРОКСИМАЦИЯ ПРОФИЛЯ СЕЧЕНИЯ ПЯТНА
НАПЫЛЕНИЯ ПРИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОМ
НАНЕСЕНИИ ПОРОШКОВОГО ПОКРЫТИЯ.....138**

УДК 004.05

Оптимизация характеристик автоматизированного рабочего места

Т.С. Аббасова, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий и управляющих систем,
М.М. Златов, магистрант кафедры информационных технологий и управляющих систем,
Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

На основе анализа структуры компании, диаграммы вариантов использования различных компонентов системы обработки поставок, представлены пути улучшения характеристик автоматизированного рабочего места сотрудника компании, занимающегося учётом сотрудников, расчётом с персоналом по оплате труда, учетом поставок и поставщиков. Исследованы характеристики программного обеспечения для автоматизированного рабочего места сотрудника и предложено создание собственного программного приложения. Проведен выбор рабочей станции с помощью критерия Гурвица.

Обработка информации, качество обработки, программное приложение.

Optimizing workstation performance

T.S. Abbasova, Candidate of technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Technologies and Control Systems,
M.M. Zlatov, Master's student of the Department of Information Technologies and Control Systems,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

Based on an analysis of the company's structure, a diagram of options for using various components of the supply processing system, ways to improve the characteristics of the automated workplace of a company employee dealing with employee accounting, payroll accounting, supply and supplier accounting are presented. The characteristics of the software for the automated workplace of an employee were studied and the creation of their own software application was proposed. The workstation was selected using the Hurwitz criterion.

Information processing, processing quality, software application.

Введение

Повышение скорости приема информации за счет разработки автомати-

зированной рабочего места (АРМ) работника компании, осуществляющего учёт сотрудников, расчёт с персоналом по оплате труда, учёт поставок и поставщиков [1, С.28]. Актуальна разработка способов выбора информационного обеспечения и характеристик технических средств поддержки АРМ, реализованного, как правило, в виде рабочей станции, основным компонентом которой является персональный компьютер [2, С.56;3, С.44]. К дополнительным компонентам относится оборудование, которое используется для установки рабочей станции, например, компьютерный стол и стул. Выбор характеристик дополнительных компонентов осуществляется с учетом хорошо известных эргономических требований [4, С.176].

Результаты исследования

Проанализирована типовая структура компании по предоставлению различных ремонтных услуг, в которой актуальны операции учёта сотрудников, расчёта с персоналом по оплате труда, учета поставок и поставщиков. Структура представлена на рисунке 1, из структуры видно, что важное место занимает отдел снабжения, сотрудником которого является менеджер.

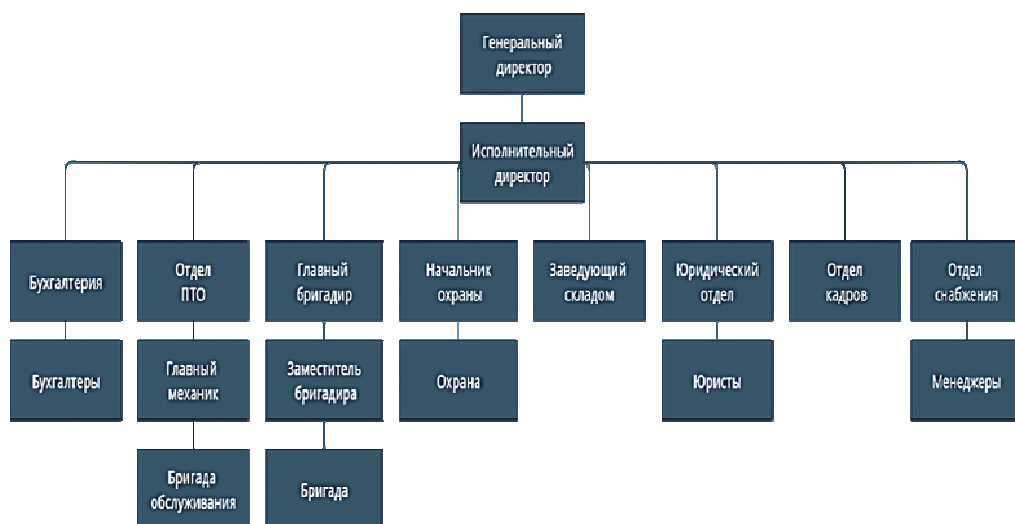


Рисунок 1 – Типовая структура компании

На рисунке 2 показаны типовые информационные процессы, протекающие в компании.

Разработка АРМ работника компании, осуществляющего учёт сотрудников, расчёт с персоналом по оплате труда, учёт поставок и поставщиков, поможет разгрузить рутинные и затратные по времени процессы и передать их на обработку информационной системе [2, С.56;3, С.12]. Перечень действий такого сотрудника отражен на диаграмме рисунка 3.

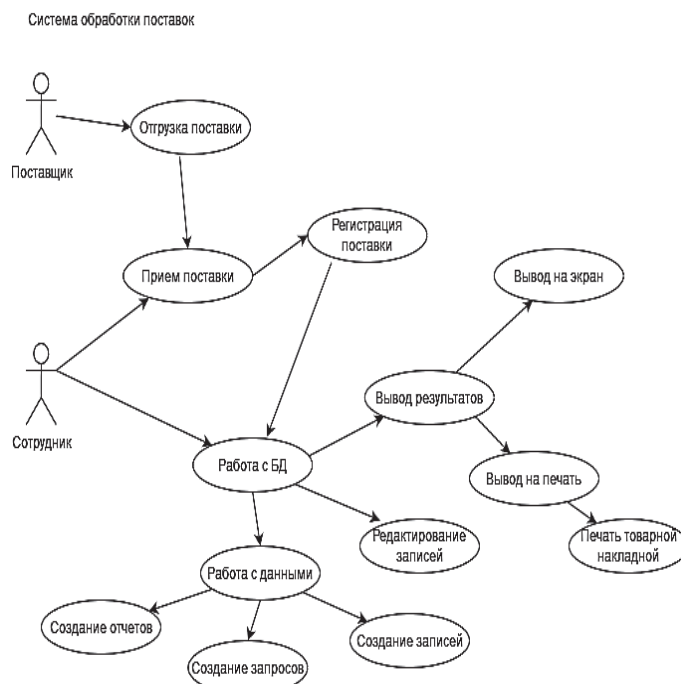


Рисунок 2 – Диаграмма вариантов использования для анализа процессов в компании



Рисунок 3 – Действия, выполняющиеся сотрудником

Исходя из вышеперечисленного, задача, требующая оптимизации – это увеличение производительности труда, с помощью создания АРМ. Для повышения производительности предлагается отказ от огромных баз в среде MS Excel в пользу работы менеджера в одной системе.

Задача автоматизации процессов в компании, заключается в уменьшении времени внесения и формирования информации о работниках, расчета оплаты труда с персоналом, расчета поставок, а также добавления информации о по-

ставщиках. В результате автоматизации минимизируется возможность внесения неверных данных в систему.

Проведем анализ входящих и исходящих документов. Входящие документы – документы, полученные учреждением. Они начинают свой путь к исполнению должностным лицом.

Документы с пометкой «личные» не открываются, а отправляются адресату. Делопроизводитель ведет учет всех полученных документов.

Главный критерий сортировки – это адресация документов. В небольших организациях все входящие документы сортирует секретарь. Чтобы помочь секретарю, создается классификатор по видам документации и вопросам деятельности, где указываются исполнители, которые курируют отдельные вопросы. Процесс первичной обработки завершается размещением документов, классифицированных по ячейкам.

Документация бывает зарегистрированной и незарегистрированной. Незарегистрированная документация и документация, которая отмечена словом «лично» отправляется по назначению. Учреждение составляет список незарегистрированных документов, который ежегодно пересматривается.

Помощники начальника проводят предварительную экспертизу документации, которая к ним поступила. Предварительное рассмотрение полученной документации нацелено на распространение документации, которая не требует обязательного рассмотрения со стороны руководителей.

После предварительной экспертизы формируются два потока документов: на адрес исполнительного директора компании и в структурные подразделения. Руководство получает документацию управляющих органов, стоящих выше, и документацию, несущую в себе самые главные вопросы по деятельности вуза. Оставшаяся документация передается начальникам структурных подразделений организации, либо непосредственно подрядным организациям.

Документы передаются руководству или подрядчикам в день их допуска на объект. Документы, которые можно зарегистрировать после того, как их рассмотрят, регистрируются и отправляются руководителю.

Рассмотрим исходящие документы. Исходящий проект документа составляется исполнителем по должностной инструкции, а уполномоченный сотрудник производит его проверку.

Отправляемую документацию делают в двух экземплярах, это не касается факсов и сообщений на телефон – они в единственном экземпляре. Как именно будет написан отправляемый документ, возможно обсудить как с сотрудниками других организаций, так и в своей организации. Обратимся к ГОСТ Р 6.30-2003, в нем сказано, что, если документация для утверждения в организации выдается с требованием «виза для утверждения документа»; отправляемый документ готовится и отправляется на подписание руководителю, а также отправляются материалы, благодаря которым он был сделан. Сотрудник в обязательном порядке прикладывает к проекту документации список компаний, куда нужно отправить

всю подписанную документацию. Право подписи на документации есть только у начальника.

Начальник организации сам решает, какие изменения вносить, что дополнять в уже подписанном документе, а также может отправить его дорабатываться. Документ подается на регистрацию, только когда начальник ставит свою подпись на всех экземплярах отправляемого документа. В «Журнал исходящих документов» обязательно вносится вся документация, которая была отправлена. Регистрационный номер документации обязательно фиксируется либо ручным способом, либо машинным, после прохождения регистрации и присвоения отправляемой документации регистрационного номера. Исходящая документация отправляется в этот же день. Вторая копия присланных документов или единственная копия факсимильного сообщения (телефонного сообщения) подшиваются в файл.

Рассмотрим внутренние документы. В данной компании готовятся и создаются внутренние документы. Переход на этапах подготовки и исполнения также организован, как и подготовка и оформление исходящих документов, и совпадает на этапе регистрации с получением документов. Особенность перемещения внутренних документов в том, что их маршруты различаются для отдельных типов документов.

Сильные стороны 1С [5, С.64]:

- 1) Всегда есть претенденты на должности в компании, где есть решения на базе «1С».
- 2) Быстро и качественно поддерживают бухгалтерские решения организации «1С».
- 3) Можно создавать, а также дообрабатывать собственные проекты, учитывая бизнес-процессы каждого предприятия.
- 4) Компания «1С» создала специальный встроенный язык программирования, который ориентирован на объекты.
- 5) Всегда можно посмотреть все готовые программные продукты «1С».

Слабые стороны:

- 1) Эту программу нужно покупать.
- 2) Настройка, внедрение и запуск сможет сделать только специально обученный «1С» программист.
- 3) Необходимо делать заказ на услуги поддержки «1С».
- 4) Необходимо платить за обновления.

Рисунок 4 демонстрирует интерфейс ERP «Галактика».

ERP «Галактика» – это очень хороший аналог «1С» [6, С.31;7, С.30]. Программа завоевала доверие в области ERP, у нее очень много отзывов, и довольных клиентов, которые всецело доверяют им автоматизацию компании. Это полная альтернатива «1С».

Дорабатывать систему можно, но очень большие затраты по времени и ресурсам. В «SAP» производят только настройку.

[illegible]

Рисунок 4 – Интерфейс ERP «Галактика»

На рисунке 5 показан интерфейс ERP «Парус». ERP «Парус» – аналог 1С, была разработана еще в 1990 году. Вмешаться могут только разработчики, самостоятельно привнести изменения невозможно, поэтому софт используется «как есть». Установка производится в базе данных «Oracle», и само лицензионное программное обеспечение довольно дорогое. Основное преимущество системы – это наличие возможности масштабируемости решений.

[illegible]

Рисунок 5 – Интерфейс ERP «Парус»

На рисунке 6 показан интерфейс «SAP». «SAP» была основана в Мангейме. «SAP» – это самая главная замена «1С». «SAP», как и другие программы, строится из модулей, которые в свою очередь, имеют разные виды назначения. Эта программа является одной из популярнейших систем в мире. В России, в ее большей части, пользуются большие компании. Так происходит из-за очень дорогой лицензии услуг (в три или даже больше раз по стоимости «1С»). У программы отличные отзывы среди ERP, решение прекрасно масштабируемое.

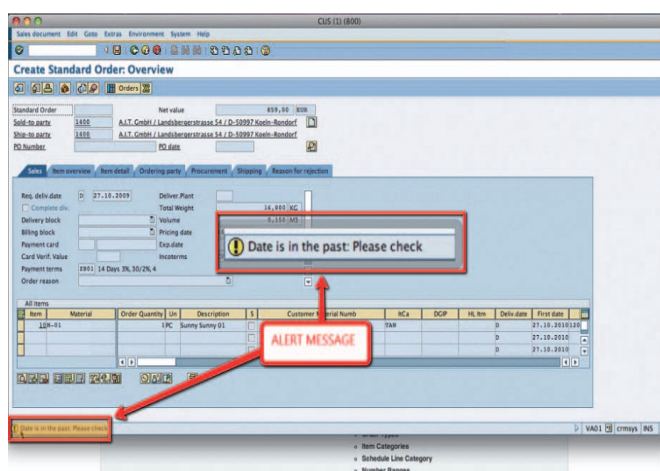


Рисунок 6 – Интерфейс ERP «SAP»

Для оценки рассмотренных систем, была составлена таблица 1, в которой каждой единице ERP-продукта были даны значения от нуля до двух (по принципу сопоставления приобретенной информации) [8, С.13;9, С.72;10, С.77]. Было принято решение о написании собственного программного приложения, так как ни одна система не удовлетворяла поставленным требованиям, в первую очередь по стоимости.

Таблица 1 – Результаты оценки существующих аналогичных систем

Критерии/Системы	1С	Галактика	Парус
Общая стоимость	2	1	0
Период внедрения	2	0	1
Период обучения сотрудников	0	1	2
Быстродействие	1	0	1
Открытый программный код	1	0	1
Русский интерфейс	1	1	1
Итого	7	3	6

Для исследования оборудования в соответствии с критерием Гурвица, параметры, по которым будет производиться исследование, были оценены по 10-тибальной шкале, где 1 –неудовлетворительно, 10 – отлично (таблица 2).

Таблица 2 – Оценка характеристик рабочих станций

Обобщенный критерий Гурвица								
Название	Средняя по рынку (руб.)	Такт. частота (Ghz)	Кол-во ядер	Частота оперативной памяти (Ghz)	Мощн. блока-питания (Вт)	Масса (кг)	Встр. видео-карта	Дискр. видео-карты
AcerVeritonX 2640GSmallFormFactor(SFF)	7	6	5	4	8	8	6	5
DELLVostro3 471SmallFormFactor(SFF)	9	5	8	6	7	6	8	5
AcerVeritonS2 660GSmallFormFactor(SFF)	5	8	5	6	6	5	7	5
DELLVostro3 470SmallFormFactor(SFF)	4	7	8	6	7	7	8	9

Применим обобщенный критерий Гурвица для поиска оптимального решения, для оптимистически и пессимистически настроенного лица, принимающего решения (ЛПР). Предлагается следующий алгоритм расчёта.

$$\begin{aligned}
 y_1 &= y_{11} + y_{21} + y_{31} + y_{41} = 7 + 9 + 5 + 4 = 25 \\
 y_2 &= y_{12} + y_{22} + y_{32} + y_{42} = 6 + 5 + 8 + 7 = 26 \\
 y_3 &= y_{13} + y_{23} + y_{33} + y_{43} = 5 + 8 + 5 + 8 = 26 \\
 y_4 &= y_{14} + y_{24} + y_{34} + y_{44} = 4 + 6 + 6 + 6 = 22 \\
 y_5 &= y_{15} + y_{25} + y_{35} + y_{45} = 8 + 7 + 6 + 7 = 28 \\
 y_6 &= y_{16} + y_{26} + y_{36} + y_{46} = 8 + 6 + 5 + 7 = 26 \\
 y_7 &= y_{17} + y_{27} + y_{37} + y_{47} = 6 + 8 + 7 + 8 = 29 \\
 y_8 &= y_{18} + y_{28} + y_{38} + y_{48} = 5 + 5 + 5 + 9 = 24
 \end{aligned} \tag{1}$$

Рассчитаем суммы y_q по столбцам упорядоченной матрицы (1) и результаты расчёта сумм сведем в таблице 3.

2) Рассчитываем сумму всех исходов

$$y = y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8. \tag{2}$$

$$y = 25 + 26 + 26 + 22 + 28 + 26 + 29 + 24 = 206.$$

Таблица 3 – Расчет суммы y_q упорядоченной матрицы (1)

Название (Xi)	Средняя цена по рынку (руб)	Тактовая частота (Ghz)	Кол-во ядер	Частота оперативной памяти (Ghz)	Мощность блока питания (Вт)	Масса (кг)	Встроенная видеокарта	Дискретные видеокарты
AcerVeritonX2640 GSmallFormFactor(SFF)	7	6	5	4	8	8	6	5
DELLVostro3471SmallFormFactor(SFF)	9	5	8	6	7	6	8	5
AcerVeritonS2660 GSmallFormFactor(SFF)	5	8	5	6	6	5	7	5
DELLVostro3470SmallFormFactor(SFF)	4	7	8	6	7	7	8	9
y_q	25	26	26	22	28	26	29	24

3) Рассчитаем коэффициенты для каждого ЛПР

а) Коэффициенты для ЛПР оптимиста:

$$\lambda_1^0 = y_{qn}/y_{\text{сум}}, \quad (3)$$

где y_{qn} – сумма упорядоченной матрицы; $y_{\text{сум}}$ – общая сумма упорядоченных матриц; λ_n^0 – коэффициент ЛПР оптимиста.

$$\lambda_1^0 = 25/206 = 0.121\lambda$$

$$\lambda_2^0 = 26/206 = 0.126\lambda$$

$$\lambda_3^0 = 26/206 = 0.126\lambda$$

$$\lambda_4^0 = 22/206 = 0.107\lambda$$

$$\lambda_5^0 = 28/206 = 0.136$$

$$\lambda_6^0 = 26/206 = 0.126$$

$$\lambda_7^0 = 29/206 = 0.141$$

$$\lambda_8^0 = 24/206 = 0.117$$

б) Коэффициенты для ЛПР пессимиста рассчитывать нет необходимости – главное, правильно поменять местами уже найденные коэффициенты, как показано на рисунке 7.

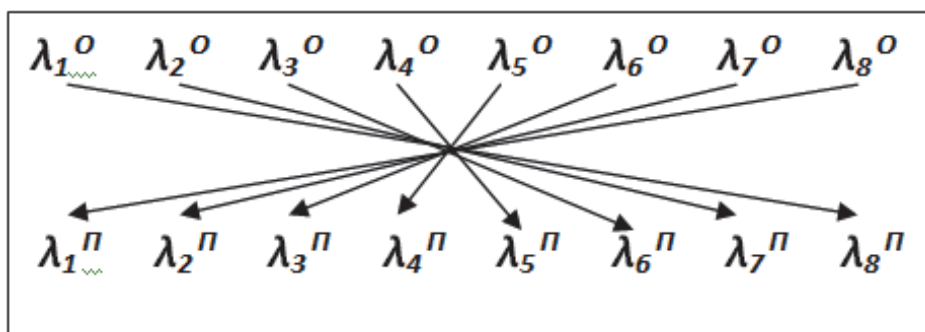


Рисунок 7 – Коэффициенты для ЛПР пессимиста

$$\lambda_8^{\Pi}=25/206=0.121\lambda$$

$$\lambda_7^{\Pi}=26/206=0.126\lambda$$

$$\lambda_6^{\Pi}=26/206=0.126\lambda$$

$$\lambda_5^{\Pi}=22/206=0.107\lambda$$

$$\lambda_4^{\Pi}=28/206=0.136$$

$$\lambda_3^{\Pi}=26/206=0.126$$

$$\lambda_2^{\Pi}=29/206=0.141$$

$$\lambda_1^{\Pi}=24/206=0.117$$

4) Рассчитываем значения обобщенного критерия Гурвица для каждого проекта для каждого ЛПР и результаты отражаем в таблице 4.

а) ЛПР-оптимист:

$$H_1^O = \lambda_1^O y_{11} + \lambda_2^O y_{12} + \lambda_3^O y_{13} + \lambda_4^O y_{14} + \lambda_5^O y_{15} + \lambda_6^O y_{16} + \lambda_7^O y_{17} + \lambda_8^O y_{18} =$$

$$= 0,121 \cdot 7 + 0,126 \cdot 6 + 0,126 \cdot 5 + 0,107 \cdot 4 + 0,136 \cdot 8 + 0,126 \cdot 8 + 0,141 \cdot 6 + 0,117 \cdot 5 = 6,1893$$

$$H_2^O = \lambda_1^O y_{21} + \lambda_2^O y_{22} + \lambda_3^O y_{23} + \lambda_4^O y_{24} + \lambda_5^O y_{25} + \lambda_6^O y_{26} + \lambda_7^O y_{27} + \lambda_8^O y_{28} =$$

$$= 0,121 \cdot 9 + 0,126 \cdot 5 + 0,126 \cdot 8 + 0,107 \cdot 6 + 0,136 \cdot 7 + 0,126 \cdot 6 + 0,141 \cdot 8 + 0,117 \cdot 5 = 6,7913$$

$$H_3^O = \lambda_1^O y_{31} + \lambda_2^O y_{32} + \lambda_3^O y_{33} + \lambda_4^O y_{34} + \lambda_5^O y_{35} + \lambda_6^O y_{36} + \lambda_7^O y_{37} + \lambda_8^O y_{38} =$$

$$= 0,121 \cdot 5 + 0,126 \cdot 8 + 0,126 \cdot 5 + 0,107 \cdot 6 + 0,136 \cdot 6 + 0,126 \cdot 5 + 0,141 \cdot 7 + 0,117 \cdot 5 = 5,9029$$

$$H_4^O = \lambda_1^O y_{41} + \lambda_2^O y_{42} + \lambda_3^O y_{43} + \lambda_4^O y_{44} + \lambda_5^O y_{45} + \lambda_6^O y_{46} + \lambda_7^O y_{47} + \lambda_8^O y_{48} =$$

$$= 0,121 \cdot 4 + 0,126 \cdot 7 + 0,126 \cdot 8 + 0,107 \cdot 6 + 0,136 \cdot 7 + 0,126 \cdot 7 + 0,141 \cdot 8 + 0,117 \cdot 9 = 7,091$$

б) ЛПР-пессимист:

$$H_1^{\Pi} = \lambda_1^{\Pi} y_{11} + \lambda_2^{\Pi} y_{12} + \lambda_3^{\Pi} y_{13} + \lambda_4^{\Pi} y_{14} + \lambda_5^{\Pi} y_{15} + \lambda_6^{\Pi} y_{16} + \lambda_7^{\Pi} y_{17} + \lambda_8^{\Pi} y_{18} =$$

$$= 0,117 \cdot 7 + 0,141 \cdot 6 + 0,126 \cdot 5 + 0,136 \cdot 4 + 0,107 \cdot 8 + 0,126 \cdot 8 + 0,126 \cdot 6 + 0,121 \cdot 5 = 6,0631$$

$$H_2^{\Pi} = \lambda_1^{\Pi} y_{21} + \lambda_2^{\Pi} y_{22} + \lambda_3^{\Pi} y_{23} + \lambda_4^{\Pi} y_{24} + \lambda_5^{\Pi} y_{25} + \lambda_6^{\Pi} y_{26} + \lambda_7^{\Pi} y_{27} + \lambda_8^{\Pi} y_{28} =$$

$$= 0,117 \cdot 9 + 0,141 \cdot 5 + 0,126 \cdot 8 + 0,136 \cdot 6 + 0,107 \cdot 7 + 0,126 \cdot 6 + 0,126 \cdot 8 + 0,121 \cdot 5 = 6,6990$$

$$H_3^{\Pi} = \lambda_1^{\Pi} y_{31} + \lambda_2^{\Pi} y_{32} + \lambda_3^{\Pi} y_{33} + \lambda_4^{\Pi} y_{34} + \lambda_5^{\Pi} y_{35} + \lambda_6^{\Pi} y_{36} + \lambda_7^{\Pi} y_{37} + \lambda_8^{\Pi} y_{38} =$$

$$= 0,117 \cdot 5 + 0,141 \cdot 8 + 0,126 \cdot 5 + 0,136 \cdot 6 + 0,107 \cdot 6 + 0,126 \cdot 5 + 0,126 \cdot 7 + 0,121 \cdot 5 = 5,9175$$

$$H_4^{\Pi} = \lambda_1^{\Pi} y_{41} + \lambda_2^{\Pi} y_{42} + \lambda_3^{\Pi} y_{43} + \lambda_4^{\Pi} y_{44} + \lambda_5^{\Pi} y_{45} + \lambda_6^{\Pi} y_{46} + \lambda_7^{\Pi} y_{47} + \lambda_8^{\Pi} y_{48} =$$

$$= 0,117 \cdot 4 + 0,141 \cdot 7 + 0,126 \cdot 8 + 0,136 \cdot 6 + 0,107 \cdot 7 + 0,126 \cdot 7 + 0,126 \cdot 8 + 0,121 \cdot 9 = 7,0097$$

**Таблица 4 – Результаты обобщенного критерия Гурвица
для каждого проекта для каждого ЛПР**

X_n	ЛПР-оптимист	ЛПР «Пессимист»
X_1	6,1893	6,0631
X_2	6,7913	6,6990
X_3	5,9029	5,9175
X_4	7,0291	7,0097

5) Сравниваем полученные значения обобщенного коэффициента Гурвица. Оптимальными для каждого ЛПР являются проекты с максимальным значением критерия:

ЛПР-оптимист:

$$7,0291 > 6,7913 > 6,1893 > 5,9029 \Rightarrow H_4^0 > H_2^0 > H_1^0 > H_3^0 \Rightarrow X^* = X_4$$

ЛПР-пессимист:

$$7,0097 > 6,6990 > 6,0631 > 5,9175 \Rightarrow H_4^0 > H_2^0 > H_1^0 > H_3^0 \Rightarrow X^* = X_4$$

В результате применения обобщенного критерия Гурвица, для оптимистичного и для пессимистичного ЛПР, оптимальным вариантом является четвертая рабочая станция DELL Vostro 3470 SmallFormFactor(SFF).

Выводы

Предложен проект для широкого спектра компаний, занимающихся предоставлением различных услуг в области ремонта оборудования, который может автоматизировать и облегчить работу менеджеров компании, осуществляющих учёт работников, расчёты с работниками компании по оплате выполненной работы, учёт поставок и поставщиков.

Вместо множественного составления документов предложено программное приложение, осуществляющее комплексный подход к операциям учета. Основное преимущество предлагаемого приложения для автоматизированного рабочего места сотрудника – простота и удобство использования, им может пользоваться даже неквалифицированный пользователь. Программное приложение очень легкое в установке: просто нужно поместить папку с файлами в любой каталог на жестком диске.

Выбрано активное и пассивное сетевое оборудование для улучшения характеристик автоматизированного рабочего места. Рабочая станция и коммутатор были подобраны с помощью обобщенного критерия оптимальности Гурвица, что позволило для оптимистического и пессимистического исхода выбрать оптимальный вариант.

Литература

1. Артюшенко В.М., Семенов А.Б., Аббасова Т.С. Пути наращивания эффективности инфокоммуникационных систем: монография / под научной редакцией А.Б. Семенова. М.: Научный консультант, 2019. 126 с.
2. Аббасова Т.С. Задачи оптимизации инфокоммуникационных систем // Информационно-технологический вестник. 2018. № 3(17). С. 55-65.
3. Аббасов Э.М., Польшин С.Н. Повышение производительности больших баз данных и действующих на их основе прикладных сервисов // Информационно-технологический вестник. 2020. №1(23). С.42-54.
4. Shachshanova M., Eskendir B. Workplace ergonomics is an important aspect of human-computer interaction and human health // Актуальные проблемы современности. 2019. № 4(26). С. 174-177.
5. Абдувасиева З.С. Анализ возможностей системы 1С: предприятие // Вестник университета (Российско-Таджикский (Славянский) университет). 2018. № 3(63). С. 64-73.
6. Lashchenov R.P. ERP-systems and their impact on modern business // Российская наука и образование сегодня: проблемы и перспективы. 2020. № 1(32). С. 29-32.
7. Жилин А. ERP-системы сегодня: кризис жанра или новые возможности? // БИТ. Бизнес & Информационные технологии. 2021. № 1(104). С. 28-31.
8. Бардасова Э.В. Импортзамещение при реализации проектов в сфере услуг по цифровизации бизнес-процессов // Управление устойчивым развитием. 2019. № 5(24). С. 12-16.
9. Artyushenko V.M., Abbasova T. S. Increasing the efficiency of satellite communication systems by optimizing the parameters of the ground stations // Radioengineering. 2015. № 2. P. 69-75.
10. Artyushenko V.M., Abbasova T. S., Kucherov B.A. Creating cellular networks in rural areas with the largest coverage area // Radioengineering. 2015. № 2. P. 76-82.

УДК 621.396.96:621.26

**Системный анализ методов помехоустойчивого кодирования
при использовании когерентного и некогерентного
приема сигналов управления**

В.М. Артюшенко, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационных технологий
и управляющие системы,

Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области

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

В.И. Воловач, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Информационный и электронный сервис»,
Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования,
Поволжский государственный университет сервиса, г. Тольятти

Осуществлен системный анализ методов помехоустойчивого кодирования при использовании когерентного и некогерентного приема.

Помехоустойчивое кодирование, когерентный и некогерентный прием, вероятность ошибки, длина кодовой последовательности.

System analysis of noise-resistant coding methods when using coherent and incoherent reception of control signals

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

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

A system analysis of noise-resistant coding methods using coherent and incoherent reception has been carried out.

Noise-resistant coding, coherent and incoherent reception, error probability, length of the code sequence.

Проведем сравнительный анализ методов помехоустойчивого кодирования при использовании когерентного и некогерентного приема сигналов управления

ления [1-4].

Сравнительный анализ помехоустойчивого кодирования сигналов при когерентном приеме.

Коды Бауэра. Рассмотрим коды Бауэра, для которых вероятность не обнаружения ошибок P_{HO} оценивается как:

$$P_{HO} = \{C_{n/2}^2 P_0^2 (1 - P_0)^{0.5n-2}\}^2, \quad (1)$$

где: P_0 – вероятностью ошибки на бит; n – длина кодовой последовательности.

На рисунке 1 представлены графики P_{HO} позволяющие, задаваясь величиной вероятности не обнаружения ошибки на кодовое слово $P_{HO,кc}$ и вероятностью ошибки на бит P_0 оценить требуемую длину кодовой последовательности L .

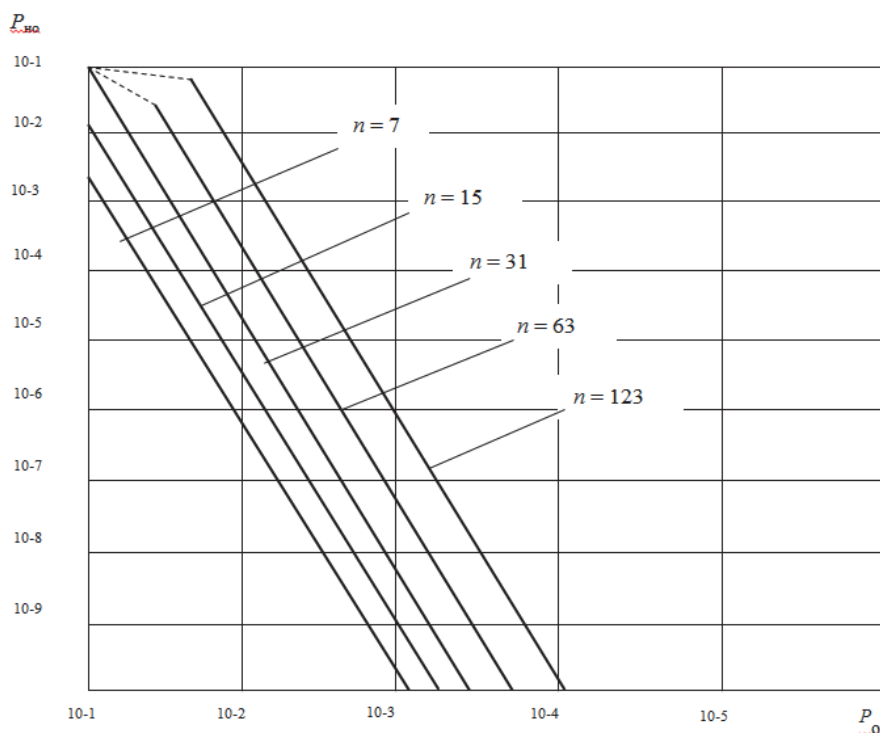


Рисунок 1 – Зависимость $P_{HO} = f(P_0)$, при различных значениях n

Из представленных зависимостей видно, что с увеличением длины кодовой последовательности L , для достижения требуемой величины P_{HO} , вероятность P_0 должна быть увеличена.

Так как, P_0 однозначно определяется величиной $ОСП_{вх}$ (отношение сигнал/помеха на входе) для заданного типа приема (когерентного или некогерентного) и вида вторичной модуляции, можно перейти к более удобным зависимостям $P_{HO} = f(ОСП_{вх})$.

На рисунке 2 представлены зависимости для оценки помехоустойчивости

передачи сигналов при применении помехоустойчивого кодирования, при когерентном приеме, для двоичной фазовой модуляции (ФМ2), когда P_0 находится по выражению

$$P_{0, \text{ФМ2}} = \frac{1}{2} [1 - \Phi[\sqrt{2\text{ОСП}_{\text{вх}} L}]] \quad (2)$$

где $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt$.

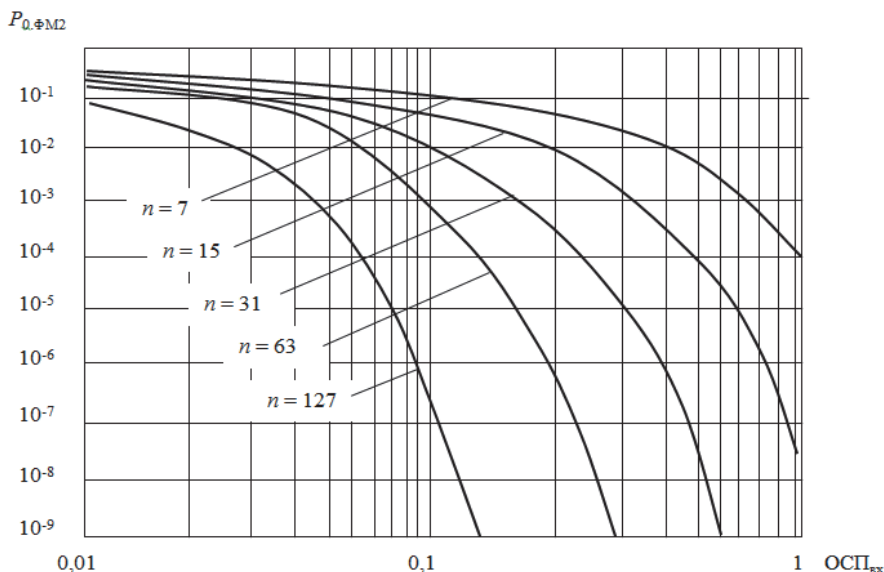


Рисунок 2 – Зависимость $P_{0, \text{ФМ2}} = f(\text{ОСП}_{\text{вх}})$, при различных значениях n

В этом случае, оценку эффективности кодов Бауэра, вероятность необнаружения ошибки кодового слова которых $P_{\text{НО}}$, определяется формулой (1), можно определить из зависимостей, представленных на рисунке 3.

Из представленных зависимостей видно, что если допустимая величина ОСП составляет 0,1 (10 дБ), то для достижения вероятности ошибки на кодовое слово $P_{\text{НО}} = 10^{-5}$ требуется длина ПСП $L = 31$, а в случае $P_{\text{НО}} = 10^{-9}$ величина L должна быть равной уже 63.

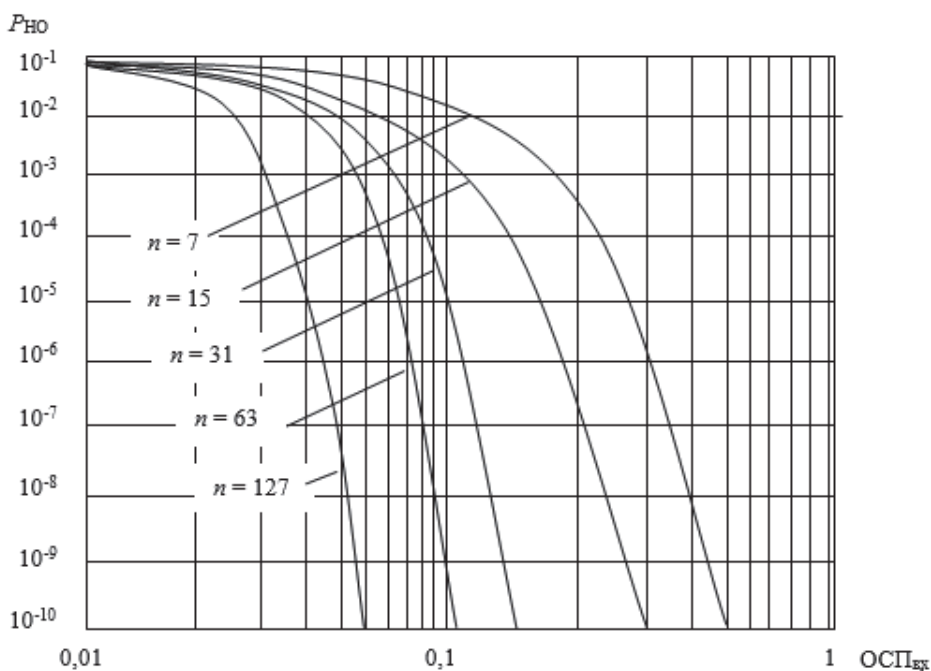


Рисунок 3 – Зависимость $P_{НО} = f(ОСП_{вх})$, при различных значениях n

Коды с проверкой на четность. Проведем расчет вероятности не обнаружения ошибки в кодовом слове $P_{НО,кч}$ для кодов с проверкой на четность, воспользовавшись выражением:

$$P_{НО} = C_n^2 P_0^2 (1 - P_0)^{n-2}.$$

В результате расчетов получим зависимости, представленные на рисунке 4.

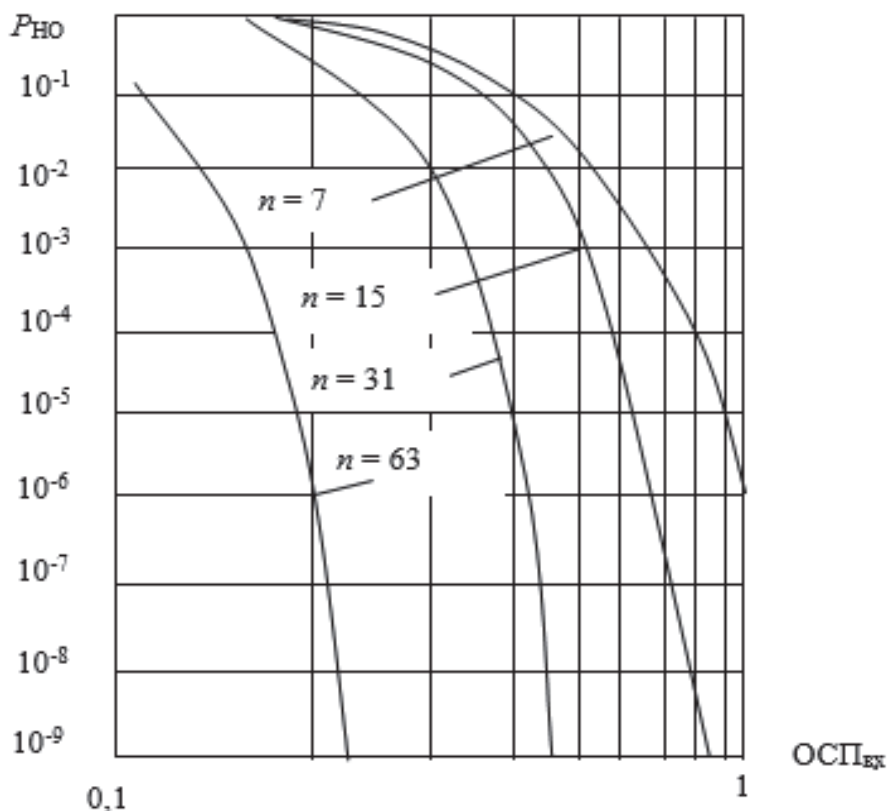


Рисунок 4 – Зависимость $P_{НО} = f(\text{ОСП}_{вх})$, при различных значениях L

Из представленных на рисунке 4 графиков видно, что при заданной вероятности $P_{НО.кс} = 10^{-9}$ и $\text{ОСП}_{вх} = 0,4 \dots 0,8$ с допустимой длиной кодовой последовательности $15 \dots 31$ величина требуемого $\text{ОСП}_{вх}$ должна быть больше 5 дБ. Следовательно, коды с проверкой на четность не удовлетворяют условиям помехоустойчивости передачи сигналов по занятым телекоммуникационным каналам.

Циклические коды. Рассчитаем вероятность не обнаружения ошибки в кодовом слове $P_{НО.кс}$, для циклических кодов (n, k, r) : где n – длина кодовой последовательности; k – количество информационных символов; r – исправляющая способность. Воспользовавшись выражением

$$P_{НО} = \sum_{i=r+1}^n C_n^i P_o^i (1 - P_o)^{n-i}, \quad (3)$$

где $C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!}$ оценим вероятность не обнаружения ошибки в ко-

довом слове при использовании корректирующего кодирования вида (n, k, r) . Значения величины P_o рассчитаем по формуле (2).

Результаты полученных вычислений для различных значений параметров кодирующих кодов (n, k, r) представлены на рисунке 5.

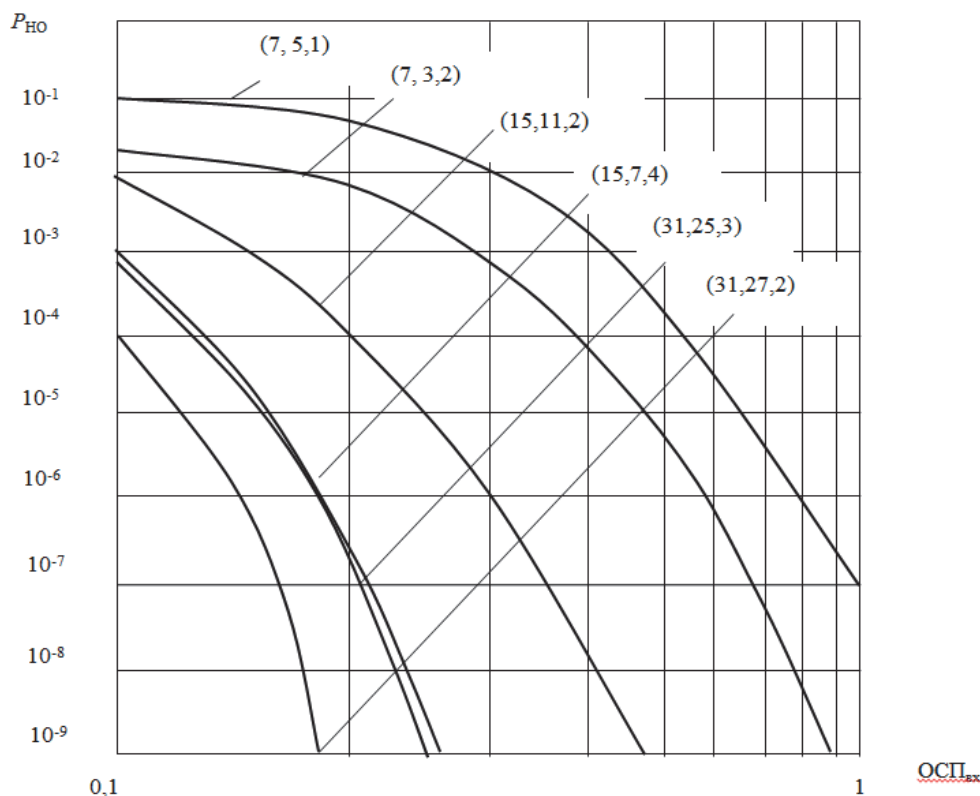


Рисунок 5 – Зависимость $P_{НО} = f(ОСП_{вх})$, при различных значениях (n, k, r)

Из графиков, представленных на рисунке 5 видно, что применение циклических кодов гораздо эффективнее, чем помехоустойчивое кодирование при когерентном приеме, при тех же условиях.

Коды Абрамсона. Для кода Абрамсона вероятность не обнаружения ошибок может быть найдена, исходя из выражения

$$P_{НО} = \frac{1 + (1 - 2P_o)^n + 2n(1 - P_o)(1 - 2P_o)^{\frac{n-1}{2}}}{2(n+1)} - (1 - P_o)^n. \quad (4)$$

Воспользовавшись выражением (4) рассчитаем вероятности не обнаружения ошибки в кодовом слове для кодов Абрамсона.

Результаты данных расчетов представлены на рисунке 6, из которых видно, что допустимая длина последовательности составляет 31 или 63 и более.

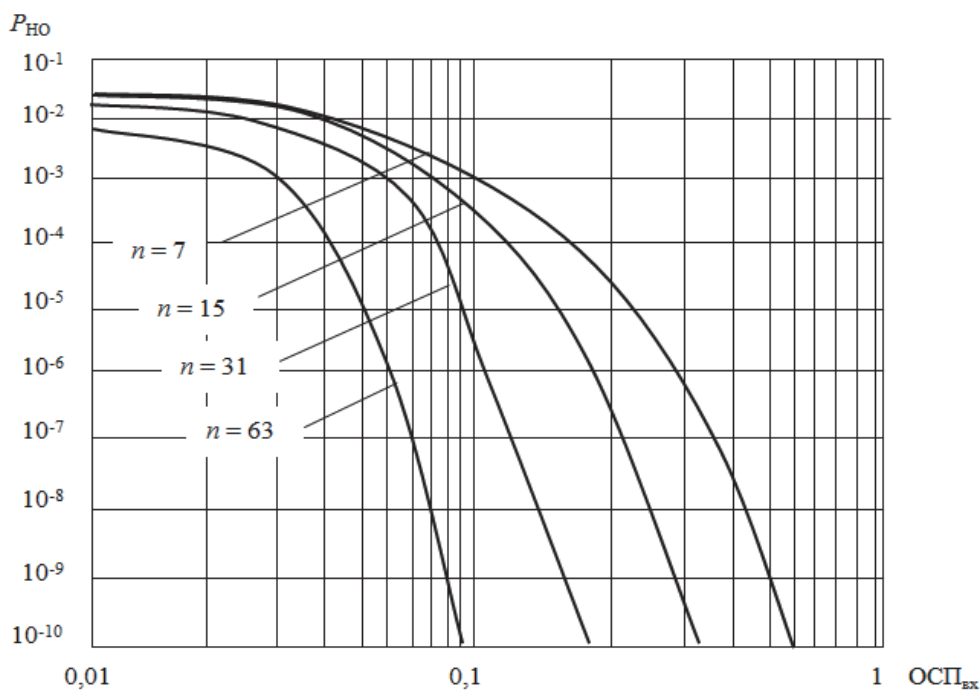


Рисунок 6 – Зависимость $P_{НО} = f(ОСП_{вх})$, при различных значениях n , для кодов Абромсона

На рисунке 7 представлены результаты расчетов требуемой длины псевдослучайной последовательности (ПСП) и ОСП для заданной достоверности передачи информации при применении помехоустойчивого кодирования кодами Абромсона.

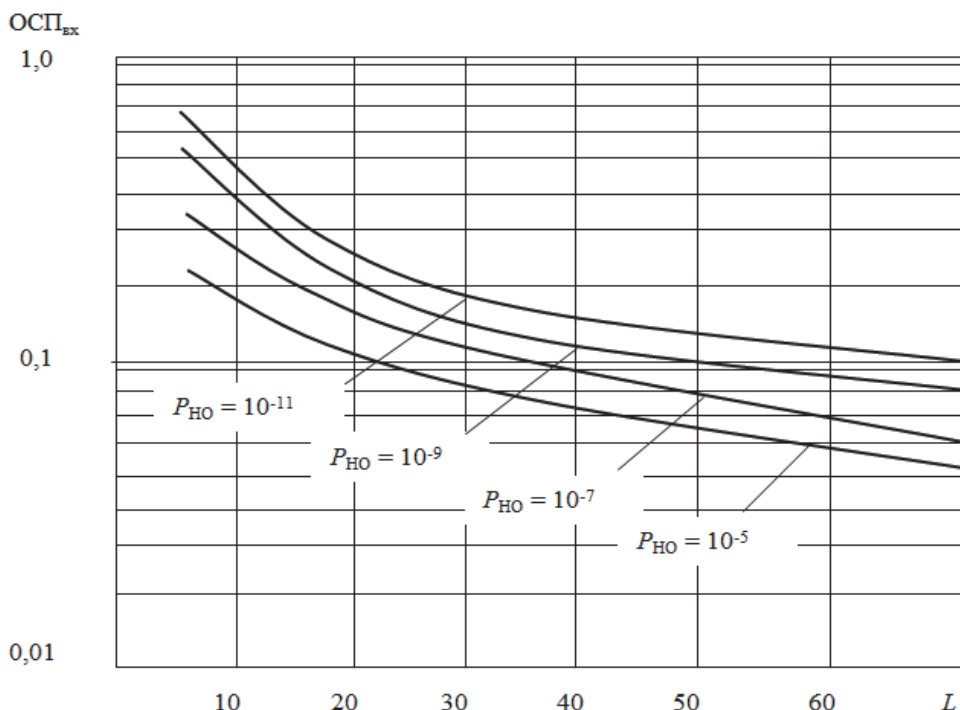


Рисунок 7 – Зависимость $ОСП_{вх} = f(L)$, при различных значениях $P_{НО}$, для кодов Абромсона

Коды с повторением кодовых комбинаций. Проведем расчет вероятности не обнаружения ошибки для кодов с повторением кодовых комбинаций

$$P_{0.повт.N} = \sum_{i=1}^N C_N^i P_o^i (1 - P_o)^{N-i}, \quad (5)$$

где P_o определяется из выражения (2).

Результаты полученных вычислений представлены на рисунке 8.

Результаты расчетов требуемой длины ПСП и ОСП для заданной достоверности передачи информации, при применении помехоустойчивого кодирования с помощью повторения кодовых комбинаций, представлены на рисунке 9.

Сравнительный анализ помехоустойчивого кодирования при когерентном приеме показывает, что при достоверности ошибки на кодовое слово 10^{-5} и ОСП = 10 дБ длина ПСП должна выбираться в пределах 15-31. При этом скорость передачи информации по телекоммуникационному каналу лежит в диапазоне 1,0-2,0 кБит/с.

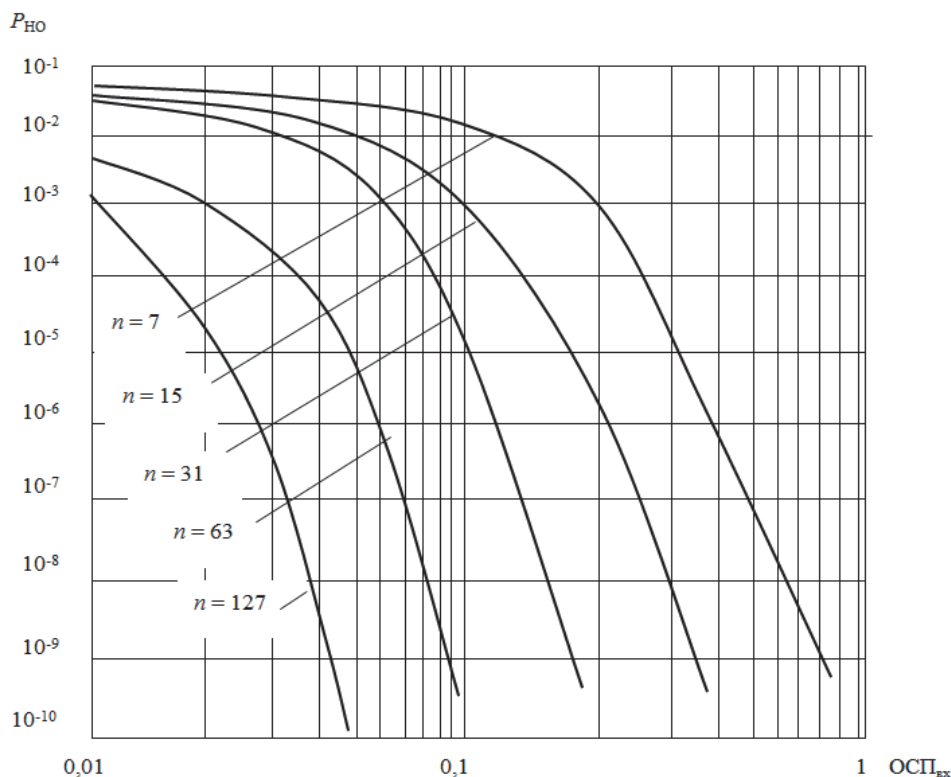


Рисунок 8 – Зависимость $P_{НО} = f(\text{ОСП}_{ВХ})$, при различных значениях n , для кодов с повторением кодовых комбинаций

Если требуемая достоверность передачи сигналов по занятому телекоммуникационному каналу должна быть меньше 10^{-9} , то следует использовать ПСП с длиной не менее 63. Однако следует отметить, что в этом случае скорость передачи информации значительно падает, и будет составлять менее 500 бит/с.

Сравнительный анализ помехоустойчивого кодирования сигналов при некогерентном приеме.

Коды Бауэра. Воспользовавшись выражением (1) оценим вероятность не обнаружения ошибки в кодовом слове, для кодов Бауэра, в случае некогерентного приема, когда:

$$\text{ОСП}_{ВЫХ} = \text{ОСП}_{ВХ} n;$$

$$\text{ОСП}_{ВХ} = P_c / \sigma_{n.ВХ}^2;$$

$$P_o \cong 1/2 \exp \{- \text{ОСП}_{ВЫХ} / 2 \}.$$

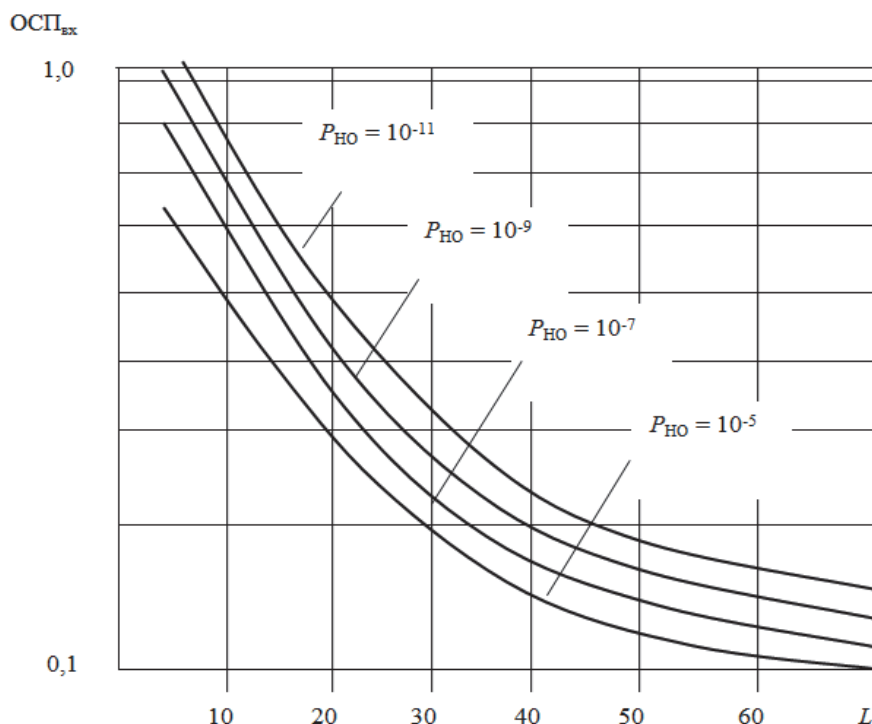


Рисунок 9 – Зависимость $ОСП_{вх} = f(L)$, при различных значениях $P_{НО}$, для кодов с повторением кодовых комбинаций

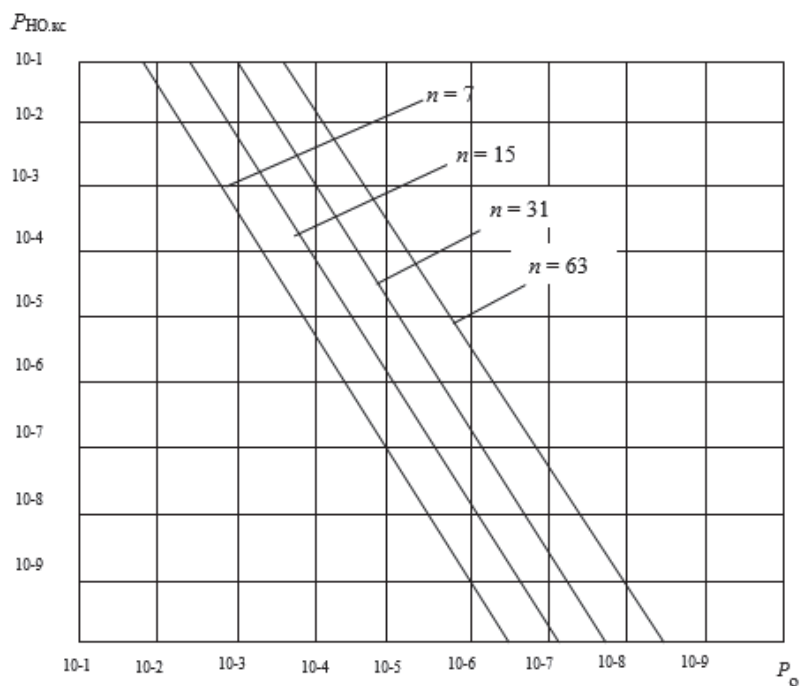
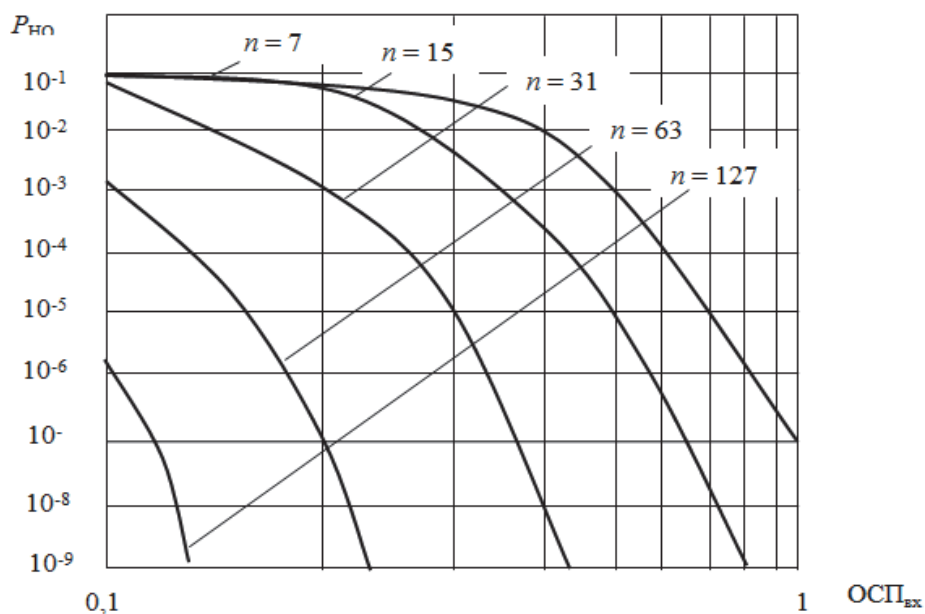
В результате проведенных вычислений были получены зависимости, представленные на рисунке 10.

Из представленных зависимостей видно, что в отличие от когерентного приема требуемая длина ПСП значительно возрастает, и для допустимого ОСШ = 10 дБ составляет уже $L = 127$.

Коды с проверкой на четность. Оценим вероятность не обнаружения ошибки $P_{НО.кч}$ для кодов с проверкой на четность, воспользовавшись выражением:

$$P_{НО} = C_n^2 P_0^2 (1 - P_0)^{n-2}.$$

На рисунке 11 представлены зависимости $P_{НО.кч}$ от P_0 , полученные для различных значений n .



Анализ представленные на рисунке 11 зависимостей показывает, что, например, для обеспечения $P_{\text{НО.КС}} = 10^{-9}$ вероятность ошибки элемента ПСП должна быть в пределах 10^{-8} - 10^{-6} .

Из графиков, представленных на рисунке 12 видно, что, например, для обеспечения $P_{\text{НО.КС}} = 10^{-9}$ при $\text{ОСП}_{\text{ВХ}}$ меньше 1, что необходимо для сохранения высокой разборчивости разовых сообщений (РС) при одновременной передаче с речью системы разовых сообщений (СРС), требуется, чтобы длина кодовой последовательности была больше 127.

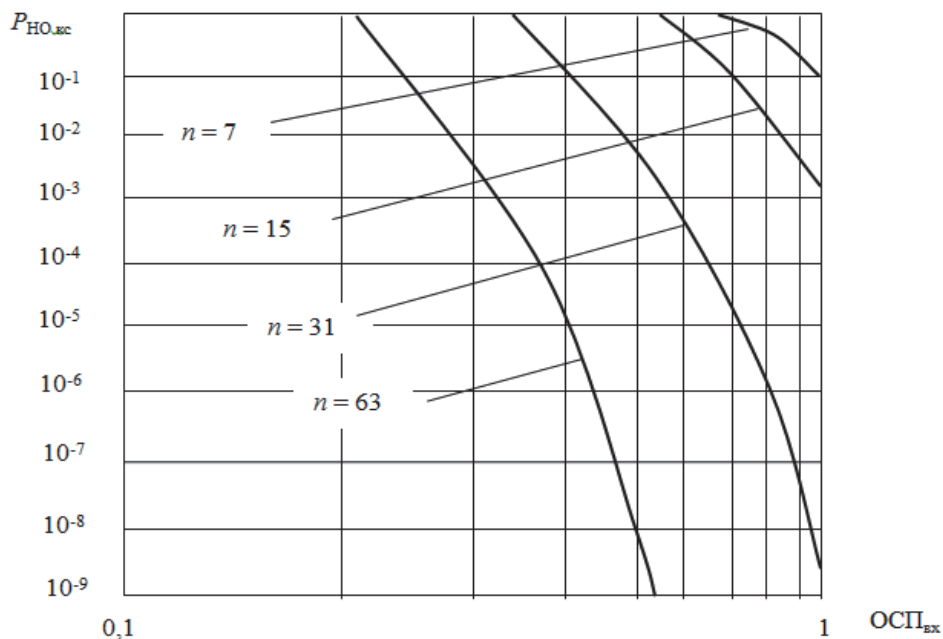


Рисунок 12 – Зависимость $P_{\text{НО.КС}} = f(\text{ОСП}_{\text{ВХ}})$, для различных значениях n , кодов с проверкой на четность при некогерентном приеме

Воспользовавшись полученными ранее результатами, получим оценки требуемой длины ПСП и ОСП для заданной достоверности передачи информации с использованием кодов с проверкой на четность при некогерентном приеме, приведенные на рисунке 13.

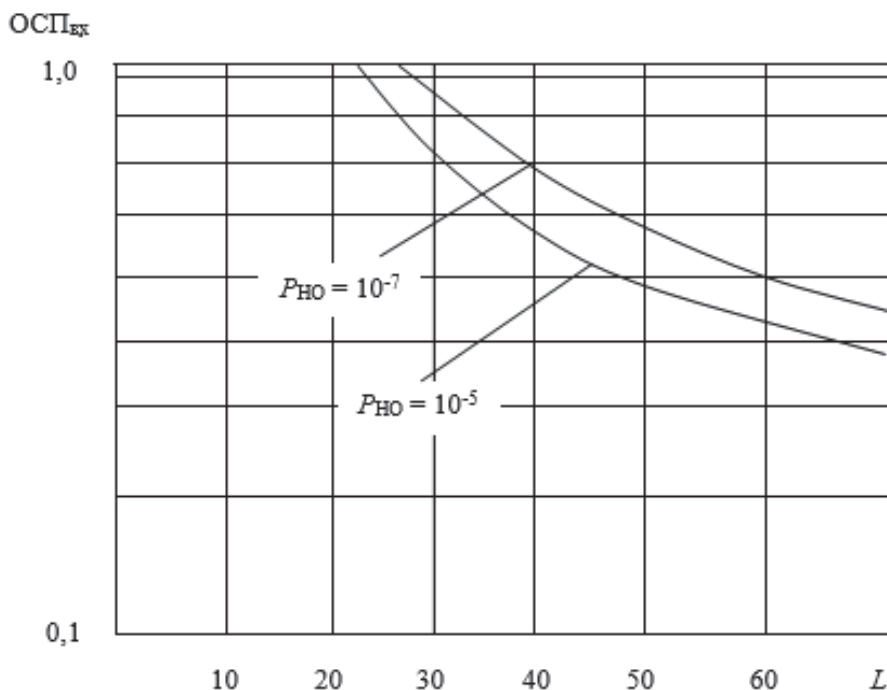


Рисунок 13 – Зависимость $ОСП_{вх} = f(L)$, при различных значениях $P_{НО}$, для кодов с проверкой на четность при некогерентном приеме

Циклическое кодирование. Воспользовавшись выражением (3) оценим вероятность ошибки кодового слова $P_{НО.кc}$ при использовании циклических кодов (n, k, r) для некогерентного приема. В результате проведенных вычислений были получены зависимости $P_{НО.кc} = f(P_o)$, для различных значений (n, k, r) , представленные на рисунке 14.

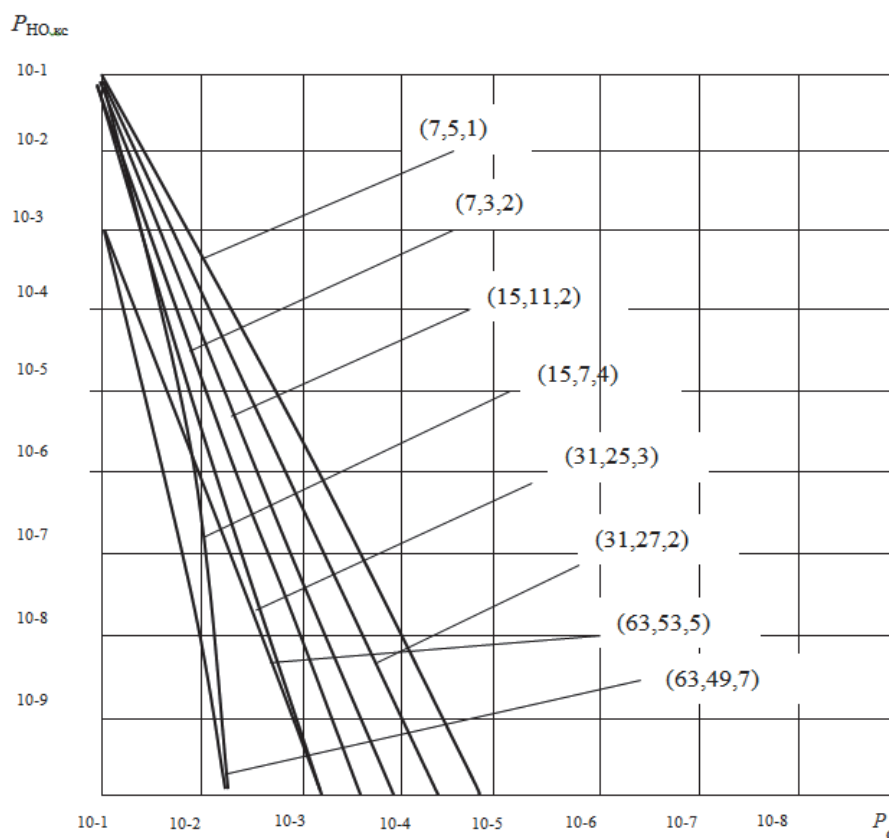


Рисунок 14 – Зависимости $P_{НО.кc} = f(P_0)$, для различных значений (n, k, r) при некогерентном приеме

Из представленных зависимостей видно, что при некогерентном приеме только при вероятности ошибки на бит $P_0 = 10^{-5}$ удастся получить $P_{НО.кc}$ меньше, чем 10^{-10} , для кодовых последовательностей длиной $L = 7, 15, 31$.

На рисунке 15 представлены графики зависимостей $P_{НО.кc} = f(ОСП_{вх})$ из которых видно, что при применении избыточного кодирования, для случая, когда $ОСП_{вх} = 0,1$, а $L = 63$, вероятность не обнаружения ошибки кодового слова лежит в диапазоне 10^{-5} - 10^{-4} в зависимости от числа корректирующих бит.

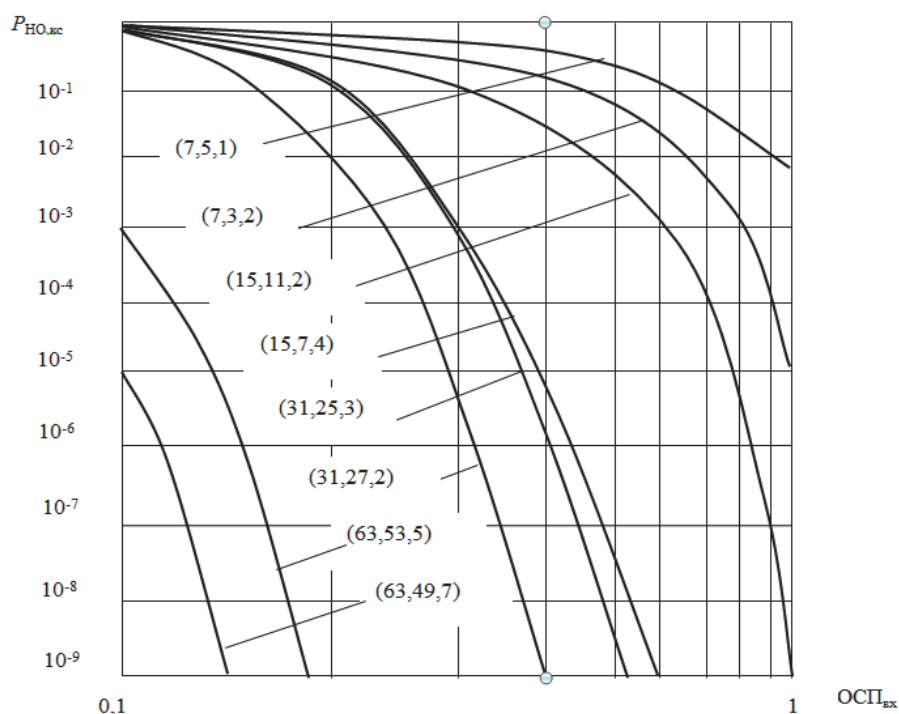


Рисунок 15 – Зависимости $P_{НО,кс} = f(ОСП_{вх})$ для различных значений (n, k, r) при некогерентном приеме

Меньшие длины кодовой последовательности дают уже неудовлетворительные результаты, для которых величина вероятности не обнаружения ошибки превышает 10^{-4} - 10^{-3} , что является явно недостаточным.

Коды Хемминга. Для кода Хэмминга вероятность не обнаружения ошибок может быть найдена, исходя из выражения

$$P_{НО} = \frac{1}{2^m} - (1 - P_o)^{2^{m-1}} + \frac{2^m - 1}{2^m} (1 - 2P_o)^{2^{m-1}}, \quad (6)$$

где $m = n - k$ – число проверочных символов.

Воспользовавшись выражением (6) определим вероятность не обнаружения ошибки для кодов Хемминга. Результаты произведенных расчетов представлены на графиках рисунков 16 и 17.

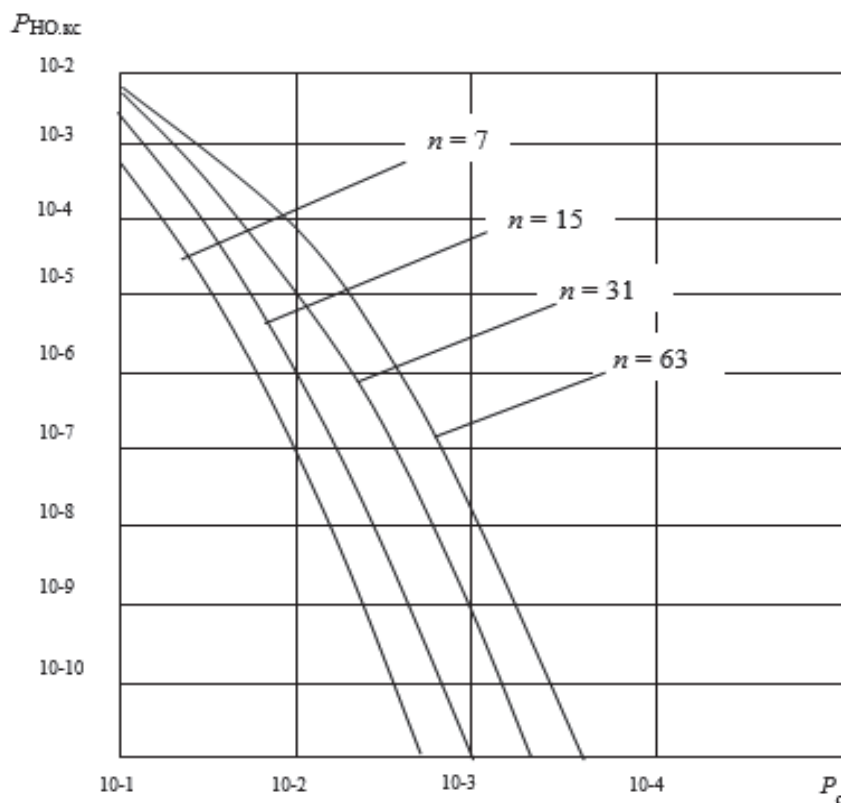


Рисунок 16 – Зависимости $P_{НО.кc} = f(P_o)$, для различных значений n для кодов Хемминга

Из графиков, представленных на рисунке 17 видно, что оценить требуемую длину кодовой последовательности можно задаваясь значениями $P_{НО.кc}$ и $ОСП_{вх}$. Так при

$P_{НО.кc} = 10^{-3}$ и $ОСП_{вх} = 0,1$ длина кодовой последовательности будет равна 63.

Повторение кодовых комбинаций. Воспользовавшись формулой (5), оценим эффективность повторения кодовых комбинаций, когда

$$ОСШ_{ввых} = ОСП_{вх}n,$$

$$ОСП_{вх} = P_c / \sigma_{п.вх}^2,$$

$$P_o \cong 1/2 \exp\{-ОСШ_{ввых}/2\}.$$

Зависимости, полученные в результате вычислений, представлены на рисунке 18.

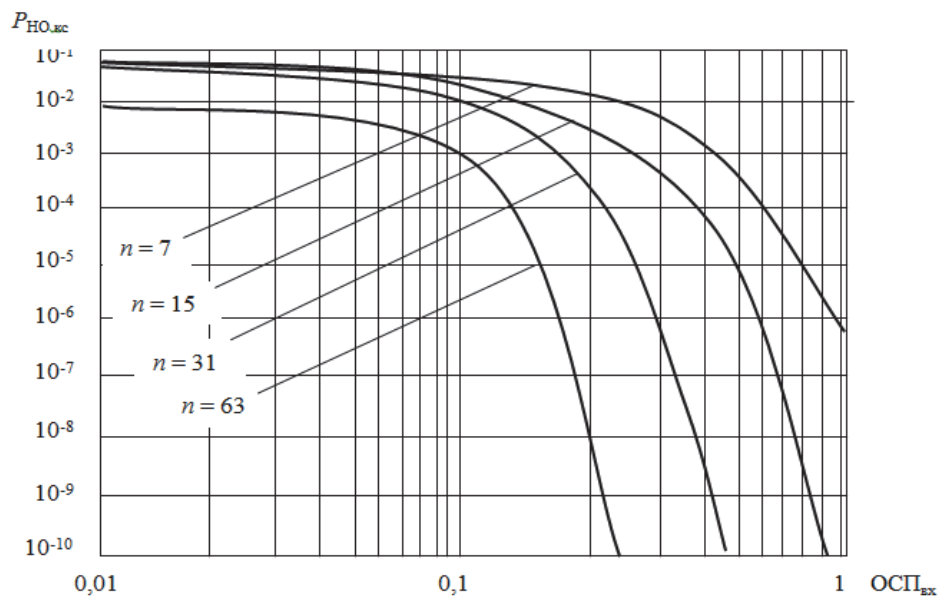


Рисунок 17 – Зависимость $P_{HO,kc} = f(OСП_{вх})$, при различных значениях n , для кодов Хемминга

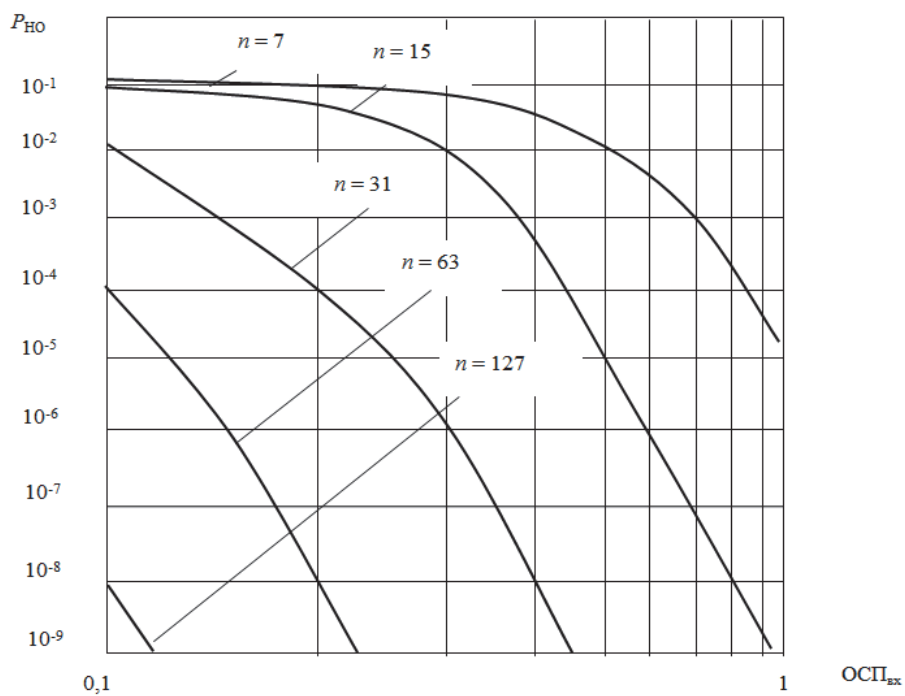


Рисунок 18 – Зависимость $P_{HO} = f(OСП_{вх})$, для различных значениях n , кодов с повторением кодовых комбинаций при некогерентном приеме

Из представленных на рисунке 18 графиков видно, что если при некогерентном приеме, например, требуется обеспечить достоверность 10^{-8} при $ОСП_{вх} = 10$ дБ, то необходимо использовать кодовые последовательности длиной 127. При необходимости обеспечения большей достоверности, следует либо увеличить длину ПСП, либо ОСП.

На рисунке 19 представлены оценки требуемой длины ПСП и ОСП для заданной достоверности передачи информации при применении кодов с повторными кодовыми комбинациями, полученные на основе изложенных выше результатов.

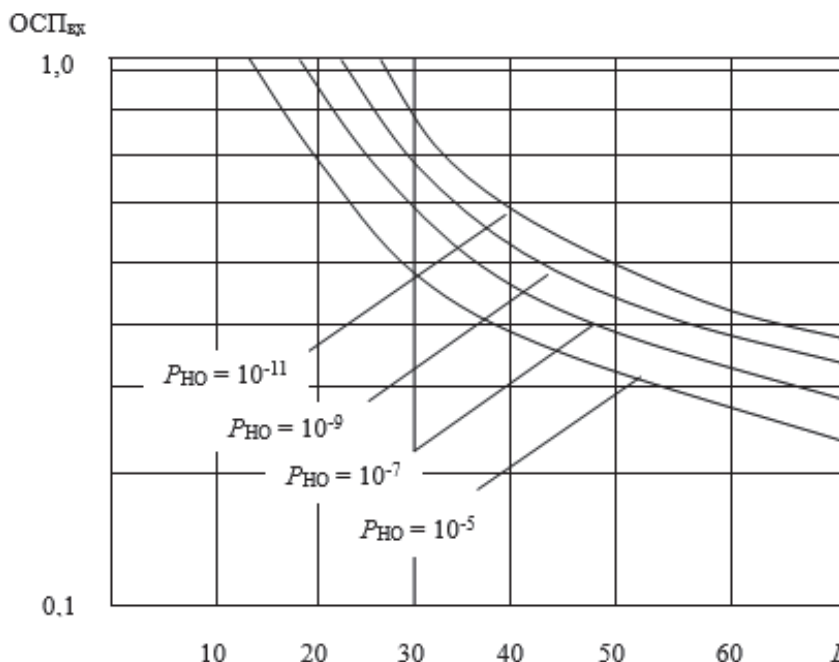


Рисунок 19 – Зависимость $ОСП_{вх} = f(L)$, при различных значениях $P_{НО}$, для кодов с повторными кодовыми комбинациями при некогерентном приеме

Выводы. Таким образом, осуществлен системный анализ методов помехоустойчивого кодирования при использовании когерентного и некогерентного приема.

Сравнительный анализ помехоустойчивого кодирования при когерентном приеме показывает, что при достоверности ошибки на кодовое слово 10^{-5} и $ОСП = 10$ дБ длина ПСП должна выбираться в пределах 15-31. При этом скорость передачи информации СРС по телекоммуникационному каналу лежит в диапазоне 1,0-2,0 кБит/с.

Если требуемая достоверность передачи СРС по занятому телекоммуникационному каналу должна быть меньше 10^{-9} , то следует использовать ПСП с длиной не менее 63. Однако в этом случае скорость передачи информации значительно падает, и будет составлять менее 500 бит/с.

Литература

1. Артющенко В.М., Воловач В.И. Особенности отражения зондирующих сигналов радиотехнических устройств обнаружения от протяженных объектов сложной формы // Школа университетской науки: парадигма развития. 2012. № 2-1(6). С. 42-46.
2. Артющенко В.М., Воловач В.И. Измерение параметров движения протяженных объектов в условиях мешающих воздействий и изменяющейся дальности // Двойные технологии. 2015. №1(70). С. 69-74.
3. Артющенко В.М., Воловач В.И. Анализ влияния аддитивных негауссовских помех на точность измерения параметров движения в радиосистемах ближнего действия // Нелинейный мир. 2015. Т. 13. № 1. С. 16-30.
4. Артющенко В.М., Кучеров Б.А. Анализ энергетических характеристик линий корпоративной сети спутниковой связи // Информационно-технологический вестник. 2014. № 1(1). С. 13-19.

УДК [521.322+531.391.5]:[629.78:528]

Системный анализ алгоритмов расчёта начальных значений параметров программных геометрически устойчивых солнечно-синхронных орбит

Д.Ю. Виноградов, аспирант кафедры
информационные технологии и управляющие системы,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

Проведен системный анализ алгоритмов расчета начальных значений параметров программных геометрически устойчивых солнечно-синхронных орбит.

Дистанционное зондирование Земли, космический аппарат, гравитационное поле Земли.

System analysis of algorithms for calculating initial values of parameters of geometrically stable solar synchronous orbits

D.Y. Vinogradov, Postgraduate student of the Department of Information
Technology and Control Systems,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

A system analysis of algorithms for calculating the initial values of the parameters of geometrically stable solar synchronous orbits is carried out.

Remote sensing of the Earth, spacecraft, Earth's gravitational field.

Введение. На сегодняшний день [4, 6] решение большинства задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обеспечивается аппаратурой, функционирующей в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра электромагнитных излучений. При этом наблюдение поверхности Земли возможно только в дневное время при возможно большей высоте Солнца над местным горизонтом в точке съёмки. Если требуемые условия освещённости не выполняются, то использование космических аппаратов (КА) по целевому назначению оказывается невозможным. Поэтому космические системы (КС) с аппаратурой наблюдения данного типа, как правило, размещаются на околокруговых солнечно-синхронных орбитах (ССО) [1-3].

Задача формирования параметров околокруговых программных геометрически устойчивых ССО формулируется для общего случая, когда число учитываемых зональных гармоник в модели гравитационного поля Земли (ГПЗ) $N \geq 16$. Учёт данного числа зональных гармоник позволяет сформировать программную орбиту достаточно близкой к реальному движению космических аппаратов (КА).

Постановка вышеуказанной задачи выглядит следующим образом.

Дано: характеристики программной орбиты КА, число учитываемых зональных гармоник в модели ГПЗ $N \geq 16$.

Требуется: определить в момент времени t_0 в восходящем узле начальные значения параметров программной геометрически устойчивой ССО: $a_0^{\text{пр}}, e_0^{\text{пр}}, i_0^{\text{пр}}, \omega_0^{\text{пр}}$, где a_0, e_0, i_0, ω_0 - начальные параметры орбиты.

Заметим, что связь между местным средне солнечным временем (МССВ) $t_{\text{МССВ}}^0$ в восходящем (нисходящем) узле ССО и долготой восходящего узла Ω_0 в момент времени t_0 с достаточной точностью описывается следующими зависимостями [2]:

$$\begin{aligned} t_{\text{МССВ}\uparrow} &= \Omega_0 - \alpha_s(t_0) + 12^h; \\ t_{\text{МССВ}\downarrow} &= \Omega_0 - \alpha_s(t_0), \end{aligned} \quad (1)$$

где α_s – прямое восхождение Солнца; Ω_0 – начальное значение долготы восходящего узла орбиты.

В расчётах по методике принимается $\Omega_0^{\text{пр}} = 0$. В дальнейшем требуемое значение долготы восходящего узла орбиты определяется в соответствии с выражениями (1).

Для решения поставленной задачи разработаны численно-аналитические алгоритмы расчёта начальных значений параметров околокруговых геометрически устойчивых ССО в зависимости от варианта заданных характеристик:

- 1) алгоритм формирования параметров геометрически устойчивой ССО с заданным драконическим периодом;
- 2) алгоритм формирования параметров геометрически устойчивой ССО с заданной кратностью замыкания трассы;
- 3) алгоритм формирования параметров геометрически устойчивой ССО с заданным наклонением плоскости орбиты;
- 4) алгоритм формирования параметров геометрически устойчивой ССО с заданной средней высотой;
- 5) алгоритм формирования параметров геометрически устойчивой ССО с заданным суточным числом витков полёта КА и заданной величиной суточного смещения трассы полёта.

Необходимость в разработке множества алгоритмов обусловлена тем, что на начальном этапе баллистического проектирования (БП) КС ДЗЗ могут предъявляться различные требования к параметрам орбит. Например, заданное разрешение съёмки на местности обеспечивается при размещении КА в конкретном диапазоне высот, а по величине угла обзора аппаратуры можно судить о необходимом суточном смещении трассы полёта.

Далее приведён анализ соотношений, используемых при разработке указанных алгоритмов.

Рассмотрим выражения для расчёта начального приближения большой полуоси, драконического периода и наклона плоскости орбиты в зависимости от варианта алгоритма.

Драконический период:

$$T_{др} = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}}, \quad (2)$$

где: a – большая полуось орбиты; $\mu = 398600,4418 \text{ км}^3/\text{с}^2$ – гравитационный параметр Земли.

Большая полуось как функция $T_{др}$:

$$a = \left(\frac{\mu T_{др}^2}{4\pi^2} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (3)$$

Большая полуось как функция $\Delta L_{сут}$:

$$a = \left[\mu \left(\frac{2\pi - \Delta L_{сут}}{2\pi \cdot n_{сут} \cdot \omega_3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (4)$$

На ССО обеспечивается равенство скорости прецессии плоскости орбиты КА $\Delta\Omega$ и скорости годового движения среднего экваториального Солнца $\Delta\Omega_S$:

$$\Delta\Omega = \Delta\Omega_S.$$

Среднее значение величины $\Delta\Omega_{\odot}$ выражается формулой:

$$\Delta\Omega_S = \frac{2\pi}{T_{т.г}},$$

где $T_{т.г} = 365,2422$ сут – число средних солнечных суток в тропическом году.

Значение $\Delta\Omega$ с учётом второй зональной гармоники определяется по формуле:

$$\Delta\Omega = -\frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \cos i}{\mu p^2 \cdot T_{др}},$$

где: $p = a(1 - e^2)$ – фокальный параметр орбиты; $\varepsilon = 2,634 \cdot 10^{10} \text{ км}^5/\text{с}^2$ – константа сжатия Земли; $T_{др}$ выражен в средних солнечных сутках.

В таком случае условие солнечной синхронности будет иметь вид:

$$\frac{T_{др}}{T_{т.г}} = -\frac{\varepsilon \cdot \cos i}{\mu p^2}.$$

Отсюда большая полуось ССО как функция i :

$$a = \left(\frac{T_{т.г}^2 \cdot T_{др}^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot \cos^2 i}{4\pi^2 \cdot \mu} \right)^{\frac{1}{7}}, \quad (5)$$

и наклонение ССО как функция $T_{др}$:

$$\cos i = -T_{др} \frac{\mu p^2}{\varepsilon \cdot T_{т.г}}. \quad (6)$$

Драконический период орбиты суточной кратности с замыканием трассы через $n_{сут}$ витков:

$$T_{др} = \frac{2\pi}{\omega_3} \left(\frac{1}{n_{сут}} - \frac{\varepsilon \cdot \cos i}{\mu p^2} \right). \quad (7)$$

где: $n_{сут}$ обычно называют суточным числом витков орбиты или числом витков в полётных сутках.

Драконический период орбиты суточной кратности с замыканием трассы через n полных витков:

$$T_{др} = \frac{2\pi}{\omega_3} \left(\frac{D}{n} - \frac{\varepsilon \cdot \cos i}{\mu p^2} \right). \quad (8)$$

где: D – период кратности орбиты (интервал замыкания трассы), сутки; n – число полных витков за период кратности; $\omega_3 = 7,29211 \cdot 10^{-5}$ рад/с – угловая скорость вращения Земли.

Драконический период орбиты при заданных значениях $n_{сут}$ и $\Delta L_{сут}$ ($\Delta L_{сут}$ – расстояние по долготе между 1-ым и $(n_{сут} + 1)$ -ым витками трассы полёта называется суточным смещением орбиты):

$$T_{др} = \frac{1}{\omega_3} \left[\frac{1}{n_{сут}} (2\pi - \Delta L_{сут}) - \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \cos i}{\mu p^2} \right]. \quad (9)$$

Параметры ССО a, e, i, ω должны удовлетворять уравнению (10), которое представляет собой условие поворота восходящего узла орбиты на угол 2π в течение одного тропического года:

$$f(a, e, i, \omega, T_{др}) = \frac{T_{т.г.}}{T_{др}} \Delta\Omega - 2\pi = 0, \quad (10)$$

где $\Delta\Omega$ – смещение восходящего узла орбиты за виток полёта с учётом шести зональных гармоник модели ГПЗ, равное при заданных значениях элементов орбиты a, e_1, e_2, i :

$$\Delta\Omega(a, e_1, e_2, i) = K_{\Omega} + L_{\Omega}e_1 + H_{\Omega}e_2, \quad (11)$$

где $K_{\Omega}, L_{\Omega}, H_{\Omega}$ рассчитываются по соотношениям:

$$K_{\Omega} = \frac{3\pi}{\bar{p}^2} \left[C_{20} + \frac{3-20s^2}{4\bar{p}^2} C_{20}^2 + \frac{35(7s^2-4)}{56\bar{p}^2} C_{40} + \frac{35(8-36s^2+33s^4)}{64\bar{p}^4} C_{60} \right] \cos i;$$

$$L_{\Omega} = \frac{6\pi(2-5s^2) \cos i}{\bar{p}^4} C_{20}^2;$$

$$H_{\Omega} = \frac{3\pi}{4\bar{p}^3} \left[(15s^2 - 4) C_{30} + \frac{5(8-84s^2+105s^4)}{4\bar{p}^2} C_{50} \right] \operatorname{ctg} i$$

где $\bar{p} = p/R_e$; $s = \sin i$; $C_{20}, C_{30}, C_{40}, C_{50}, C_{60}$ – коэффициенты зональных гармоник.

При известных значениях элементов a, e, ω уравнение (10) решается итерационно относительно i с использованием метода Ньютона первого порядка. На каждой итерации рассчитывается уточнённое значение наклона по формуле:

$$i_{j+1} = i_j + \frac{f_j \cdot \mu p^2 \cdot T_{др}}{2\pi \cdot \varepsilon \cdot T_{т.г.} \cdot \sin i_j}, \quad (12)$$

где f_j вычисляется согласно выражению (10).

Итерационный процесс (12) прекращается при выполнении условия

$$|f_{j+1}| \leq \varepsilon_f,$$

где $\varepsilon_f = 10^{-6}$ – заданная точность завершения итерационного процесса.

Значение фокального параметра может быть рассчитано по формуле:

$$p = a(1 - e_1^2 - e_2^2). \quad (13)$$

Множество $v_j \in V, j = 1 \dots 5$, вариантов баллистического проектирования (БП) программных геометрически устойчивых ССО представлено в виде таблицы 1.

Таблица 1 – Варианты БП программных геометрически устойчивых ССО

Номер варианта j	Требуемые характеристики программной орбиты
1	$T_{др}^{пр}$
2	$D^{пр}, n^{пр}$
3	$i^{пр}$
4	$h_{ср}^{пр}$
5	$n_{сут}^{пр}, \Delta L_{сут}^{пр}$

Определение элементов программной орбиты для вариантов $v_j, j = 1 \dots 5$, заключается в последовательном выполнении **четырёх этапов (I, II, III, IV)**. Для приближенного (с достаточной степенью точности) расчёта параметров программной орбиты можно ограничиться выполнением только I-го этапа.

На I-м этапе решения задачи требуемые значения элементов $a_0^{пр}, e_0^{пр}, i_0^{пр}, \omega_0^{пр}$ вычисляются итерационным способом из решения уравнения вида:

$$g(a, i, e_{1\Omega}, e_{2\Omega}) = g^{пр}, \quad (14)$$

где $g^{пр}$ – программное значение одной из характеристик орбиты согласно таблице 1.

Уравнение вида (10) решается методом Ньютона первого порядка относительно элемента a . На каждой итерации по уточненному значению элемента a и заданному $g^{пр}$ вычисляются значения элементов $e_{1\Omega}$ и $e_{2\Omega}$ геометрически устойчивой орбиты с учётом возмущений от семи зональных гармоник

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

$$e_{2\Omega} = \delta e_{2д}. \quad (15)$$

и по одной из формул (7), (8), (9) – значение драконического периода $T_{др}$ с учётом возмущения только от второй зональной гармоник. Итерации заканчиваются при выполнении условия

$$|g^{пр} - g_j| \leq \varepsilon_g,$$

где j – номер итерации; ε_g – заданная точность завершения итерационного процесса.

Вычисление элементов $e_0^{пр}, \omega_0^{пр}$ осуществляется по формулам

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

$$\omega_{\Omega} = \text{sign}(e_{2\Omega}) \cdot \arccos \frac{e_{1\Omega}}{e_{\Omega}}. \quad (16)$$

Формируется массив результатов I-го этапа решения задачи:

$$P_1^{\text{пр}} = \{T_{\text{др}}^{\text{пр}}, a_0^{\text{пр}}, e_0^{\text{пр}}, i_0^{\text{пр}}, \omega_0^{\text{пр}}, \Omega_0^{\text{пр}} = 0\}_I$$

В случае, когда требуется вычислить параметры программной орбиты в первом приближении (например, для формирования каталога орбитальной структуры (ОС)), то дополнительно рассчитывается программная угловая скорость прецессии орбиты $\dot{\Omega}^{\text{пр}}$ с учётом влияния шести зональных гармоник по формуле (11), а затем – по формулам

$$\Delta L_{\text{мв}} = T_{\text{др}} \omega_3 - \Delta \Omega, \quad (17)$$

$$n_{\text{сут}} = E \left[\frac{2\pi}{\Delta L_{\text{мв}}} \right], \quad (18)$$

$$\Delta L_{\text{сут}} = 2\pi - n_{\text{сут}} \cdot \Delta L_{\text{мв}}. \quad (19)$$

соответственно параметры $\Delta L_{\text{мв}}^{\text{пр}}, n_{\text{сут}}^{\text{пр}}$ и $\Delta L_{\text{сут}}^{\text{пр}}$, где $E[\dots]$ – оператор взятия целой части числа.

На II-м этапе значение $a_0^{\text{пр}}$ необходимо дополнительно уточнить в модели ГПЗ с учётом возмущений от заданного числа N зональных гармоник с использованием численного прогнозирования движения КА. Дополнительное уточнение $a_0^{\text{пр}}$ осуществляется также путём решения уравнения (14) методом Ньютона первого порядка, при этом на каждой j -ой итерации численно определяются $T_{\text{др}}$ и/или $\dot{\Omega}$.

На этом этапе формулы (7), (8), (9) преобразуются к виду:

$$T_{\text{др}} = \frac{2\pi}{\omega_3} \left(\frac{1}{n_{\text{сут}}} + \frac{\dot{\Omega}}{2\pi} \right). \quad (20)$$

$$T_{\text{др}} = \frac{2\pi}{\omega_3} \left(\frac{D}{n} + \frac{\dot{\Omega}}{2\pi} \right). \quad (21)$$

$$T_{\text{др}} = \frac{1}{\omega_3} \left[\frac{1}{n_{\text{сут}}} (2\pi - \Delta L_{\text{сут}}) + \dot{\Omega} \right]. \quad (22)$$

В качестве начального приближения для итерационного процесса используются параметры программной орбиты, полученные на I-ом этапе.

На каждой итерации значение $i_0^{\text{пр}}$ уточняется при помощи решения уравнения (10).

Для начала численного прогнозирования на момент t_0 в восходящем узле рассчитывается вектор состояния КА в инерциальной системе координат, причём выражения для определения компоненты вектора состояния в инерциальной системе координат (ИСК) на момент оскуляции:

$$\begin{aligned}
x &= r(\cos u \cos \Omega - \sin u \sin \Omega \cos i); \\
y &= r(\cos u \sin \Omega - \sin u \cos \Omega \cos i); \\
z &= r \sin u \sin i; \\
V_x &= V_r \frac{x}{r} - V_u(\sin u \cos \Omega + \cos u \sin \Omega \cos i); \\
V_y &= V_r \frac{y}{r} - V_u(\sin u \sin \Omega - \cos u \cos \Omega \cos i); \\
V_z &= V_r \frac{z}{r} + V_u \cos u \sin i,
\end{aligned} \tag{23}$$

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

$$r = \frac{p}{1 + e_1 \cos u + e_2 \sin u}; \tag{24}$$

$$V_r = \sqrt{\frac{\mu}{p}}(e_1 \sin u - e_2 \cos u); \tag{25}$$

$$V_u = \sqrt{\frac{\mu}{p}}(1 + e_1 \cos u + e_2 \sin u), \tag{26}$$

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

$$\begin{aligned}
x &= \frac{p}{1 + e_1}; \\
y &= 0; \\
z &= 0; \\
V_x &= -\sqrt{\frac{\mu}{p}} e_2; \\
V_y &= \sqrt{\frac{\mu}{p}} (1 + e_1) \cos i; \\
V_z &= \sqrt{\frac{\mu}{p}} (1 + e_1) \sin i.
\end{aligned} \tag{27}$$

На III-м этапе решения задачи уточняются элементы $e_0^{\text{пр}}$ и $\omega_0^{\text{пр}}$ за счёт осреднения их значений в восходящем узле орбиты. Осреднение происходит на интервале полёта, равном периоду соответствующего долгопериодического возмущения e_{10} и e_{20} , в следующей последовательности.

Данный подход основан на результатах работы [5], в которой приведён аналитический алгоритм повиткового прогнозирования элементов орбиты с учётом возмущений от шести зональных гармоник модели ГПЗ.

Авторами работы [5] при анализе характера долгопериодических возмущений было замечено, что в восходящих узлах орбиты элементы e_1 и e_2 совершают гармонические колебания относительно средних величин $e_1^{\text{ср}}$ и $e_2^{\text{ср}}$

$$\begin{aligned}
e_1^{\text{ср}} &= -\frac{A}{B + C}; \\
e_2^{\text{ср}} &= \frac{D}{B - C},
\end{aligned}$$

не зависящих от начальных значений e_1^0 и e_2^0 , и определяемых величинами большой полуоси a , наклонения i и коэффициентами зональных гармоник. Формулы для расчёта величин A, B, C, D даны в [5].

При начальных значениях $e_1^0 = e_1^{\text{cp}}$ и $e_2^0 = e_2^{\text{cp}}$ амплитуды гармонических колебаний в восходящем узле орбиты обращаются в нули. В этом случае величины e_1 и e_2 в восходящих узлах орбиты остаются постоянными в течение длительных интервалов времени. Значит, можно говорить о том, что средние величины e_1^{cp} и e_2^{cp} долгопериодических возмущений соответствуют условиям геометрической устойчивости орбиты. В связи с этим данный вывод распространяется на общий случай, когда необходимо учитывать возмущения от заданного числа зональных гармоник модели ГПЗ.

На начальный момент времени в восходящем узле орбиты рассчитывается фазовый вектор КА в ИСК по соотношениям (27):

С данным вектором производится численное прогнозирование движения КА в модели ГПЗ с учётом возмущений от заданного числа N зональных гармоник до момента достижения периода долгопериодического возмущения по каждому параметру e_{10} и e_{20} , после чего производится их осреднение.

Средние значения могут быть определены как

$$e_{1,2}^{\text{cp}} = \frac{1}{2}(e_{1,2}^{\text{max}} + e_{1,2}^{\text{min}}),$$

где $e_{1,2}^{\text{max}}$ и $e_{1,2}^{\text{min}}$ – соответственно максимальное и минимальное значения элементов орбиты на интервале полёта, равном периоду долгопериодического возмущения.

В свою очередь, при известных e_1^{cp} и e_2^{cp} программные значения e_0^{pp} и ω_0^{pp} будут определяться по формулам (16).

IV этап аналогичен II-му этапу за исключением того, что элементы e_0^{pp} и ω_0^{pp} принимаются константами. После окончательного уточнения величины большой полуоси a_0^{pp} по формулам (17), (18) и (19) определяются параметры $\Delta L_{\text{мв}}^{\text{pp}}$, $n_{\text{сут}}^{\text{pp}}$ и $\Delta L_{\text{сут}}^{\text{pp}}$ с использованием значений $T_{\text{др}}^{\text{pp}}$ и $\dot{\Omega}^{\text{pp}}$, рассчитанных численно.

В результате после выполнения четырёх этапов формируется массив параметров, характеризующих программную орбиту в поле возмущений от заданного числа зональных гармоник модели геопотенциала:

$$P^{\text{pp}} = \{T_{\text{др}}^{\text{pp}}, a_0^{\text{pp}}, e_0^{\text{pp}}, i_0^{\text{pp}}, \omega_0^{\text{pp}}, \Omega_0^{\text{pp}} = 0, \dot{\Omega}^{\text{pp}}, \Delta L_{\text{мв}}^{\text{pp}}, n_{\text{сут}}^{\text{pp}}, \Delta L_{\text{сут}}^{\text{pp}}\}.$$

Далее приведено описание пяти разработанных алгоритмов.

Алгоритм A_1 . Расчёт начальных значений параметров программной геометрически устойчивой солнечно-синхронной орбиты по заданному значению драконического периода

1. Рассчитывается оскулирующее значение большой полуоси орбиты a_1 в восходящем узле в 1-ом приближении по формуле (4).
2. Полагается $e_{11} = e_{21} = 0$ в 1-ом приближении.
3. Рассчитывается фокальный параметр p_j по формуле (13).

4. Определяется наклонение ССО i_j по формуле (6).
5. Рассчитываются значения e_{1j} и e_{2j} по формулам (15).
6. Рассчитывается расчётное значение $T_{дрj}$ в j -ом приближении по формуле

$$T_{др} = 2\pi \left\{ \sqrt{\frac{a^3}{\mu}} - \frac{\varepsilon}{\sqrt{\mu^3 p}} \left[3 - \frac{5}{2} \sin^2 i - e_1 (1 - 5 \sin^2 i) \right] \right\}. \quad (28)$$

7. Проверяется условие:

$$|\Delta T| = |T_{др}^{пр} - T_{дрj}| \leq \varepsilon_T, \quad \varepsilon_T = 0,0001 \text{ с.}$$

Если условие выполняется, то $a_0^{пр} = a_j$ и осуществляется переход к п. 8, иначе рассчитывается уточнённое значение большой полуоси орбиты

$$a_j = a_{j-1} + \frac{\Delta T}{3\pi} \sqrt{\frac{\mu}{a_{j-1}}}$$

и осуществляется переход к п. 3.

8. Формируются результаты I-го этапа решения задачи:

$$P_1^{пр} = \{T_{др}^{пр}, a_0^{пр}, e_0^{пр}, i_0^{пр}, \omega_0^{пр}, \Omega_0^{пр} = 0\}_I.$$

Осуществляется расчёт элементов фазового вектора в восходящем узле орбиты $\{x_0, y_0, z_0, V_{x0}, V_{y0}, V_{z0}\}$ по формуле (27) и настройка модели движения КА.

9. Осуществляется выполнение II-го этапа решения задачи по уточнению полученных результатов в модели геопотенциала с учётом заданного числа зональных гармоник $N \geq 16$. Уточнение производится путём выполнения расчётов согласно п.п. 3-8, при этом значение $T_{дрj}$ в j -ом приближении рассчитывается с помощью численного прогнозирования движения КА в принятой модели движения. На каждой итерации значение i_j теперь уточняется при помощи решения уравнения (10).

10. Выполняется III-й этап по осреднению эксцентриситета и аргумента перигея на интервале их долгопериодического возмущения с использованием модели движения КА. В результате получают уточнённые величины $e_0^{пр}$ и $\omega_0^{пр}$.

11. Выполняется IV-й этап, аналогичный II-му за исключением неизменности параметров $e_0^{пр}$ и $\omega_0^{пр}$.

12. Формируются конечные результаты в виде массива параметров программной орбиты:

$$P^{пр} = \{T_{др}^{пр}, a_0^{пр}, e_0^{пр}, i_0^{пр}, \omega_0^{пр}, \Omega_0^{пр} = 0, \dot{\Omega}^{пр}, \Delta L_{мв}^{пр}, n_{сут}^{пр}, \Delta L_{сут}^{пр}\}.$$

Алгоритм А₂. Расчёт начальных значений параметров программной геометрически устойчивой солнечно-синхронной орбиты заданной кратностью замыкания траектории Полёта

1. По формуле

$$T_{др} = T_{с.с} \frac{D}{n}. \quad (29)$$

где $T_{с.с} = 86400$ с – средние солнечные сутки; рассчитывается программ-

ное значение $T_{др}^{пр}$ ССО D -суточной кратности с замыканием трассы через n витков.

2. Далее выполняются пункты 1-11 алгоритма расчёта начальных значений параметров программной геометрически устойчивой ССО по заданному значению драконического периода.

3. Формируются конечные результаты в виде массива параметров программной орбиты:

$$P^{пр} = \{T_{др}^{пр}, a_0^{пр}, e_0^{пр}, i_0^{пр}, \omega_0^{пр}, \Omega_0^{пр} = 0, \dot{\Omega}^{пр}, \Delta L_{мв}^{пр}, n_{сут}^{пр}, \Delta L_{сут}^{пр}\}.$$

Алгоритм А₃. Расчёт начальных значений параметров программной геометрически устойчивой солнечно-синхронной орбиты по заданному значению наклонения плоскости орбиты

1. Рассчитывается оскулирующее значение большой полуоси a_1 в восходящем узле в 1-ом приближении по формуле (4).

2. Рассчитываются значения e_{1j} и e_{2j} по формулам (15).

3. Рассчитывается фокальный параметр p_j по формуле (13).

4. Рассчитывается $T_{дрj}$ в j -ом приближении по формуле (28).

5. Определяется расчётное значение наклонения ССО i_j по формуле (6).

6. Проверяется условие:

$$|\Delta(\cos i)| = |\cos i_0^{пр} - \cos i_j| \leq \varepsilon_{\cos i}, \quad \varepsilon_{\cos i} = 0,00001.$$

Если условие выполняется, то $a_0^{пр} = a_j$, и осуществляется переход к п.7, иначе рассчитывается уточнённое значение большой полуоси орбиты

$$a_j = a_{j-1} - \Delta(\cos i) \frac{T_{т.г} \varepsilon}{7\pi \sqrt{a_{j-1}^5 \cdot \mu}}$$

и осуществляется переход к п. 2.

7. Формируются результаты I-го этапа решения задачи:

$$P_1^{пр} = \{T_{др}^{пр}, a_0^{пр}, e_0^{пр}, i_0^{пр}, \omega_0^{пр}, \Omega_0^{пр} = 0\}_1$$

Осуществляется расчёт элементов фазового вектора в восходящем узле орбиты $\{x_0, y_0, z_0, V_{x0}, V_{y0}, V_{z0}\}$ по формуле (27) и настройка модели движения КА.

8. Осуществляется выполнение II-го этапа решения задачи по уточнению полученных результатов в модели геопотенциала с учётом заданного числа зональных гармоник $N \geq 16$. Уточнение производится путём выполнения расчётов согласно п.п. 2-7, при этом значение $T_{дрj}$ в j -ом приближении рассчитывается с помощью численного прогнозирования движения КА в принятой модели движения. На каждой итерации значение i_j теперь уточняется при помощи решения уравнения (10).

9. Выполняется III-й этап по осреднению эксцентриситета и аргумента перигея на интервале их долгопериодического возмущения с использованием модели движения КА. В результате получают уточнённые величины $e_0^{пр}$ и $\omega_0^{пр}$.

10. Выполняется IV-й этап, аналогичный II-му за исключением неизменности параметров $e_0^{\text{пр}}$ и $\omega_0^{\text{пр}}$.

11. Формируются конечные результаты в виде массива параметров программной орбиты:

$$P^{\text{пр}} = \{T_{\text{др}}^{\text{пр}}, a_0^{\text{пр}}, e_0^{\text{пр}}, i_0^{\text{пр}}, \omega_0^{\text{пр}}, \Omega_0^{\text{пр}} = 0, \dot{\Omega}^{\text{пр}}, \Delta L_{\text{мв}}^{\text{пр}}, n_{\text{сут}}^{\text{пр}}, \Delta L_{\text{сут}}^{\text{пр}}\}.$$

Алгоритм А₄. Расчёт начальных значений параметров программной геометрически устойчивой солнечно-синхронной орбиты по заданному значению средней высоты

1. Рассчитывается номинальное оскулирующее значение большой полуоси орбиты в восходящем узле:

$$a_1 = a_0^{\text{пр}} = h_{\text{ср}}^{\text{пр}} + R_e.$$

2. Рассчитывается драконический период $T_{\text{др}1}$ в 1-м приближении по формуле (2).

3. Полагается $e_{11} = e_{21} = 0$ в 1-ом приближении.

4. Рассчитывается фокальный параметр p_j по формуле (13).

5. Определяется наклонение ССО i_j по формуле (6).

6. Рассчитываются значения e_{1j} и e_{2j} по формулам (15).

7. Определяется расчётное значение большой полуоси

$$a_j = \frac{p_j}{1 - e_{1j}^2 - e_{2j}^2}.$$

8. Рассчитывается $T_{\text{др}j}$ в j -ом приближении по формуле (28).

9. Проверяется условие:

$$|a_0^{\text{пр}} - a_j| < \varepsilon_a, \quad \varepsilon_a = 10 \text{ м}.$$

Если условие выполняется, то осуществляется переход к п.10, иначе осуществляется переход к п.4.

10. Формируются результаты I-го этапа решения задачи:

$$P_1^{\text{пр}} = \{T_{\text{др}}^{\text{пр}}, a_0^{\text{пр}}, e_0^{\text{пр}}, i_0^{\text{пр}}, \omega_0^{\text{пр}}, \Omega_0^{\text{пр}} = 0\}_I.$$

Осуществляется расчёт элементов фазового вектора в восходящем узле орбиты $\{x_0, y_0, z_0, V_{x0}, V_{y0}, V_{z0}\}$ по формуле (27) и настройка модели движения КА.

11. Осуществляется выполнение II-го этапа решения задачи по уточнению полученных результатов в модели геопотенциала с учётом заданного числа зональных гармоник $N \geq 16$. Уточнение производится путём выполнения расчётов согласно п.п. 4-9, при этом значение $T_{\text{др}j}$ в j -ом приближении рассчитывается с помощью численного прогнозирования движения КА в принятой модели движения. На каждой итерации значение i_j теперь уточняется при помощи решения уравнения (10).

12. Выполняется III-й этап по осреднению эксцентриситета и аргумента перигея на интервале их долгопериодического возмущения с использованием модели движения КА. В результате получают уточнённые величины $e_0^{\text{пр}}$ и $\omega_0^{\text{пр}}$.

13. Выполняется IV-й этап, аналогичный II-му за исключением неизменности параметров $e_0^{\text{пр}}$ и $\omega_0^{\text{пр}}$.

14. Формируются конечные результаты в виде массива параметров программной орбиты:

$$P^{\text{пр}} = \{T_{\text{др}}^{\text{пр}}, a_0^{\text{пр}}, e_0^{\text{пр}}, i_0^{\text{пр}}, \omega_0^{\text{пр}}, \Omega_0^{\text{пр}} = 0, \dot{\Omega}^{\text{пр}}, \Delta L_{\text{мв}}^{\text{пр}}, n_{\text{сут}}^{\text{пр}}, \Delta L_{\text{сут}}^{\text{пр}}\}$$

Алгоритм А₅. Расчёт начальных значений параметров программной геометрически устойчивой ССО по заданным значениям суточного числа витков полёта КА и величины суточного смещения траассы полёта

1. Рассчитывается оскулирующее значение большой полуоси орбиты a_1 в восходящем узле в 1-ом приближении по формуле (4).

2. Рассчитывается драконический период $T_{\text{др}0}$ в 1-м приближении по формуле (2).

3. Полагается $e_{11} = e_{21} = 0$ в 1-ом приближении.

4. Рассчитывается фокальный параметр p_j по формуле (13).

5. Определяется наклонение ССО i_j по формуле (6).

6. Рассчитываются значения e_{1j} и e_{2j} по формулам (15).

7. Рассчитывается $T_{\text{др}j}$ в j -ом приближении по формуле (28).

8. Уточняется наклонение ССО i_j по формуле (6).

9. Рассчитывается расчетное значение суточного смещения траассы полета $\Delta L_{\text{сут}j}$ с помощью формул (19) и (17).

10. Проверяется условие:

$$|\delta \Delta L_{\text{сут}}| = |\Delta L_{\text{сут}} - \Delta L_{\text{сут}j}| \leq \varepsilon_{\Delta L}, \quad \varepsilon_{\Delta L} = 0,00001 \text{ рад.}$$

Если условие выполняется, то осуществляется переход к п. 11, иначе рассчитывается уточнённое значение большой полуоси орбиты

$$a_j = a_{j-1} - \frac{\delta \Delta L_{\text{сут}}}{3\pi n_{\text{сут}}^{\text{пр}} \omega_3} \sqrt{\frac{\mu}{a_{j-1}}}$$

и осуществляется переход к п. 4.

11. Формируются результаты I-го этапа решения задачи:

$$P_1^{\text{пр}} = \{T_{\text{др}}^{\text{пр}}, a_0^{\text{пр}}, e_0^{\text{пр}}, i_0^{\text{пр}}, \omega_0^{\text{пр}}, \Omega_0^{\text{пр}} = 0\}_1.$$

Осуществляется расчёт элементов фазового вектора в восходящем узле орбиты $\{x_0, y_0, z_0, V_{x0}, V_{y0}, V_{z0}\}$ по формуле (27) и настройка модели движения КА.

12. Осуществляется выполнение II-го этапа решения задачи по уточнению полученных результатов в модели геопотенциала с учётом заданного числа зональных гармоник $N \geq 16$. Уточнение производится путём выполнения расчётов согласно п.п. 4-11, при этом значение $\Delta L_{\text{сут}j}$ вычисляется с помощью формул (19) и (17), где драконический период $T_{\text{др}j}$ и угловая скорость прецессии восходящего узла орбиты $\dot{\Omega}_j$ в j -ом приближении рассчитываются путём численного прогнозирования движения КА в принятой модели движения. На каждой итерации значение i_j теперь уточняется при помощи решения уравнения (10).

13. Выполняется III-й этап по осреднению эксцентриситета и аргумента перигея на интервале их долгопериодического возмущения с использованием модели движения КА. В результате получают уточнённые величины $e_0^{\text{пр}}$ и $\omega_0^{\text{пр}}$.

14. Выполняется IV-й этап, аналогичный II-му за исключением неизменности параметров $e_0^{\text{пр}}$ и $\omega_0^{\text{пр}}$.

15. Формируются конечные результаты в виде массива параметров программной орбиты:

$$P^{\text{пр}} = \{T_{\text{др}}^{\text{пр}}, a_0^{\text{пр}}, e_0^{\text{пр}}, i_0^{\text{пр}}, \omega_0^{\text{пр}}, \Omega_0^{\text{пр}} = 0, \dot{\Omega}^{\text{пр}}, \Delta L_{\text{мв}}^{\text{пр}}, n_{\text{сут}}^{\text{пр}}, \Delta L_{\text{сут}}^{\text{пр}}\}.$$

Выводы. Таким образом, проведен системный анализ алгоритмов расчета начальных значений параметров программных геометрически устойчивых солнечно-синхронных орбит.

Произведен расчет начальных значений параметров программной геометрически устойчивой солнечно-синхронной орбиты по: заданному значению драконического периода; заданной кратностью замыкания трассы полёта; заданному значению наклона плоскости орбиты; заданному значению средней высоты; заданным значениям суточного числа витков полёта КА и величины суточного смещения трассы полёта.

Литература

1. Артющенко В.М., Воловач В.И. Особенности отражения зондирующих сигналов радиотехнических устройств обнаружения от протяженных объектов сложной формы // Школа университетской науки: парадигма развития. 2012. № 2-1(6). С.42-46.
2. Артющенко В.М., Кучеров Б.А. Оценка экономической эффективности использования автоматизированной системы распределения средств управления космическими аппаратами в условиях ресурсных ограничений // Вестник Поволжского государственного университета сервиса. Серия: Экономика. 2013. № 5(31). С.131-136.
3. Артющенко В.М., Кучеров Б.А. Анализ энергетических характеристик линий корпоративной сети спутниковой связи // Информационно-технологический вестник. 2014. № 1(1). С.13-19.
4. Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года. М: Российское космическое агентство, 2006. 72 с.
5. Кугаенко Б.В., Эльясберг П.Е. Эволюция почти круговых орбит ИСЗ под влиянием зональных гармоник // Космические исследования, 1968. Т. VI. С. 186-202.
6. Чернов А.А., Чернявский Г.М. Орбиты спутников дистанционного зондирования Земли. М: Радио и связь, 2004. 202 с.

УДК 004.93

Разработка и исследование программного обеспечения для оценки качества кирпича на основе применения нейронных сетей

Е.Е. Истратова, кандидат технических наук,
доцент кафедры автоматизированных систем управления,
А.О. Бородина, студентка 4 курса,
Новосибирский государственный технический университет (НГТУ),
г. Новосибирск

В статье представлены результаты разработки и тестирования программного обеспечения для оценки качества кирпича в режиме реального времени. Отличительной особенностью программы является ее быстродействие, что важно для производства, так как при оперативном обнаружении некачественного продукта его можно отправить на переработку или использовать в качестве сырья повторно. Результаты сравнения производительности обученной модели с аналогами в области дефектоскопии показали, что разработанный алгоритм по эффективности не уступает аналогичным моделям для контроля качества объектов.

Кирпичи, компьютерное зрение, видеоаналитика, нейронные сети.

Development and research of software for assessing the quality of bricks based on the use of neural networks

E.E. Istratova, Ph.D., Associate Professor of the Automated Control Systems
Department,
A.O. Borodina, 4th year student,
Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk

The article presents the results of the development and testing of software for assessing the quality of bricks in real time. A distinctive feature of the program is its speed, which is important for production, since if a low-quality product is quickly detected, it can be sent for processing or reused as a raw material. The results of comparing the performance of the trained model with analogues in the field of flaw detection showed that the developed algorithm is not inferior in efficiency to similar models for quality control of objects.

Bricks, computer vision, video analytics, neural networks.

Российские производственные компании, работающие в разных отраслях промышленности, в настоящее время встречают жесткую конкуренцию со стороны как местных, так и зарубежных компаний. Обеспечить свое преимущество на рынке, а с ним и рост финансовых показателей могут только те предприятия,

которые находят способ гарантировать исключительное качество продукции и минимизировать брак и возврат дефектных товаров.

Системы компьютерного зрения позволяют выполнять визуальный контроль объектов любой сложности, независимо от их положения непосредственно на конвейере или на производственной линии. Благодаря этому, возможно одновременно отслеживать целый ряд характеристик для оценки качества продукции, что способствует значительному снижению количества брака готовой продукции.

Современные системы компьютерного зрения позволяют контролировать качество различных изделий путем обнаружения:

- 1) дефектов на поверхности изделий: отверстия, пятна, капли, царапины, полосы, загрязнения и др.;
- 2) видимых посторонних включений: пузыри, камни, полосы, посторонние предметы и др.;
- 3) отклонений по размеру, форме, цвету, текстуре;
- 4) непрокрасов, пропусков наносимого изображения или текста;
- 5) несоответствий в уровне розлива в таре.

Таким образом, применение подобной системы контроля качества изделий позволяет:

1. Гарантировать качество каждой единицы продукции.
2. Сократить объем ручного труда.
3. Минимизировать количество ошибок оператора.
4. Сократить долю дефектной продукции, поступающей как потребителю, так и на последующие этапы производства.
5. Собрать полную статистику по качеству выпускаемой продукции.
6. Осуществлять автоматическую отбраковку в режиме реального времени.
7. Сократить количество аварий, возникающих из-за критических дефектов продукции.

Обнаружение дефектов в качестве методики проверки соответствия качества изделия существующим стандартам применяется в различных отраслях промышленности. Причем для контроля качества могут использоваться самые различные инструменты и подходы, включая технологии компьютерного зрения и машинного обучения.

Одним из примеров применения дефектоскопии в промышленности является система компьютерного зрения, представленная в литературном источнике [1]. Данное программное обеспечение способно выявлять, обнаруживать и характеризовать дефекты на неплоских прозрачных поверхностях. Поскольку на такой поверхности могут быть обнаружены прозрачные и непрозрачные дефекты, требуются специальные условия освещения. Поэтому краеугольным камнем данного метода является разработанная инновационная система освещения. Благодаря этому, сегментация дефектов выполняется просто и с очень низкой вычислительной нагрузкой, что позволяет проводить проверку в режиме реального времени. Кроме того, в исследовании для сегментации дефектов был предложен новый адаптивный алгоритм выбора порога. Производительность готовой системы

была оценена путем проведения серии испытаний с использованием коммерческой модели линзы фары.

Зачастую дефектоскопия напрямую связана с процессом калибровки. Так, в исследовании [2] приведены результаты разработки системы автоматизированной проверки нескольких изображений для автоматического обнаружения дефектов промышленных объектов. Данная структура была успешно реализована для калиброванных последовательностей изображений. Предложенный метод был успешно апробирован в процессе проведения экспериментов с алюминиевым литьем под давлением.

Классический метод обработки изображений для дефектоскопии использует одно изображение сцены или несколько изображений без соответствий между ними. Для улучшения этой схемы в последние годы была разработана автоматическая проверка с использованием нескольких представлений. Ключевая идея этой стратегии состоит в том, чтобы считать реальными дефектами те области, которые можно отследить на последовательности нескольких изображений, поскольку они расположены в положениях, диктуемых геометрическими условиями. Благодаря подобному подходу, можно успешно устранить ложные срабатывания, то есть шум, поскольку они не появляются в предсказанных местах на следующих изображениях и, следовательно, не могут быть отслежены. В качестве одного из примеров реализации данного подхода можно привести статью [3], в которой представлен метод проверки алюминиевых колес с использованием изображений, сделанных с разных позиций с использованием метода, называемого автоматической многопрофильной проверкой. Данный метод можно применять к некалиброванным последовательностям изображений, поэтому нет необходимости определять оптические и геометрические параметры, обычно присутствующие в калиброванных системах. Кроме того, для повышения производительности был дополнительно разработан метод уменьшения ложных срабатываний в двух и трех представлениях, называемый промежуточным блоком классификатора. Используя этот метод, реальные дефекты могут быть обнаружены с высокой точностью, в то время как большинство ложных срабатываний могут быть распознаны.

Одной из особенностей дефектоскопии является проверка изготовленных деталей и сборок, которые зачастую требуют больших объемов информации в виде расположения точек контрольного щупа и большого количества времени для проведения проверки. При этом оптимальное расположение точек щупа позволяет поддерживать надежность контроля, используя меньшее количество щупов за меньшее время. В качестве примера было рассмотрено исследование [4], в котором авторами были разработаны алгоритмы, использующие модель детали и информацию о производственном процессе для создания оптимального набора точек датчика для рутинной проверки в режиме без обратной связи на основе модели. Результаты испытаний показали, что алгоритмы хорошо работают на большом классе поверхностей.

Зубчатые передачи порошковой металлургии часто сопровождаются поломкой зубьев, истиранием, царапинами и трещинами. В целях устранения де-

фектных зубчатых колес при их производстве и для повышения их выхода в исследовании [5] был предложен усовершенствованный алгоритм GA-PSO, называемый алгоритмом SHGA-PSO. В исследование было проведено сравнение с алгоритмами GA-BP, PSO-BP и GA-PSO-BP. Диагностика дефектов алгоритма SHGA-PSO-BP не только повысила способность к обобщению, но и повысила точность распознавания.

В статье [6] описана система визуального контроля, разработанная для обнаружения диффузных дефектов светодиодов, а именно царапин, пузырей, загрязнений, вздутий, пятен, размытого купола. Для проверки были использованы различные методы обработки изображений. Применение технологии компьютерного зрения, которая включала в себя предварительную обработку, сегментацию изображения, операции очистки и выделения признаков, было реализовано для выполнения автоматизированной проверки косметических дефектов. На основе 200 образцов светодиодов было установлено, что система со 100% точностью обнаруживает дефекты купола светодиодов на светодиодах разного цвета и интенсивности. Система также может классифицировать дефекты по различным категориям, при этом ее точность составляет 90%.

В литературном источнике [7] рассматриваются вопросы, касающиеся алгоритмов анализа изображений для визуального контроля качества текстильных тканей. Представлен обзор ряда дефектоскопических методик и анализ их пригодности для выявления наличия дефектов ткачества. Алгоритмы дефектоскопии основаны на локальном анализе пространственных и пространственно-частотных характеристик, исследуя как статистический, так и структурно-текстурный анализ дефектных образцов изображения.

В качестве еще одного примера применения технологии компьютерного зрения была рассмотрена система контроля качества цитрусовых. В современной промышленности по производству цитрусовых штангенциркуль и цвет успешно используются для автоматической классификации фруктов с помощью систем технического зрения. Однако обнаружение изъянов на поверхности цитрусовых осуществляется путем осмотра человеком. В работе [8] представлена система компьютерного зрения, способная выявлять дефекты кожуры цитрусовых, а также классифицировать тип дефекта. В исследовании был проведен обзор болезней цитрусовых с целью создания базы данных оцифрованных апельсинов, классифицированных по типу неисправности, которая используется в качестве обучающей выборки; также была выполнена сегментация дефектных зон путем применения к изображению градиента Собеля. Для целей классификации использовались несколько методов: расстояние Эйлера до прототипа, до ближайшего соседа и k -ближайших соседей.

В автомобильной промышленности легкосплавные алюминиевые отливки являются важным элементом, определяющим пригодность к эксплуатации. Рентгеновский контроль с осуществляемым параллельно компьютерным зрением используются при автоматизированном контроле алюминиевых отливок для выявления дефектов внутри объекта контроля, не видимых невооруженным глазом. В статье [9] автором были оценены восемь современных методов обнаружения

глубоких объектов (на основе YOLO, RetinaNet и EfficientDet), которые используются для обнаружения дефектов алюминиевого литья. Также была предложена стратегия обучения, которая использует небольшое количество бездефектных рентгеновских изображений отливок с наложением смоделированных дефектов, избегая ручных аннотаций.

Методы обнаружения и распознавания объектов можно разбить на следующие группы: детерминированные методы; вероятностные методы; нейросетевые методы; комбинированные методы.

При этом наиболее перспективными являются именно нейросетевые методы. Их основными преимуществами является то, что они превратили приложения, для которых ранее требовались знания в области компьютерного зрения, в инженерные задачи, которые могут решить специалисты, не работающие с ним. Глубокое обучение переносит логическую нагрузку с разработчика приложения, который разрабатывает и пишет алгоритм на основе правил, на инженера, обучающего систему. Это также открывает новые возможности для решения задач, которые никогда не решались без участия человека-инспектора. Таким образом, применение нейросетевых методов упрощает работу с компьютерным зрением, одновременно расширяя пределы того, что компьютер и камера могут точно проверить.

По сравнению с проверкой человека, глубокое обучение функционирует безостановочно и обеспечивает одинаковый уровень качества; идентифицирует каждый дефект за пределами установленного допуска; идентифицирует дефекты за миллисекунды, поддерживая высокую скорость работы и улучшая пропускную способность.

Таким образом, на основе проведенного анализа методов и примеров дефектоскопии можно сделать вывод о том, что наиболее оптимальным вариантом является именно применение нейронных сетей для контроля качества изделий в промышленности.

Технологический процесс производства кирпича включает следующие этапы: подготовка сырья, формовка изделий, резка, сушка, обжиг и упаковка кирпичей. В ходе производства кирпича на его поверхности могут образоваться различные дефекты: трещины, отбитости, сколы, шелушения и другие виды брака. Однако контроль качества осуществляется лишь на заключительной стадии – перед складированием готовой продукции. В то время, как часть дефектов, например, нарушение геометрии можно выявить на более ранних стадиях и использовать бракованные кирпичи как сырье для изготовления новых изделий. В связи с этим, целесообразно осуществлять контроль не только после сушки, но и после формования и резки кирпичей.

Качество кирпича определяется следующими параметрами [10]:

- 1) отклонение от размеров в мм: не более (± 4) по длине, по ширине (± 3), по толщине (± 3);
- 2) перпендикулярность граней и ребер кирпича, отнесенная к длине 120 в мм: не более (± 2);

- 3) перпендикулярность лицевых поверхностей и ребер в мм: не более (± 3) по ложку и (± 2) по тычку.

На лицевой поверхности кирпича не допускается наличие сколов и трещин, а также у готовых изделий не должно быть выявлено отличий по цвету по сравнению с эталоном, то есть образцом кирпича.

В настоящий момент времени на производстве контроль качества изделий осуществляется вручную специальными инспекторами. Экспертиза проводится на последнем этапе производства и заключается в выборе и исследовании нескольких готовых изделий из каждой партии на предмет соответствия требованиям ГОСТ. В случае обнаружения дефектов бракуется вся партия, что отрицательно сказывается на экономической составляющей производства. Кроме того, из-за человеческого фактора данная процедура занимает продолжительный период времени, а ее эффективность в течение времени снижается. В связи с этим, на основе анализа технологического процесса изготовления кирпичей для повышения эффективности оценивания их качества предлагается использовать технологию компьютерного зрения, основанную на обучении нейронной сети. Данный подход позволит автоматизировать процессы сбора, обработки и анализа видеопотоков с камер в режиме реального времени, что приведет к сокращению времени оценивания и к увеличению охвата партии исследуемых изделий.

Таким образом, цель разработки программного обеспечения заключалась в автоматизации процессов сбора, обработки, хранения и вывода информации о физических характеристиках кирпичей для принятия решения об их качестве.

Для решения данной цели были выполнены задачи по захвату видеопотока, распознаванию кирпичей, проверке их на наличие дефектов, а также регистрации в журнале событий итоговой информации об их качестве.

Для реализации указанных задач был разработан алгоритм оценки качества кирпичей, приведенный на рисунке 1.

К основным требованиям, предъявляемым к разрабатываемому программному обеспечению, относятся следующие:

- 1) возможность обработки нескольких видеопотоков в режиме реального времени;
- 2) простота развертывания и монтажа;
- 3) высокая скорость обработки и анализа данных;
- 4) возможность работы на устройствах, имеющих малую вычислительную мощность;
- 5) возможность интеграции с другими информационными системами.

К основным функциям программного обеспечения можно отнести следующие:

1. Обнаружение и классификация кирпичей.
2. Обнаружение и классификация дефектов кирпичей.
3. Осуществление параллельной обработки трех видеопотоков, поступающих с камер, расположенных сверху, слева и справа.

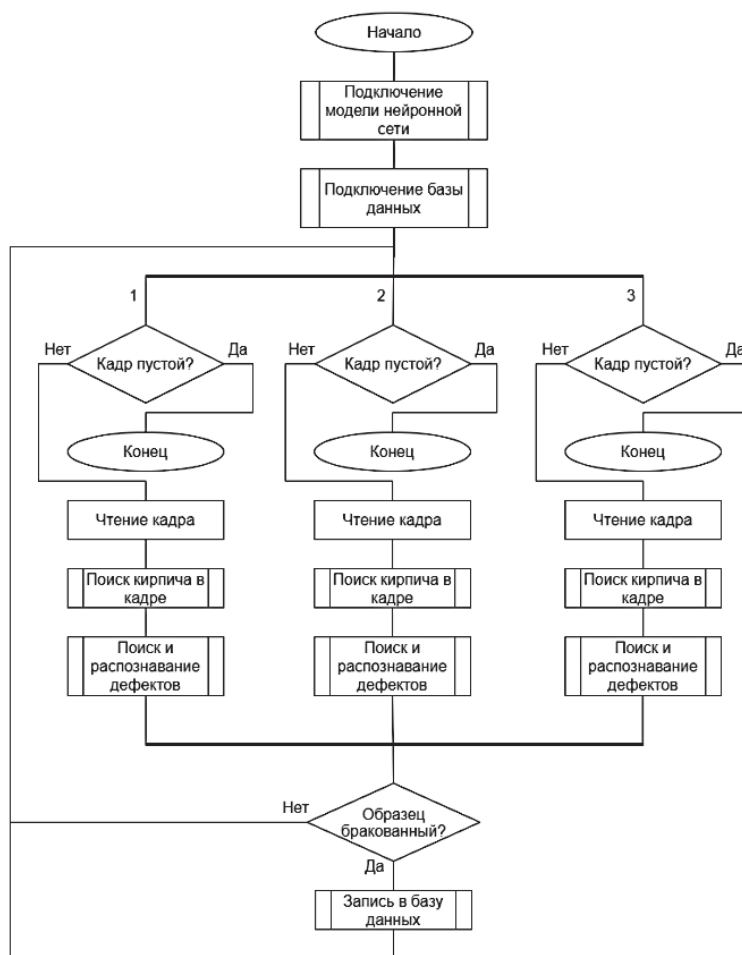


Рисунок 1 – Алгоритм распознавания дефектов кирпича

Таким образом, основными задачами программного обеспечения являются процессы сбора, обработки, анализа и записи в базу данных информации об обнаружении брака с указанием даты, времени, наименования кирпича, номера партии, вида дефекта, данных оператора, номера смены.

Для реализации заявленного функционала было решено создать две основные роли пользователей: администратор и оператор. Пользователь с ролью администратор обладает полными правами, связанными с установкой и настройкой программного обеспечения, а также с разграничением прав доступа пользователей к различным элементам программного продукта. Он имеет возможность редактировать базу данных, а также добавлять новых пользователей, то есть задачи администратора заключаются в добавлении и удалении пользователей, а также в редактировании информации о кирпичах (номерах партий, анализируемых дефектах и т.д.). Оператор работает непосредственно с изделиями, собирая и

фиксируя информацию о них путем анализа видеопотоков. Он может просматривать информацию, хранящуюся в базе данных, без возможности ее исправить. Данная функция просмотра данных необходима для контроля за процессом оценивания качества кирпича.

На основании всех перечисленных характеристик была создана база данных, позволяющая хранить и обрабатывать информацию, необходимую для работы программного обеспечения, структура данных представлена на рисунке 2.

Программное обеспечение для оценки качества кирпича представляет собой десктопное приложение с подключенной базой данных, в которой хранятся записи об исследованных кирпичах. В главной вкладке программы отображаются три видеопотока (вид сверху, вид слева, вид справа), в которых производится параллельная обработка последовательностей кадров с кирпичом на наличие в нем дефектов (сколы, трещины, несоответствие цвета, нарушение геометрии). При обнаружении несоответствий выводится процент точности распознавания каждого вида дефекта, а также делается вывод о том, является ли кирпич бракованным или нет. Если обнаружен брак, то в базе данных создается запись с указанием даты, времени, наименования кирпича, номера партии, вида дефекта, фамилии и инициалов оператора, номера смены.

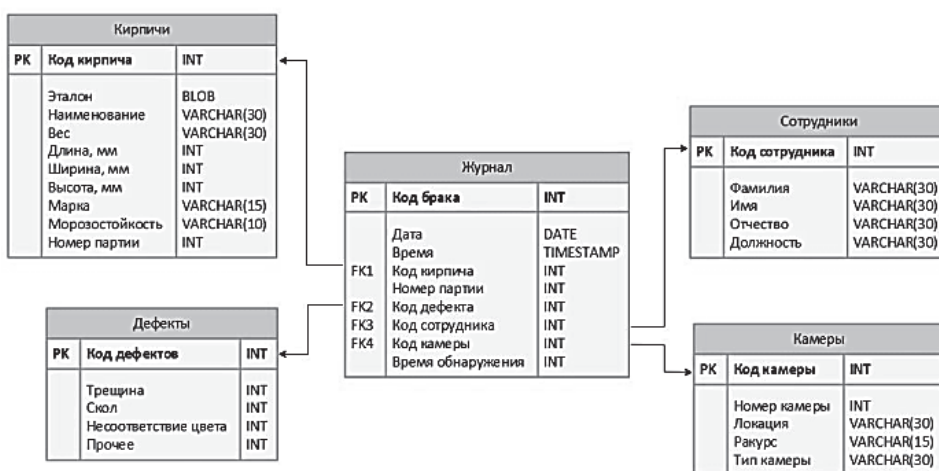


Рисунок 2 – Физическая модель данных

Разрабатываемое программное обеспечение для оценки качества кирпича должно работать в режиме реального времени, поэтому при выборе модели обнаружения необходимо учитывать скорость ее работы. Для выбора оптимальной модели были проанализированы одноэтапные и двухэтапные детекторы.

Двухэтапная архитектура включает предложение области объекта с помощью традиционных методов компьютерного зрения или глубоких сетей, за которой следует классификация объектов на основе признаков, извлеченных из предложенной области с помощью регрессии ограничивающей рамки. Это

обеспечивают наивысшую точность обнаружения, но обычно отрицательно сказывается на скорости работы. Двухэтапные детекторы объектов сначала находят интересующую область и используют ее для классификации. Однако такие многоступенчатые детекторы обычно не поддаются сквозному обучению, поскольку кадрирование – недифференцируемая операция.

В отличие от двухэтапных, одноэтапные детекторы предсказывают ограничивающие рамки над изображениями без этапа предложения области. Этот процесс занимает меньше времени и поэтому может использоваться в приложениях, работающих в режиме реального времени. Основное преимущество одноэтапных детекторов заключается в том, что эти алгоритмы, как правило, быстрее, чем многоступенчатые детекторы, и конструктивно проще.

Сравнение детекторов было выполнено на наборе данных Microsoft COCO. В качестве критериев сравнения были сопоставлены показатели средней точности (mAP) и времени инференса (мс). На основе значения средней точности (mAP) лучшим алгоритмом обнаружения объектов в реальном времени является YOLOv4. Также, основываясь на текущем времени вывода, YOLOv4 является самым быстрым алгоритмом обнаружения объектов (12 мс), за ним следуют TTFNet (18,4 мс) и YOLOv3 (29 мс). Помимо этого, в исследовании было установлено, что применение одноэтапного детектора YOLO привело к значительному сокращению времени вывода по сравнению с использованием двухэтапного метода Mask R-CNN (333 мс). Таким образом, для разрабатываемого программного обеспечения был выбран детектор YOLOv4, так как данная модель идеально подходит для работы в режиме реального времени, сочетая в себе скорость и качество, а также имеет простую структуру и не требует большой вычислительной мощности для обучения.

Для обучения модели нейронной сети был собран и размечен набор данных. Основная часть выборки была получена на Новосибирском кирпичном заводе «Ликолор», в систему которого внедряется разрабатываемое программное обеспечение. Общее количество собранных экземпляров составило около трех тысяч. Также дополнительно было собрано около двух тысяч изображений, что позволило увеличить и разнообразить итоговый объем данных, что впоследствии позволило получить более точные результаты. Для обучения высококачественных моделей обнаружения объектов необходимо предоставить алгоритму точно размеченные данные. Разметка данных – процесс выявления людьми объектов в сырых данных (например, в видео или на изображениях) и добавление к ним меток класса. Это помогает моделям делать более точные прогнозы и оценки. Разметка производилась в DarkMark.

DarkMark – это инструмент с графическим интерфейсом, написанный на C++ и используемый для разметки данных. Он был создан специально для работы с фреймворком нейронной сети Darknet и имеет несколько функций, адаптированных для использования с Darknet и детекторами YOLO. На этапе разметки были определены классы кирпичей, а также виды их дефектов. Далее размеченные данные, содержащие достоверную информацию, были переданы алгоритму для обучения модели.

Длительность обучения составила 80 часов с количеством эпох (итераций) 46 000. Также было установлено, что подготовленный детектор может давать точные оценки на новом наборе данных.

После обучения модели было проведено ее тестирование на одноплатном компьютере Jetson Nano с оперативной памятью 4 ГБ. В результате средняя точность (mAP) составила 96% при времени обработки, равном 18 мс. В таблице 1 представлены результаты сравнения производительности обученной модели с аналогами в области контроля качества.

Таблица 1 – Результаты сравнения разработанной модели с аналогами

Решаемая задача	Используемая модель нейронной сети	mAP, %	Время обработки, мс
Распознавание дефектов промышленных труб [11]	DetectoRS	95	18
	YOLOv4	94	15
Распознавание дефектов дорожного покрытия [12]	Faster R-CNN	97	29
Распознавание болезней растений [13]	YOLOv3	93	26
Контроль качества творога [14]	YOLOv5	95	16
Распознавание дефектов запчастей [15]	Faster R-CNN	98	42
Инспекция упаковки муки [16]	RetinaNet	96	53
Распознавание дефектов ткани [17]	SSD	94	21
Распознавание дефектов кирпича (разработанная модель)	YOLOv4	96	18

Как видно из данных таблицы, разработанный алгоритм по эффективности не уступает аналогичным моделям для контроля качества объектов.

Таким образом, в результате выполнения работы было спроектировано программное обеспечение для оценки качества кирпича, отличительными особенностями которого являются работа в режиме реального времени, высокая скорость обработки, возможность работы на устройствах с небольшой вычислительной мощностью.

Практическая значимость работы заключается в том, что анализ качества кирпича с использованием нейронных сетей является экономически более эффективным технологическим процессом по сравнению с ручным методом выявления дефектов, который оказывается более трудозатратным и медленным.

Разрабатываемое программное обеспечение предназначено для оценки качества кирпича на наличие сколов, трещин, шелушений и дефектных

отверстий, а также на выявление нарушений геометрии, на высолы (выход на поверхность кирпича водорастворимых солей) и на наличие прочих признаков брака. Программа может быть использована на производственных объектах, работающих по изготовлению кирпичей или в компаниях, занимающихся куплей и продажей строительных материалов, для определения качества данных изделий. Также данный программный продукт может применяться в лабораториях, занимающихся разработкой новых смесей для изготовления кирпичей, на этапе тестирования получившихся образцов на наличие дефектов.

Литература

1. Satorres Martínez S., Gómez Ortega J., Gámez García J. et al. A machine vision system for defect characterization on transparent parts with non-plane surfaces. *Machine Vision and Applications* 23, 1-13 (2012) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s00138-010-0281-0>.
2. Pizarro L., Mery D., Delpiano R. et al. Robust automated multiple view inspection. *Pattern Anal Applic* 11, 21-32 (2008) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s10044-007-0075-9>.
3. Carrasco M., Mery D. Automatic multiple view inspection using geometrical tracking and feature analysis in aluminum wheels. *Machine Vision and Applications* 22, 157–170 (2011) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s00138-010-0255-2>.
4. Malloch C.B., Kwak W.I. & Gerhardt L.A. A class of adaptive model- and object-driven nonuniform sampling methods for 3-D inspection. *Machine Vis. Apps.* 1, 97-114 (1988) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1007>.
5. Xiao M., Wang W., Shen X. et al. Research on defect detection method of powder metallurgy gear based on machine vision. *Machine Vision and Applications* 32, 51 (2021) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s00138-021-01177-7>.
6. Ahmed Fadzil M.H., Weng C.J. LED cosmetic flaw vision inspection system. *Pattern Analysis & Applic* 1, 62-70 (1998) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/BF01238027>.
7. Bodmarova A., Bennamoun M. & Kubik K. Suitability Analysis of Techniques for Flaw Detection in Textiles using Texture Analysis. *Pattern Analysis & Applications* 3, 254-266 (2000) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s100440070010>.
8. Lopez J.J., Cobos M. & Aguilera E. Computer-based detection and classification of flaws in citrus fruits. *Neural Comput & Applic* 20, 975-981 (2011) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s00521-010-0396-2>.
9. Mery D. Aluminum Casting Inspection using Deep Object Detection Methods and Simulated Ellipsoidal Defects. *Machine Vision and Applications* 32, 72 (2021) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s00138-021-01195-5>.
10. ГОСТ 530-2012 Кирпич и камень керамические. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2012. 31 с. (дата обращения: 27.05.2022).

11. Piironen T., Silven O., Pietikäinen M. et al. Automated visual inspection of rolled metal surfaces. *Machine Vis. Apps.* 3, 247-254 (1990) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/BF01211850>.
12. Кравцов С.С., Чантиева М.Э. Автоматическое обнаружение дефектов дорожного полотна при помощи сверточных нейронных сетей // *Colloquium-journal*. 2022. № 3(126). С. 42-47.
13. Рыбаков А.В., Выборнов Н.А., Рыбаков И.А. Анализ методов компьютерного зрения, перспективных для применения в агропромышленном комплексе // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. 2022. № 1(57). С. 128-138.
14. Благовещенская М.М., Давыдова Г.Р., Семина Н.А., Благовещенский И.Г. Использование интеллектуальных технологий для контроля качества творага // *Вестник ВГУИТ*. 2015. № 1(63). С. 110-115.
15. Raiser S., Lughofer E., Eitzinger C. et al. Impact of object extraction methods on classification performance in surface inspection systems. *Machine Vision and Applications* 21, 627-641 (2010) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s00138-009-0205-z>.
16. Карелина Е.Б., Клехо Д.Ю., Батырев Ю.П. Разработка интеллектуальной системы управления технологическим процессом бестарного хранения муки // *Вестник МГУЛ – Лесной вестник*. 2020. № 1. С. 124-130.
17. Schneider D., Holtermann T. & Merhof D. A traverse inspection system for high precision visual on-loom fabric defect detection. *Machine Vision and Applications* 25, 1585-1599 (2014) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s00138-014-0600-y>.

УДК 004.05

**Математическое и программное обеспечение вычислительных
компьютерных сетей, повышение их эффективности путём внедрения
принципов и компонентов программно-определяемой сети (часть 1)**

Ю.В. Стреналюк, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Информационные технологии и управляющие системы»,

И.Н. Леандров, магистрант кафедры

«Информационные технологии и управляющие системы»,

Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области

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

Описываются и анализируются возможности программно-конфигурируемой сети с целью внедрения компонентов ПКС в локально-вычислительную сеть, таким образом модернизировав её, а именно определяется, каким образом принцип работы ПКС изменит сеть, анализируются технологии ПКС для модернизации, а также обозначается роль специального протокола OpenFlow в работе сети ПКС. Исходя из результатов анализа, ставится постановка задачи исследования.

Компьютерные сети, программно-определяемые сети.

**Mathematical and software support of computing computer networks,
increasing their efficiency by implementing the principles and components
of a software-defined network (part 1)**

Yu.V. Strenalyuk, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor of the Department «Information Technologies and Control Systems»,

I.N. Leandrov, Master's student of the Department

«Information Technologies and Control Systems»,

State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region

«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

The possibilities of a software-configurable network are described and analyzed in order to introduce the components of the PC into the local area network, thus modernizing it, namely, it is determined how the principle of operation of the PC will change the network, the PC technologies for modernization are analyzed, and the role of the special OpenFlow protocol in the operation of the PC network is also indicated. Based on the results of the analysis, the formulation of the research task is set.

Computer networks, software-defined networks.

Введение

Значительные изменения в архитектуре и рост сложности информационных систем и комплексов, облачные платформы и сервисы хранения/обработки больших объемов данных, мобильные сети с изменяющейся топологией и пр. приводят к тому, что эффективность применения традиционных сетей снижается и назревает необходимость реализации сетевой инфраструктуры на базе программно-определяемых (конфигурируемых) сетей (ПОС) и хранилищ информации.

Архитектура программно-конфигурируемых (ПКС) сетей – (*Software Defined Networking/SDN*) представляет значительные преимущества для решения задач обеспечения информационной безопасности сетей передачи информации, тем не менее, определенный ряд проблем, происхождение которых определено непосредственно особенностями технологии, остается актуальным. Приложения управления сетью, используемые в ПКС, предоставляют широкий спектр возможностей по противодействию угрозам за счет поддержки сложных интеллектуальных алгоритмов как предотвращения попадания в сеть злонамеренных потоков, так и сведения к минимуму последствий вторжений. При этом требуемая степень вмешательства на аппаратном уровне остается минимальной.

Часть 1. Анализ технологий программно-конфигурируемой сети

1.1 Развитие программно-конфигурируемой сети как предпосылка улучшения эффективности сети

Современные методы управления вычислительной сетью не обладают достаточной гибкостью для обеспечения соответствующего развития системы межсетевого взаимодействия в больших сетевых комплексах со сложной топологией. Такие сетевые комплексы не допускают использование методов, в основе которых лежит ручное конфигурирование каждого компонента сети, и требуют равномерного распределения нагрузки по всем элементам сети, а также гибкого и эффективного средства централизованного управления сетевой инфраструктурой. Для получения желаемого механизма управления в настоящее время представлена новая сетевая концепция. Такой концепцией является использование программно-конфигурируемых сетей.

В основе этой технологии лежит отделение управления сетевой инфраструктурой от передачи данных по сети. Это достигается использованием автоматизированных функций управления в программном обеспечении специального назначения, которое связывает компоненты сети с центром управления сетью, функционирующей на выделенном компьютере.

Таким образом, архитектуру программно-конфигурируемых сетей можно представить в виде трех уровней (см. рисунок 1):

- уровень инфраструктуры сети включает в себя комплекс сетевых устройств и линий связи;
- уровень управления;
- уровень приложений, в котором реализуются различные функции обработки сетевого трафика.



Рисунок 1 – Структура уровней ПКС

В нынешней модели при передаче кадров данных коммутатор *Ethernet* по данным таблицы коммутации посредством коммутационной матрицы обрабатывает и передает кадры данных на требуемый выходной порт, т.е. в нем одновременно работают плоскость управления и плоскость передачи данных, одна – на встроенном микроконтроллере, а вторая в таблице и коммутационной матрице.

Для технологии ПКС в коммутаторе реализован лишь уровень передачи данных на простом устройстве, принимающем поступивший кадр, считывании из него адреса и передаче кадра коммутационной матрице.

В противном случае коммутатор отправляет запрос на центральный контроллер управления ПКС и вносит необходимые изменения в таблицу коммутации, а коммутатор осуществляет обработку кадра. Поэтому контроллер управления имеет актуальную информацию о структуре и топологии сети, что дает возможность оптимизировать пересылку кадров и обеспечивать связи «порт-порт» на уровне *L2*, не прибегая к *IP*-маршрутизации. При этом в терминологии ПКС используется название – таблица потоков.

ПКС при управлении сетью позволяет достичь прироста эффективности по следующим причинам:

- в технологии ПКС реализовано дифференцирование задачи управления сетевой инфраструктурой и задачи передачи данных по сети. Процессы передачи данных по сети продолжают выполнять на коммутаторе, тогда как за управление берет на себя контроллер ПКС. Такое разделение позволяет повысить эффективность межсетевого взаимодействия, минимизировать нагрузку механизмов управления на пропускную способность сети. Производительность сети, построенной на технологии ПКС, резко возрастает в связи с отсут-

вием на сетевых устройствах ответственности за принятие решений: все ресурсы сетевых устройств направлены на ускорение перемещения трафика;

- представляется возможным создать гибкую централизованную систему управления сетью с возможностью получения представления как о всей сети в целом, так и о каждом устройстве в отдельности. Система мониторинга за состоянием сети позволит оперативно предсказывать и выявлять проблемы в сети, задавать и перераспределять нагрузку на устройства без непосредственного контакта с устройством или ручной настройки его интерфейсов;

- технология предоставляет системному администратору гибкий механизм классификации процессов, происходящих в сети. Таким образом, различные типы трафика получают различные значения приоритета или правила для обработки. С использованием специального языка администратор определяет, какое действие нужно совершить с входящим пакетом: переслать пакет дальше, отказаться от пересылки пакета, изменить поле в заголовке пакета. Выбор того или иного действия зависит от многих параметров, таких как: наличие каких-то специфичных битов в содержимом сетевого пакета; приоритет обработки сетевых пакетов данной конфигурации; состояние сетевого оборудования, обрабатывающего данный пакет.

Таким образом, технология ПКС предоставляет возможность разбиения всей сетевой инфраструктуры на логические элементы: то есть определение возможных путей пересылки для того или иного сетевого потока.

1.2. Модернизация локально-вычислительной сети за счет принципа работы программно-конфигурируемой сети

Интеграция компонентов ПКС позволяет модернизировать ЛВС в существующей сетевой инфраструктуре. При этом не нужна замена существующей инфраструктуры, т.к. практически все преимущества ПКС-достигаются даже при частичной замене ядра сети или уровня агрегации. ПКС-сеть интегрируются с IP сетями на уровнях *L2* и *L3*. При этом одно подключение включает физические интерфейсы с разных коммутаторов. Один ПКС сегмент может иметь несколько *L2* и/или *L3* подключений с IP сетями, реализованных с одних или разных ПКС коммутаторов, входящих в домен.

Таким образом, можно предложить теоретическую схему модернизации локально-вычислительной сети с учетом интеграции компонентов программно-конфигурируемой сети.

В рамках традиционной архитектуры (рисунок 2) сетевые задачи распределены по устройствам, такие как:

- Балансировка нагрузки
- Сетевое экранирование
- Управление полосой и прочие.

Такой подход, несмотря на свою практичность, делает обслуживание инфраструктуры трудозатратным, а гибкость настроек зачастую не позволяет оптимизировать трафик под различные условия.

Ввиду таких условий и приоритизации курса на виртуализацию сети схе-

ма модернизированной ЛВС примерно будет иметь такой вид (рисунок 3).

Таким образом, можно подчеркнуть эффективность от внедрения компонентов следующими особенностями:

- централизованное управление сетью *OpenFlow*;
- свободно распределенная топология (*Location Free Networking*) – виртуальных машины и сетевые устройства в любой точке сети;
- снижение эксплуатационных расходов, связанных с конфигурированием и обслуживанием сети;
- существенное снижение сложности сети и ее конфигурирования.

Недостатки:

1. Малое количество проприетарных решений с учетом ПКС специфики, стоимость которых нередко сопоставима с проприетарными решениями
2. Отсутствие поддержки вендора, что является необходимым в работе крупных компаний
3. Сложность эксплуатации и установки доп. средств
4. Малое количество документации.

**1.3. Анализ решений программно-конфигурируемой сети
для модернизации локально-вычислительной сети**

Сейчас по технологии ПКС видно активное участие крупных вендоров сетевых решений. Благодаря развитию предлагаемых ими решений происходит процесс стандартизации технологий ПКС, что подкрепляется множеством исследований в этой области и их приоритизацию.

Основные решения ПКС классифицируются в относительно архитектуры ПКС и образуют следующие группы:

- спецпроцессоры гибридного вида, использующие протоколы традиционной архитектуры и протоколы ПКС (коммутаторы, маршрутизаторы);
- программные средства для управления сетью (контроллеры типа *OpenDayLight*, на его базе разрабатываются и вендорные решения;
- программные средства, выполняющие разные прикладные задачи (дополняющие возможности по управлению сетью, мониторинг и контроль качества, информационную безопасность и пр.).
- «коробочные» решения – различные решения, включающее все необходимые составляющие.

Исходя из этого, выделим характерные прикладные решения:

- открытые решения и протоколы в качестве основных.
- комплексные решения (с привлечением специализированных), поддерживающие необходимые протоколы и интерфейсы.

Для сетевых решений характерны следующие черты:

- уровень управления на сетевых устройствах;
- гибридный подход с логическим уровнем, взаимодействующим с сетевым оборудованием;
- включение фирменных составляющих.

Таблица 1 – Решения ПКС

	Поддержка OpenFlow	Поддержка расширений, специфичных для производителя
Уровень инфраструктуры	ARM, Cisco, Centec Networks, Dell, HP, IBM, ADARA Networks, NEC, Active Broadband Networks, BigSwitch, Broadcom, Juniper networks///	Avaya, Arista, BigSwitch, Cisco, Oracle, Huawei, Extreme Networks
Уровень управления	На основе OpenDayLight: Avaya, Cisco, IBM, Ciena, Dell, HP, Extreme networks, Ericsson, Active Broadband Networks	На основе контроллеров: ADVA Optical Networking, Beacon, Cyan, NEC, Netsocket, Huawei, BigSwitch, Juniper
Уровень приложений	Radware, Cyan, Arista, Centec Networks, Aricent, Ciena, Amartus, Corsa Technologies	
Интегральные решения	Dell, Ericsson, MRV Communications	

Таким образом, для анализа технологии был выбран вариант разработки стенда на основе открытых решений, позволяющего оценить преимущества и недостатки программно-конфигурируемой сети.

1.4. Характеристика и модернизация модели локально-вычислительной сети

Для реализации проведения оценки эффективности сети на экспериментальном стенде предлагается создания небольшой модели локально-вычислительной сети.

Традиционная модель локально-вычислительной сети представлена на рисунке 4.

Модель, изображенная на схеме, представляет собой сеть из 4 групп хостов, подключенных к *VLAN*, кроме серверов. От коммутаторов проходит *Ethernet* кабель на 100 Mbps.

Коммутаторы по гигабитной *Ethernet* линии подключены к маршрутизатору, тем самым позволяя сетям «общаться» между собой. Также имеется за пределом маршрутизатора имеется *FireWall* и шлюз, необходимый для фильтрации трафика.

Кластер серверов представляет собой набор серверов, таких *FTP*, сервер приложений, *Web*-сервисы и т.д. Они также могут служить генератором трафика и производить определенную нагрузку на сетевую инфраструктуру.

Для моделирования исходных данных, полагаем, что основным видом трафика в ЛВС организации является документооборот, мультимедийная информация, обслуживание множества внешне и внутренне входящих пакетов для работы серверов.

При одновременном доступе общего количества около 100 хостов к серверам хранения данных, веб-сервисам и т.п. трафик будет примерно равен 60-80 Мбит/с, что позволяет говорить о значительном запасе пропускной способности сети при использовании архитектуры 1000BASE-T в магистральных сегментах

ЛВС.

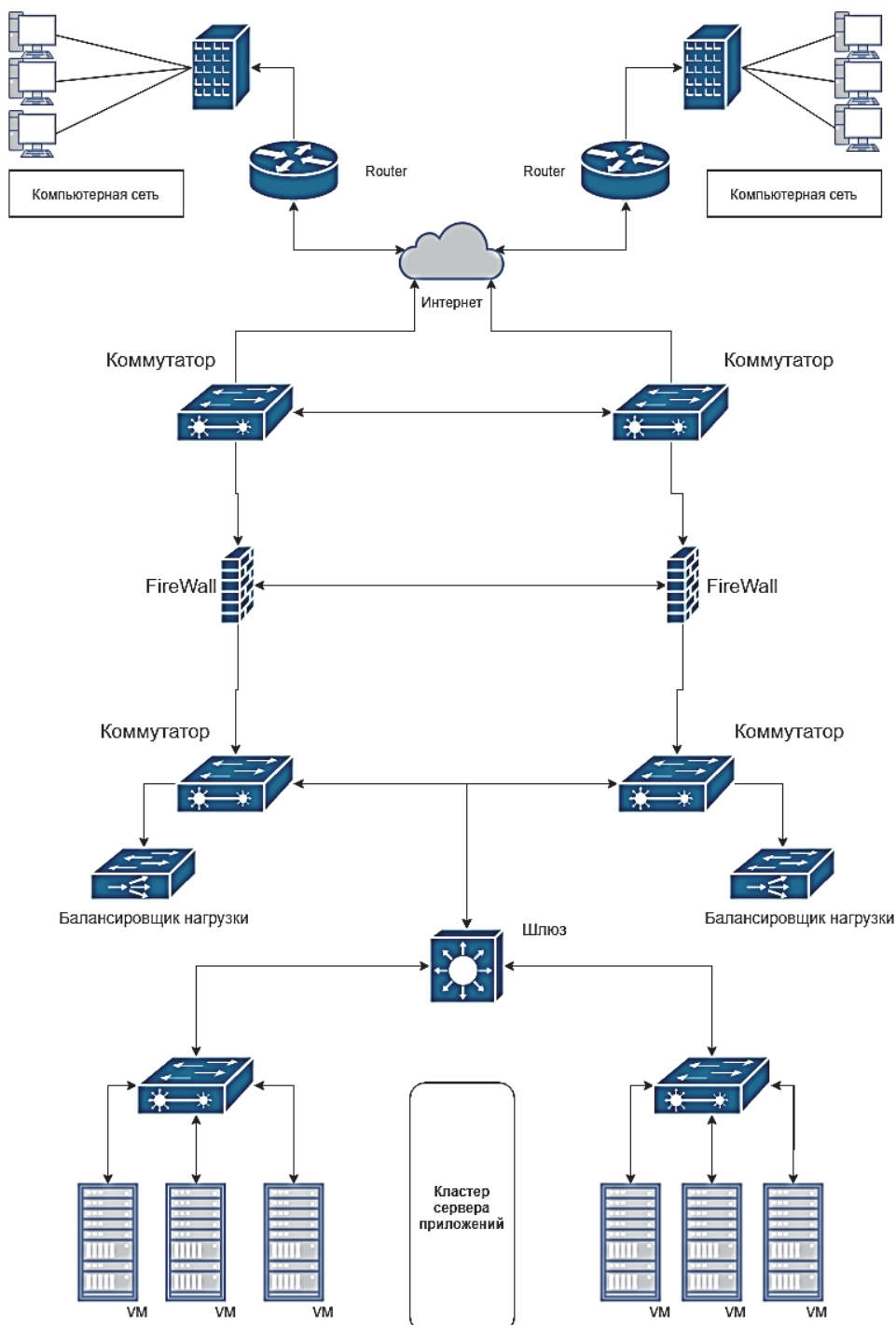


Рисунок 2 – Пример традиционной архитектуры

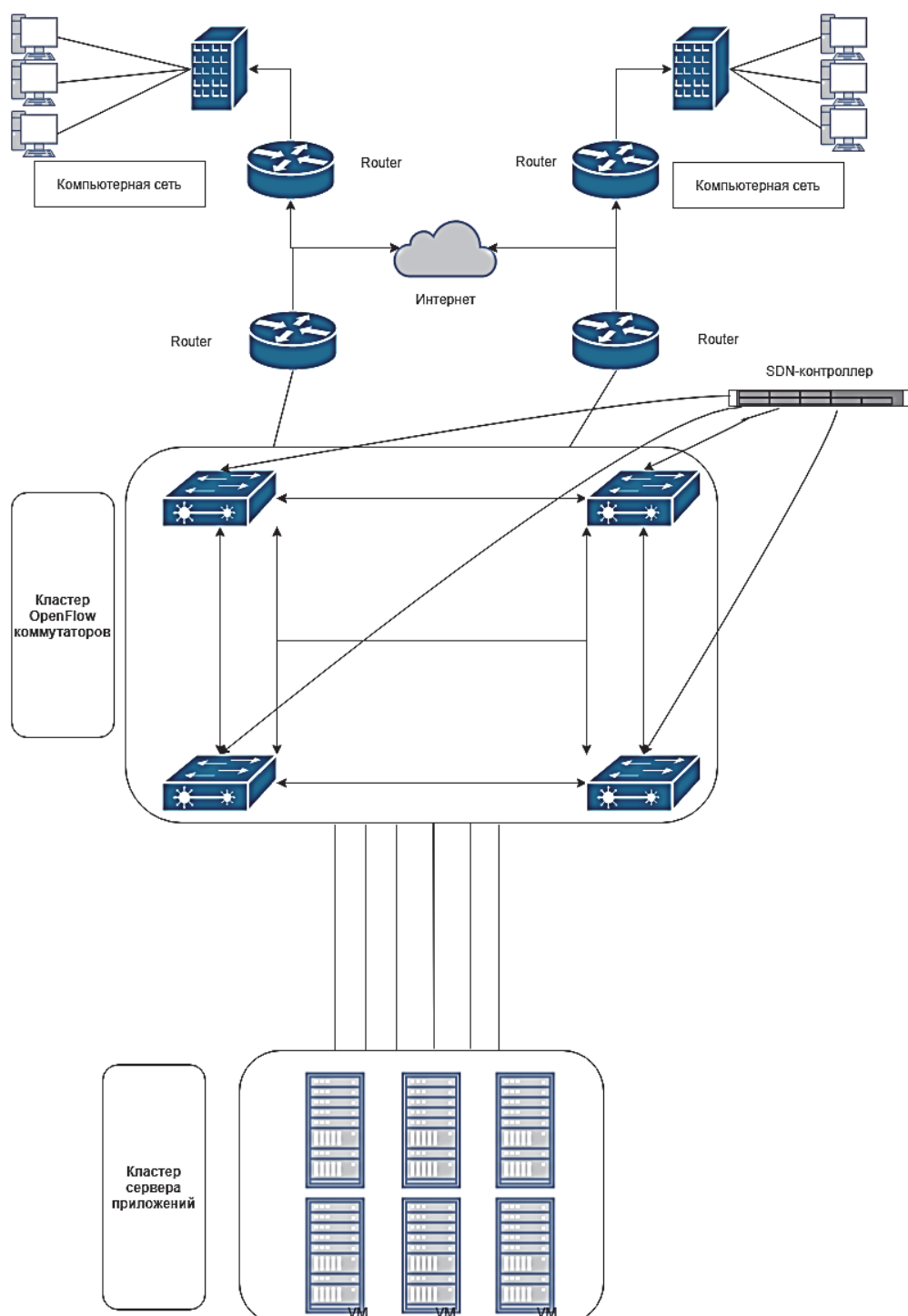


Рисунок 3 – Схема модернизированной ЛВС (теоретическая)

Главной проблемой данной топологии будет являться задержка при обработке и отправке данных, так как на коммутаторах в традиционной сети содержатся уровни управления, которые и создают задержку в сети, в то время как в ПКС уровень управления берет на себя контроллер.

Для более детального описания модели традиционной сети были выбраны популярные и «незамысловатые» модели коммутаторов и маршрутизатора.

Коммутатор D-Link DGS-1510-28X обладает статической маршрутизацией и обеспечивает надежное соединение и позволяет просто масштабировать существующую сеть. Коммутаторы этой серии оснащены 16, 24 или 48 портами 10/100/1000 Мбит/с, а также 2-4 портами 10G SFP+, используемыми для стекирования или uplink-соединения (рисунок 5).

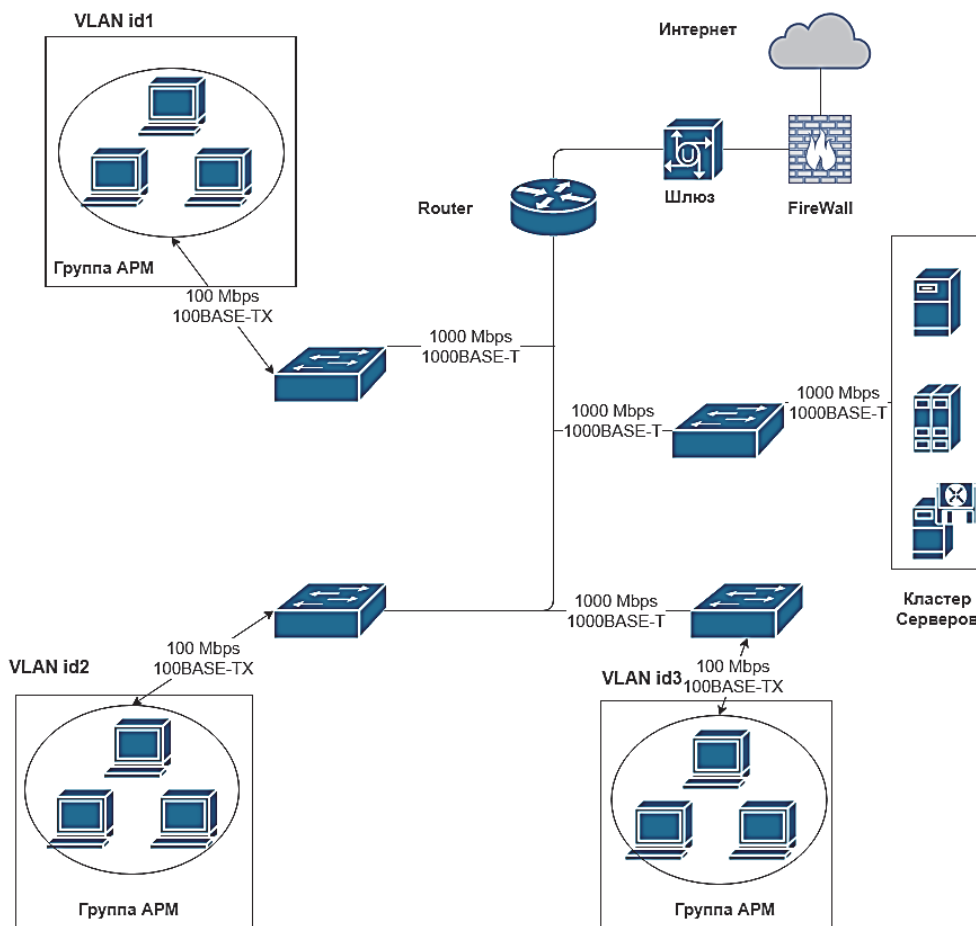


Рисунок 4 – Рассматриваемая модель традиционной сети



Рисунок 5 – L2 Коммутатор D-Link DGS-1510-28X – 20587 руб

Таблица 2 – Характеристики коммутатора D-Link DGS-1510-28X

Возможность установки в стойку	есть
Количество LAN-портов	24
Базовая скорость передачи данных	1 Гбит/с
Тип управления коммутатора	уровень 2
Особенности	поддержка работы в стеке
Сетевые стандарты	IEEE 802.1q (VLAN), IEEE 802.3ad (Link Aggregation Control Protocol), IEEE 802.1p (Priority tags), IEEE 802.1d (Spanning Tree), Jumbo Frame, автоопределение MDI/MDIX, IEEE 802.1s (Multiple Spanning Tree)
Количество uplink/стека/SFP-портов и модулей	4
Максимальная скорость uplink/SFP-портов	10 Гбит/с

MikroTik RB4011iGS+RM (рисунок 6, таблица 3) – это роутер без *Wi-Fi* на **10 гигабитных** сетевых портов и **1 SFP+** порт для подключения оптики (поддерживаются SFP модули 25G и 10G). Роутер имеет аппаратное шифрование *IPsec*. Внутри устройства установлен мощный четырехядерный процессор с частотой 1.4 ГГц. Маршрутизатор подходит для использования в сетях с количеством абонентов до 200 человек, а также для построения скоростных *VPN* каналов.



Рисунок 6 – Маршрутизатор mikrotik-rb4011igs-rm – 50 тыс. руб

Таблица 3 – Характеристики маршрутизатора MikroTik

Возможность установки в стойку	есть
Количество LAN-портов	10
Базовая скорость передачи данных	1 Гбит/с
Количество WAN-портов	1
Функции VPN	IPSec
Особенности	поддержка PoE
Количество uplink/стек/SFP-портов и модулей	1
Максимальная скорость uplink/SFP-портов	10 Гбит/сек
Процессор	4-х ядерный AL21400 с частотой 1.4 ГГц; чип коммутации: RTL8367SB; датчик напряжения; датчик температуры платы; операционная система: RouterOS; MTBF: 200'000 часов, входное напряжение

Преимущества и недостатки модели традиционной сети – в Таблице 4.

Таблица 4 – Преимущества и недостатки модели традиционной сети

Преимущества	Недостатки
- Надежная эксплуатация сети. VLAN позволяет конфигурировать и изменять сегменты сети - Высокая надежность сети, которая обусловлена опытом решения известных проблем - Удобное развертывание политик и конфигураций трафика - Применение проприетарных межсетевых экранов	- Низкая способность балансировки нагрузки - Рост задержки обработки пакетов - Большая вероятность джиттера во время использования VoIP технологий обусловлена загруженностью сети и большим временем разброса прохождения IP-пакета вследствие коллизий обработки коммутаторами - Отсутствие программируемости сети - Низкая масштабируемость сети

Для решения подобных проблем предлагается модернизировать сеть, внедрив элементы ПКС (рисунок 7).

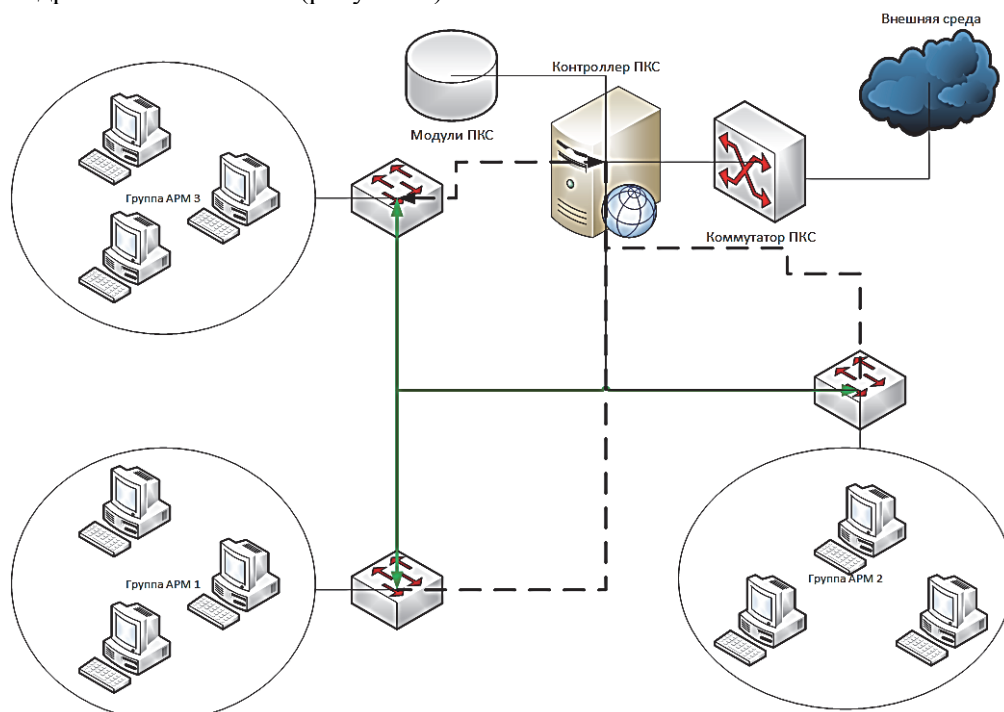


Рисунок 7 – Фрагмент топологии рассматриваемой модели модернизированной ЛВС

Сразу можно выделить следующие отличия, сравнивая две модели:

- 1) Коммутаторы соединены между собой и подключены к контроллеру ПКС
- 2) Отсутствие *FireWall*

3) Отсутствие маршрутизатора, его роль способен выполнять контроллер ПКС

Данные отличия существенно вносят изменения обработки данных в сетевой инфраструктуре. Реализация многих функций, которые осуществляются у традиционных сетей через различные решения могут осуществляться на уровне приложения, реализуемого на контроллере ПКС.

Данная сеть будет обладать всеми упомянутыми преимуществами, а также:

- эффективная маршрутизация;
- программируемость сети;
- повышение надежности функционирования сети;
- уменьшение капитальных затрат.

Также архитектура программно-конфигурируемых сетей предоставляет широкие возможности по внедрению новых методов обеспечения информационной безопасности в свою архитектуру. Совокупность механизма унифицированного доступа к сетевой топологии и повышенной программируемости компонентов позволяет, к примеру, обеспечить сбор данных с систем обнаружения и предотвращения вторжений с их дальнейшей обработкой и внесением изменений в конфигурацию. Именно это свойство ПКС делает данную сетевую архитектуру значительно более привлекательной с точки зрения построения средств обеспечения защищенности, нежели традиционные подходы.

1.4. Роль протокола OpenFlow в модернизированной

1.5. локально-вычислительной сети

В основе архитектуры ПКС лежит открытый протокол *OpenFlow*, обеспечивающий управление сетевой архитектурой. Преимущество этого протокола – он не принадлежит конкретному производителю сетевого оборудования, и, значит, применим для широкого спектра устройств различных производителей.

Протокол *OpenFlow* позволяет задавать конфигурацию сетевых устройств с централизованного аппарата управления сетью – контроллера ПКС, основные функции которого добавление и удаление записей из таблицы сетевых потоков в динамическом режиме и анализ состояния всей сети.

Это дает возможность системному администратору оценку состояния сети в данный момент с использованием сетевой ОС.

Задачи системы управления сетью

сбор сведений о компонентах сети,

сбор статистики взаимодействий внутри сети,

настройка сетевого оборудования.

Администратор сети имеет возможность задавать правила передачи данных в сети.

Выводы по части I

На основе концепции ПКС и принципов работы данной сети был сделан вывод, что внедрение ПКС позволяет увеличить безопасность и надежность сетей, а также воспользоваться улучшенными возможностями по упрощению, визуализации и виртуализации, недоступными для имеющихся решений.

На основе анализа решений ПКС был выбран вариант реализации на ос-

нове открытых решений, а теоретические схемы традиционной сети и ПКС позволили выделить преимущества и недостатки обоих вариантов.

Для реализации проведения оценки эффективности сети на экспериментальном стенде была создана небольшая модель локально-вычислительной сети и дана краткая характеристика, которая была модернизирована путем внедрения программно-конфигурируемых элементов. Ввиду этого были выделены следующие особенности:

- Коммутаторы соединены между собой и подключены к контроллеру ПКС
- Отсутствие *FireWall*
- Отсутствие маршрутизатора, его роль способен выполнять контроллер ПКС.

Данные отличия существенно вносят изменения обработки данных в сетевой инфраструктуре. Реализация многих функций, которые осуществляются у традиционных сетей через различные решения могут осуществляться на уровне приложения, реализуемого на контроллере ПКС.

Литература

1. Ушаков Ю.А., Ушакова М.В., Шухман М. В.. Основы программно-конфигурируемых сетей: учебное пособие. Самара: ПГУТИ, 2015. 111с.
2. Полежаев П.Н., Адрова Л.С. Разработка архитектуры системы защиты информации в корпоративных программно-конфигурируемых сетях // Труды Международной научно-технической конференции, Том 1 «Перспективные информационные технологии», 2015.
3. Адрова Л.С., Полежаев П.Н. Разработка системы управления корпоративными сетями на основе технологии программно-конфигурируемых сетей // Международная научно-техническая конференция «Перспективные информационные технологии», 2014.
4. Бахарева Н.Ф., Полежаев П.Н., Шухман А.Е., Ушаков Ю.А. Управление корпоративными программно-конфигурируемыми сетями // Вестник Оренбургского государственного университета. № 13. 2015.
5. Захаров А.А., Попов Е.Ф., Фучко М.М.. Аспекты информационной безопасности архитектуры ПКС // Вестник СибГУТИ. № 1 83. 2016.
6. Смелянский Р.Л. Технологии ПКС и NFV: Новые возможности для телекоммуникаций // Вестник связи. 2014. № 1.

УДК 004.05; 004.4

**Автоматизация процессов регрессионного тестирования
при разработке и модернизации программного обеспечения**

Л.Е. Суркова, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
«Информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве»,
ORCID: 0000-0002-4067-1875,

С.А. Булычева, студентка магистратуры кафедры «Информационных систем,
технологий и автоматизации в строительстве»,
Национальный Исследовательский Московский государственный
строительный университет, г. Москва

В работе показан один из возможных вариантов автоматизации процессов регрессионного тестирования программного обеспечения на основе автоматизации операций. В качестве тестируемого программного продукта выступает программа для управления взаимоотношениями с контрагентами. В качестве инструментальной среды используются интегрированная среда разработки PyCharm и система управления тестированием Allure. Предложены тест-кейсы для автоматизированного тестирования и представлены возможности визуализированных отчетов по тестированию программного обеспечения. Предполагается, что целесообразность и эффективность использования автоматизированного тестирования возрастает при долгосрочных планах по его применению.

Программное обеспечение, тестирование, регрессионное тестирование, тест-кейс.

**Automation of regression testing processes in software
development and modernization**

L.E. Surkova, Ph. D., associate Professor, associate Professor of the Department of
Information systems, technologies and automation in construction,

S.A. Bulychева, master's student of Information systems,
technologies and automation in construction Chai,
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

The article shows one of the possible options for automating the processes of regression testing of software based on automation of operations. The tested software product is a program for managing relationships with counterparties. The integrated PyCharm development environment and the Allure testing management system are used as a tool environment. Test cases for automated testing are proposed and the possibilities of visualized software testing reports are presented. It is assumed that the expediency and efficiency of using automated testing increases with long-term plans for its application.

Software, testing, regression testing, test-case.

Введение

С повсеместным и ускоренным развитием технического прогресса увеличивается количество и качество программных средств на рынке. В связи с этим растет конкуренция между различными организациями, представляющими свой продукт. Поэтому в разработке программного обеспечения (ПО) важно уделять достаточно внимания не только реализации функциональности, но и качеству программного обеспечения. Одним из способов контроля качества продукта является тестирование [1], т.е. процесс проверки соответствия ожидаемого результата работы продукта фактическому. Процесс тестирования направлен на выявления разного рода ошибок, которые приносят неудобство конечным пользователям, из-за чего они могут перестать пользоваться данным программным обеспечением. Выявление и устранение ошибок на раннем этапе, то есть до предоставления ПО пользователям, совершенствует систему, что сохраняет и приумножает клиентов.

Выделяют достаточно большое количество видов тестирования [2], классифицируемых по разным признакам, однако наиболее часто используемым видом является регрессионное тестирование [3]. Главное отличие его от остальных видов заключается в том, что его проводят чаще остальных, так как это основной вид тестирования перед релизом программного обеспечения, то есть его выпуском для конечных пользователей. Основным недостатком регрессионного тестирования является то, что его необходимо выполнять регулярно после каждого изменения в функциональности программного обеспечения. Чем более крупным является тестируемое ПО, тем больше времени и ресурсов затрачивается на тестирование даже при минимальных изменениях функционала. Решение отказаться от данного вида тестирования может привести к ухудшению качества программного обеспечения, что отразится на пользователях, и может привести к финансовым потерям компании. Найм дополнительного персонала – один из возможных выходов из данной ситуации, однако стоит понимать, что на обучение новых сотрудников должны выделять своё время специалисты компании, которые и должны заниматься регрессионным тестированием.

Поэтому предложением по решению данной проблемы является автоматизация процесса тестирования, что позволяет увеличить скорость и объемы тестовых процессов, сократить количество необходимых ручных тестов. Все результаты такого тестирования представляются в виде подробных отчетов о процессе и результатах тестирования ПО и доступны для других участников процесса. Однако такой подход требует значительных ресурсов. Поэтому важно понимать, когда автоматизация действительно необходима, а когда от нее можно отказаться в пользу ручного тестирования.

Предметом исследования данной работы является тестирование программного обеспечения, реализуемого в организации по разработке программного обеспечения.

Целью данной работы является совершенствование процесса тестирования программного обеспечения для управления взаимоотношениями с контрагентами на основе автоматизации операций.

Методы и материалы

Технология разработки ПО, при которой тестирование играет ключевую роль – это RUP (Rational Unified Process), когда тестировщики вовлечены в процессы разработки ПО с самого начального этапа и принимают активное участие в выявлении и устранении наиболее существенных рисков при разработке программного продукта.

Автоматизированное тестирование разрабатываемого ПО реализуется с использованием специального программного обеспечения [4]. Для этого используется интегрированная среда разработки (Integrated Development Environment (IDE)) – ПО с широким инструментарием для написания и тестирования кода, включая текстовый редактор, компилятор и отладчик. В качестве интегрированной среды в работе используется PyCharm – одна из самых популярных кросс-платформенных IDE для языка программирования Python. В качестве используемой системы управления тестированием используется система Allure. Allure Framework – это гибкий и легкий инструмент для получения информации о ходе выполнения тестов и формирования отчетов для всех участников производственного процесса.

Результаты

Внедрение автоматизации процесса тестирования – процесс трудоемкий. Необходимо правильно подготовиться к автоматизации и оценить все возможные риски. Развёртывание процесса автоматизации включает в себя несколько этапов:

- Создание тест-плана
- Определение задач тестирования
- Написание тест-кейсов по выбранным задачам
- Выбор инструментов для автоматизации
- Отбор тестов для автоматизации
- Проектирование тестов для автоматизации
- Настройка приложений для автоматизации
- Подготовка тестовых данных
- Формирование отчетов о выполнении автотестов

Для наглядного отображения того, что нужно тестировать, построена UML-диаграмма (рис. 1).

Диаграмма вариантов использования включает в себя следующие элементы:

1. Актер – объект вне рассматриваемой системы, который взаимодействует с событиями, происходящими в ней: авторизованный пользователь; автоматизированный тест, тестировщик; программное обеспечение; Allure.
2. Вариант использования (прецеденты) – событие, которое происходит внутри рассматриваемой системы и с которым взаимодействует актер:

- Добавление карточки контрагента, куда входят добавление карточек физического лица, юридического лица и существующего контрагента;
- Добавление карточки договора;
- Добавление карточки документа;
- Добавление примечания, куда входит отправка примечания на почту;
- Формирование рейтинга, куда входит формирование рейтинга документа, договора и контрагента;
- Редактирование карточки контрагента;
- Удаление карточки контрагента;
- Анализ результата выполнения теста, куда входит формирование отчет по результату теста и оформление баг-репорта при нахождении ошибки.

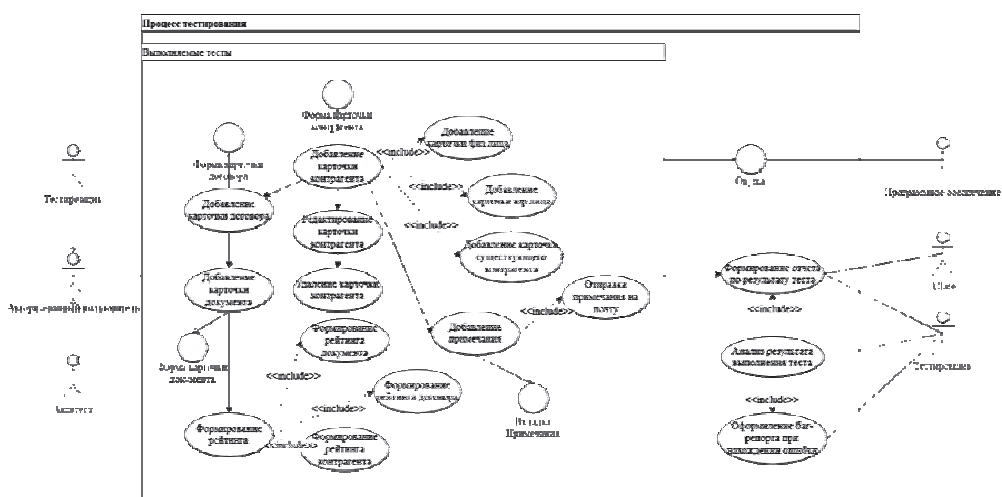


Рисунок 1 – Диаграмма вариантов использования процесс тестирования

3. Отношения – отображение различных видов семантических связей между элементами диаграммы.
4. Интерфейс – отображение абстрактного класса, которое показывает внешнее взаимодействие с системой без указания внутренней структуры. Выделены следующие интерфейсы:
 - Опума – тестируемое программное обеспечение;
 - Форма карточки контрагента;
 - Форма карточки договора;
 - Форма карточки документа;
 - Вкладка «Примечания».

Проанализировав рассматриваемое программное обеспечение и диаграмму вариантов использования разработаны тест-кейсы. Test Case (тестовый случай) – это задокументированное описание совокупности шагов, конкретных условий и параметров, необходимых для проверки реализации тестируемой функции или её части.

Для реализации поставленной задачи разработано 9 следующих тест-кейсов:

- Добавление объекта: контрагент (физическое и юридическое лицо), договор, документ. Является важнейшим функционалом, поэтому проверяется в первую очередь. Без возможности добавления объекта не получится внести его в базу для дальнейшего взаимодействия.

Примеры тест-кейсов для автоматизации процесса тестирования добавления контрагентов приведены в таблицах 1-2.

Таблица 1 – Тест «Добавление физического лица»

Наименование	Добавление контрагента – физическое лицо
Приоритет	Высокий
Описание	1. Нажать кнопку «Добавить»; 2. Выбрать поле «Класс» – «Физическое лицо»; 3. Заполнить поле «Фамилия»; 4. Заполнить поле «Имя»; 5. Заполнить поле «Отчество»; 6. Заполнить поле «Дата рождения»; 7. Заполнить поле «Фактический адрес»; 8. Заполнить поле «Регион» 9. Нажать кнопку «Добавить»

Таблица 2 – Тест «Добавление юридического лица»

Наименование	Добавление контрагента – юридическое лицо РФ
Приоритет	Высокий
Описание	1. Нажать кнопку «Добавить»; 2. Выбрать поле «Класс» – «Юридическое лицо РФ»; 3. Заполнить поле «Полное название»; 4. Выбрать поле «Орг.-правовая форма»; 5. Заполнить поле «ИНН»; 6. Заполнить поле «Юридический адрес»; 7. Нажать кнопку «Добавить»
Ожидаемый результат	Карточка контрагента добавится в список контрагентов; Статус контрагента – активный; Поле «Класс» = «Юридическое лицо РФ»; Поле «Полное наименование» = «ООО "Строй-Опт"»; Поле «Орг.-правовая форма» = «ООО»; Поле «ИНН» = «5507252445»; Поле «Юридический адрес» = «117186, ГОРОД МОСКВА, НАГОРНАЯ УЛИЦА, ДОМ 24, КОРПУС 9, ЭТ 1 ПОМ II КОМ 3»; Поле «Регион» = «Булычева София»
Статус	Актуален
id	3

- Добавление существующего контрагента. Может возникнуть ситуация, когда 2 оператора обрабатывали заявку одного контрагента, не согласовав свои действия друг с другом, и последовательно добавили контрагента в базу. При повторном добавлении существующего контрагента пользователю должна быть выведена ошибка, что контрагент уже создан.
- Редактирование контрагента. Со временем какие-то данные о контрагенте могут измениться, например, наименование, организационно-правовая форма, адрес и т.д. Поэтому важно иметь возможность актуализировать информацию. Удаление контрагента. Если контрагент был добавлен в базу, но в дальнейшем по каким-то причинам сотрудничество так и не было начато, должна быть возможность удалить его из базы.
- Поиск контрагента по наименованию. Когда в базе контрагентов появляется большое их количество, становится затруднительно найти нужного контрагента. Однако, зная наименование организации, можно воспользоваться поиском.
- Поиск договора по номеру. Если нужна информация только из договора, номер которого известен, можно воспользоваться поиском, не выполняя при этом лишних действий, связанных с поиском контрагента, за которым закреплен данный договор.
- Формирование рейтинга документа. Данный тест будет проведен на документе «Счёт-фактура». Каждому документу проставляется рейтинговое значение в зависимости от результата поставки. Рейтинг основывается на шкале определения показателя своевременности поставки по методу А. Робертсона.
- Формирование рейтинга договора. По одному договору может быть осуществлено несколько поставок, т.е. будет загружено несколько документов. Поэтому рейтинг договора формируется как среднее рейтингов всех поставок по этому договору.
- Формирование рейтинга контрагента. Данный рейтинг показывает только надежность контрагента, с которым уже были заключены какие-то договорные отношения. С одним контрагентом может быть заключено несколько договоров. Поэтому рейтинг контрагента формируется как среднее рейтингов всех его договоров.
- Общение с контрагентом. В процессе взаимодействия с контрагентом между сторонами может возникнуть потребность в общении. Для несрочных вопросов, которые не требуют личной встречи или телефонного звонка, используется функционал «Примечания».

После описания всех рассматриваемых тестов созданы автоматизированные тесты с использованием выбранных средств разработки. В результате на рисунке 2 представлено окно реализации автоматизированного теста по добавлению информации в карточку юридического лица. После добавления карточки юридического лица она появляется в системе (рис. 3), данные заносятся в базу данных. Заполняются разные типы полей: текстовое поле, выпадающий список, адрес для демонстрации того, что автотест может работать с разными контрола-

ми. Контрол – элемент пользовательского интерфейса, задающий поведение поля.

Добавить... Удалить ☐ Выполнить для всей выборки

Наименование ООО "Строй-Опт"

Полное название * ООО "Строй-Опт" Ru

Орг.-правовая форма ООО ...

Краткое название Ru

ИНН 5507252445

Руководитель

Фактический адрес

Бухгалтер

Подписант

финансовых актов

Контакты Добавить новый элемент +

Адрес доставки

счетов

Юридический адрес ИЦА, ДОМ 24, КОРПУС 9, ЭТ 1 ПОМ II КОМ 3

Почтовый адрес

Класс * Юридическое лицо РФ ...

Дата включения в базу * 04.06.2022 17:40:31 +0300

Гриф * - -

Регион * Бульчева София ...

Банковские реквизиты Добавить новый элемент +

Тест справочника

Добавить Отмена

Рисунок 2 – Добавление юридического лица

Общие Атрибуты Группы Сотрудники Договоры Связи Пользователи Обращения в работе (0) История обращений Опросы Ф

Наименование ООО "Строй-Опт"

Полное название * ООО "Строй-Опт" Ru

Орг.-правовая форма ООО ...

Краткое название Ru

ИНН 5507252445

Руководитель

Фактический адрес

Бухгалтер

Подписант

финансовых актов

Контакты Добавить новый элемент +

Адрес доставки

счетов

Юридический адрес 117186, ГОРОД МОСКВА, НАГОРНАЯ УЛИЦА

Почтовый адрес

Класс * Юридическое лицо РФ ...

Дата включения в базу * 04.06.2022 17:40:31 +0300

Гриф * - -

Регион * Бульчева София ...

Банковские реквизиты Добавить новый элемент +

Тест справочника

WF Тестовый документ DOCK Сохранить Удалить Сбросить пароль ЛК... Проверить в ФИС

Рисунок 3 – Карточка юридического лица

На рисунке 4 представлено подробное описание теста: наименование, статус его критичности, время выполнения, автор, необходимые шаги выполнения и ожидаемый результат.

add-legal-party#test_add_legal

Passed Добавление юридического лица РФ

Overview

History

Retries

Severity: blocker

Duration: 1m 55s

Description

Автор: Булычева София Александровна

1. Открыть Меню > CRM > Контрагенты
2. Нажать кнопку "Добавить"
3. Заполнить поле "Класс" = "Юридическое лицо РФ"
4. Заполнить поле "Полное наименование" = "ООО "Строй-Опт""
5. Заполнить поле "Орг.-правовая форма" = "ООО"
6. Заполнить поле "ИНН" = "5507252445"
7. Заполнить поле "Юридический адрес" = "117186, ГОРОД МОСКВА, НАГОРНАЯ УЛИЦА, ДОМ 24, КОРПУС 9, ЭТ 1 ПОМ II КОМ 3"
8. Заполнить поле "Регион" = "Булычева София"
9. Нажать кнопку "Добавить"

Ожидается: Объект сохранен в Меню > CRM > Контрагенты

Ожидается: У сохраненного объекта поле "Статус" будет равно "Активный"

Ожидается: У сохраненного объекта поле "Класс" будет равно "Юридическое лицо РФ"

Ожидается: У сохраненного объекта поле "Полное наименование" будет равно "ООО "Строй-Опт""

Ожидается: У сохраненного объекта поле "Орг.-правовая форма" будет равно "ООО"

Ожидается: У сохраненного объекта поле "ИНН" будет равно "5507252445"

Ожидается: У сохраненного объекта поле "Юридический адрес" будет равно "117186, ГОРОД МОСКВА, НАГОРНАЯ УЛИЦА, ДОМ 24, КОРПУС 9, ЭТ 1 ПОМ II КОМ 3"

Ожидается: У сохраненного объекта поле "Регион" будет равно "Булычева София"

Рисунок 4 – Отчет по добавлению юридического лица

В отчете отображается раздел, в котором описываются выполненные шаги. Для каждого шага указан статус его выполнения. При ошибке можно понять, на каком именно шаге автотест не выполнен, чтобы быстро понять ее причину.

После отработки всех тестов анализируется статистика их выполнения с использованием Allure Framework. Главной страницей является страница Overview с информационными панелями и виджетами, представляющими основные характеристики проекта и тестовой среды. Представлено общее количество выполненных тестов, график с цветовыми индикаторами выполнения автоматизированных тестов. Зеленый цвет отображает безошибочно отработанные тесты. Желтый цвет отражает ошибку с запуском теста, например, файл с тестом не найден. Красный цвет отражает ошибочное выполнение теста на каком-то шаге. На рисунке 5 представлена главная страница Allure.



Рисунок 5 – Общая статистика результатов выполнения автотестов

Заключение

Автоматизация процесса тестирования выбранного функционала программного обеспечения управления взаимоотношениями с контрагентами позволяет многократное использование тестов при регрессионном тестировании, что сокращает время на отладку программного обеспечения. Однако, на начальных этапах внедрения автоматизации временные затраты превышают проведение ручного тестирования, т.к. требуют времени и ресурсов на разработку. При внедрении автоматизированного тестирования на долгосрочную перспективу эффект более ожидаем.

Литература

- ГОСТ Р 56920-2016/ISO/IEC/IEEE 29119-1:2013. Системная и программная инженерия. Тестирование программного обеспечения / ООО «Информационно-аналитический вычислительный центр». Москва: Стандартинформ, 2016.
- Винниченко И.В. Автоматизация процессов тестирования. СПб: Питер, 2005. 203 с.
- Онума: сайт / Платформа Онума xRM – Москва [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://onuma.ru/products/xrm/> (дата обращения: 01.07.2022).
- Осп: сайт / Средства автоматизированного тестирования – Москва [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.osp.ru/os/2009/03/8161608> (дата обращения: 01.07.2022).

УДК 629.7.036.54

Способ подтверждения работоспособности системы топливоподачи ракетного двигателя при образовании газовой фазы в топливе

В.А. Бершадский, доктор технических наук,
профессор кафедры «Техника и технологии»,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

Пояснена необходимость совершенствования методики испытаний насосов при образовании газовой фазы в топливе для подтверждения работоспособности системы топливоподачи двигателя.

Предложена методика испытаний насосов системы топливоподачи с образованием газовой фазы в криогенном топливе.

Приведены результаты и анализ испытаний опытного экземпляра насоса на жидком водороде с образованием газовой фазы в случаях реализации процессов испарения топлива или десорбции растворённого в нём газа.

Криогенное топливо, термодинамическое состояние топлива, газовая фаза в топливе, объёмное содержание газовой фазы, кавитационная характеристика насоса, напор насоса.

Method for confirming the operability of the rocket engine fuel supply system during the formation of a gas phase in the fuel

V.A. Bershadskiy, Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of Engineering and Technology,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

The necessity of improving the methods of testing pumps during the formation of a gas phase in the fuel to confirm the operability of the engine fuel supply system is explained.

A method of testing fuel supply system pumps with gas phase formation in cryogenic fuel is proposed.

The results and analysis of tests of a prototype pump on liquid hydrogen with the formation of a gas phase in cases of fuel evaporation or desorption of gas dissolved in it are presented.

Cryogenic fuel, thermodynamic state of the fuel, gas phase in the furnace, volume content of the gas phase, cavitation characteristic of the pump, pump pressure.

Предварительные пояснения

Работоспособность системы топливоподачи жидкостного реактивного двигателя (ЖРД) определяют особенности функционирования в установленных пределах насосов основного турбонасосного агрегата (ОН ТНА) и насосов бустерных агрегатов (БТНА). ОН ТНА обеспечивают подачу компонентов топлива (КТ) в камеру двигателя. Насосы БТНА предназначены для создания необходимого напора компонентов топлива (КТ) на входе ОН ТНА при изменениях параметров термодинамического состояния КТ.

Образование газовой фазы в системе топливоподачи приводит к возникновению кавитации в насосах, уменьшению величины напора насосов или срыву в их работе [1,6]. Это уменьшает надёжность и безопасность функционирования двигателя.

Поэтому при экспериментальной отработке агрегатов системы топливоподачи двигателей определяют возможность безотказной и безопасной работы основных и бустерных насосов с учётом возникновения газовой фазы. При этом испытания проводят преимущественно на воде с имитацией параметров состояния компонентов топлива в прогнозируемых условиях эксплуатации [6].

Применение криогенных КТ типа кислород и водород связано со спецификой изменений параметров термодинамического состояния КТ на входе в насосы и внутри них в условиях эксплуатации двигателя. Специфика проявляется в интенсивности термодинамических процессов, связанных с прогревом и испарением КТ, с растворением неконденсируемого газа и его десорбцией в КТ. Указанные явления приводят к возникновению насыщенного состояния и образованию двухфазного потока криогенных КТ.

Это обусловило необходимость совершенствования методики испытаний при определении кавитационных характеристик насосов на натуральных КТ.

В настоящей статье приведены результаты разработки автором методики кавитационных испытаний насосов на жидком водороде. Ранее результаты этой разработки частично были опубликованы в работах [2-4].

Методика проведения испытаний

Совершенствование методики испытаний проводилось с учётом особенностей эксплуатационных режимов функционирования кислородно-водородных двигателей разгонных блоков «Р» и «12КРБ» соответственно ракетно-космических систем (РКС) «Н-1» и «GSLV», а также центрального блока ракеты-носителя РКС «Энергия Буран».

Работы по совершенствованию методики включали решение следующих научно-технических задач:

- исследование влияния условий парообразования или газовыделения из раствора при движении КТ в баке и расходной магистрали на параметры термодинамических процессов в системе топливоподачи;
- уточнение расчётного определения величин параметров двухфазного потока КТ на входе в насосы: давления – $p_{вх}$, температуры – $T_{вх}$, объёмного содержания паровой или газопаровой фаз – $\delta_{вх}$;
- обоснование методов регулирования термодинамического состояния

топлива в баке и расходной магистрали для идентификации значений указанных выше параметров в соответствии с равенствами:

$$p_{вх} = p_{дв}, T_{вх} = T_{дв}, \delta_{вх} = \delta_{дв},$$

где $p_{дв}$, $T_{дв}$, $\delta_{дв}$ – прогнозируемые значения для режимов эксплуатации двигателя;

- создание экспериментальной установки для испытаний, оснащённой необходимыми средствами измерений;
- формирование технологии подготовки и проведения испытаний с приближением режимов испытаний насосов к условиям их натурной эксплуатации;
- определение методики обработки результатов испытаний и их анализа.

На рисунке 1 представлена упрощённая пневмогидравлическая схема экспериментальной установки (ЭУ) для проведения испытаний с обозначением основных средств измерений, обеспечивающая получение квалифицированной информации.

Основными средствами измерений параметров являлись: давление на входе и выходе из насоса, температура на входе и выходе из насоса, сплошность (паросодержание или газосодержание) потока на входе в насос, частота вращения вала насоса, давление, температура и уровень КТ в баке, концентрация растворённого газа в КТ. При этом важным моментом являлась градуировка средств измерений перед проведением экспериментов.

Ниже кратко изложены основные особенности методики проведения стендовых испытаний на ЭУ, представленной на рисунке 1.

При испытаниях изменение давления в топливном баке проводилось с применением системы наддува, позволяющей осуществлять постоянный и пульсирующий режимы расхода газа наддува.

Повышение температуры КТ в баке ЭУ производилось в результате конденсации газообразного водорода при его барботаже через объём жидкого водорода. Уменьшение температуры КТ осуществляли за счёт частичного испарения жидкости в результате уменьшения давления в газовом объёме бака ЭУ с помощью эжектора.

Изменение концентрации растворённого газа – гелия в объёме КТ в баке ЭУ вплоть до насыщенного состояния производилось при барботаже гелия через объём жидкого водорода.

Необходимые величины $p_{вх}$, $T_{вх}$, $\delta_{вх}$ на входе в объект испытаний – насос обеспечивали в результате приближения к расчётным значениям гидросопротивления натурной расходной магистрали двигателя и ожидаемого прогрева КТ в ней.

Необходимые величины объёмного содержания паровой или газопаровой фазы на входе в объект испытаний на ЭУ обеспечивали в результате уменьшения давления потока насыщенного КТ. Для этого в расходной магистрали ЭУ устанавливали гидросопротивление в виде многорычатой решётки.

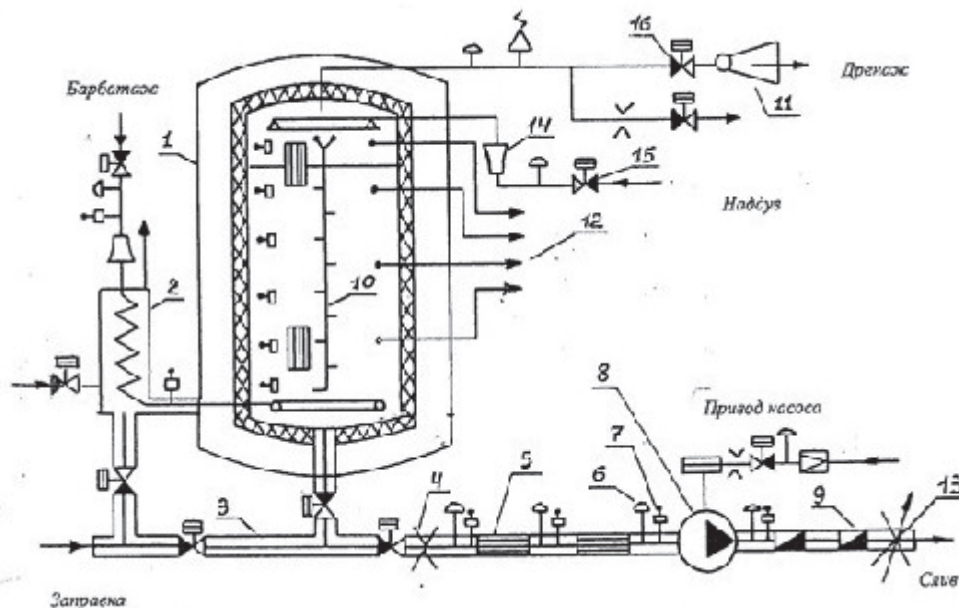


Рисунок 1 – Упрощённая пневмогидравлическая схема экспериментальной установки для определения кавитационных характеристик насоса:

1-бак с экранно-вакуумной теплоизоляцией; 2-теплообменник; 3-криогенный трубопровод заправки и слива; 4-сменное гидравлическое сопротивление; 5-датчик сплошности потока; 6-датчик давления; 7-датчик температуры; 8-насос с газовым приводом; 9-датчик расхода; 10-уровнемер; 11-эжектор для охлаждения жидкости; 12-отборы проб на хроматографический анализ; 13-гидравлический регулятор расхода; 14-сопло, дозирующее расход газа наддува; 15-клапан наддува бака; 16-клапан дренажа бака

Требуемый расход жидкого водорода через объект испытаний обеспечивался с помощью гидравлического дросселя, установленного на выходе из насоса и работающего по обратной связи с датчиками расхода.

Вращение насоса обеспечивалось с применением газового турбинного привода, а частоту его вращения регулировали в результате изменения расхода газа через турбину.

Определение кавитационных характеристик насоса в виде зависимостей напора и расхода, приведенных к частоте вращения насоса, от значений параметров $p_{вх}$, $T_{вх}$, $\delta_{вх}$ определяли при экспериментах с прогретым в баке до насыщенного состояния или газонасыщенным в баке жидким водородом.

Результаты испытаний насоса на двухфазном водороде

На завершающей стадии разработки усовершенствованной методики проведены кавитационные испытания центробежного водородного насоса БТНА прототипа двигателя КВД-1. Результаты этих испытаний приведены на рисунках 2 и 3.

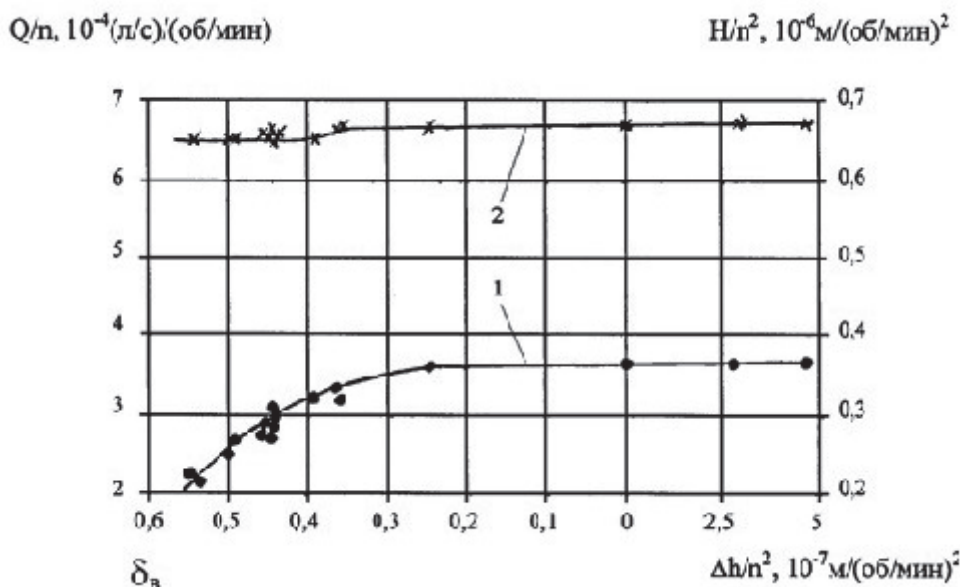


Рисунок 2 – Кавитационная характеристика бустерного насоса, полученная в зависимости от изменения объемного паросодержания водорода $\delta_{вх}$ при уменьшении приведенного напора $\Delta h/n^2$ на входе в насос.

На выходе из насоса: 1 – приведенный напор H/n^2 и 2 – приведенный расход Q/n

Характеристика на рисунке 2 отражает изменения напора и расхода водорода на выходе из насоса, приведенных к частоте его вращения n . Уменьшение напора насоса на выходе связано с частичной потерей работы на сжатие газовой фазы.

В результате определения кавитационной характеристики, изображённой на рисунке 2, было установлено, что увеличение $\delta_{вх}$ до величины 0,53 приводит к уменьшению приведенного напора на выходе на 40%. Это происходит без срыва в работе БТНА. При величине $\delta_{вх} = 0,23$ падение напора на выходе насоса составляет 3,7% и находится в пределах допуска 5%, установленного для БТНА.

Проведенные эксперименты подтвердили способность водородных насосов работать при больших величинах паросодержания на входе в насос и высокую кавитационную устойчивость насоса типа БТНА прототипа КВД-1.

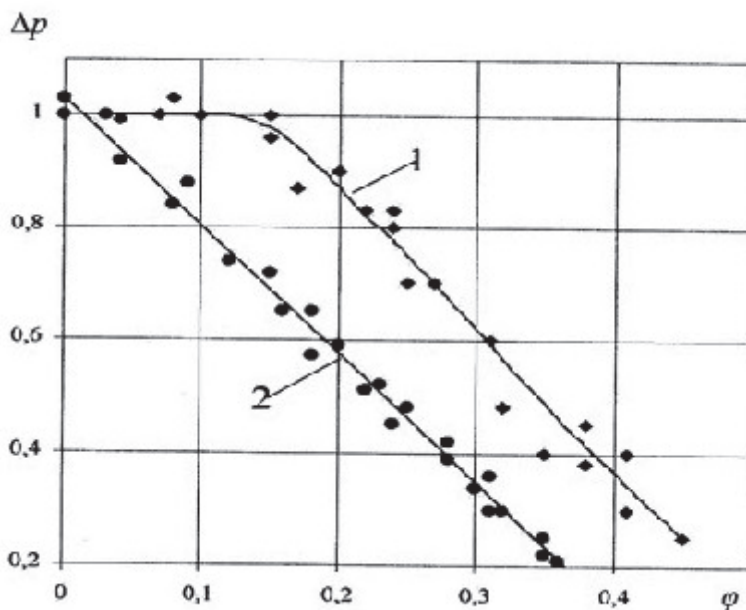


Рисунок 3 – Кавитационная характеристика бустерного насоса, определённая при организации двухфазного паросодержащего (1) и газопаросодержащего (2) потоков водорода на входе в насос

На рисунке 3 приведены экспериментальные данные по определению влияния $\varphi = \delta_{\text{вх}} / (1 + \delta_{\text{вх}})$ — относительного паросодержания (чистого) и газопаросодержания (насыщенного гелием) потоков жидкого водорода на относительную величину измеренной разницы давлений на входе и выходе насоса $\Delta p = \Delta p_{\text{дф}} / \Delta p_{\text{ж}}$, полученные в период испытаний при значениях $Q / n = \text{const}$.

В проведенных испытаниях $\Delta p_{\text{дф}}$ — это измеренная разница давлений от входа до выхода из насоса, которая была определена при двухфазном потоке на входе в насос, а $\Delta p_{\text{ж}}$ — измеренное значение разницы давлений при работе насоса на сплошной жидкости (без паросодержания или газопаросодержания потока на входе в насос).

Рисунок 3 позволяет сравнить влияние на напор насоса двухфазного потока водорода для различных случаев его образования:

- при частичном испарении потока чистого жидкого водорода;
- при образовании газопаросодержащего потока в результате десорбции гелия, растворённого в жидком водороде.

Различный характер влияния паросодержания и газопаросодержания потоков на относительную величину Δp связано, по-видимому, с тем, что пар чистой жидкости успевает сконденсироваться, а гелий не успевает раствориться в жидком водороде за время пребывания в рабочих каналах насоса.

Ухудшение кавитационной характеристики насоса при работе на газопаросодержащей жидкости по сравнению с паросодержащей свидетельствует о необходимости учёта влияния на работу не только объёмного содержания газовой

фазы, но и парциального давления газа, растворённого в КТ. В случае допустимого 10% падения напора насоса, который приведен на рисунке 3, пренебрежение этим обстоятельством может привести к ошибке в 3 раза при определении критического значения f .

На основе впервые полученных экспериментальных данных были сформулированы практические рекомендации по физическому моделированию параметров двухфазного потока для проведения кавитационных испытаний насосов при стендовой отработке систем топливоподачи двигателей [5].

Заключение

Усовершенствованная методика кавитационных испытаний насосов позволила предложить способ для подтверждения работоспособности системы топливоподачи ракетного двигателя на криогенном компоненте топлива с образованием газовой фазы.

На основе применения этой методики при кавитационных испытаниях центробежного насоса БТНА прототипа двигателя КВД-1 определены пределы возможной устойчивой работы насосов на паросодержащем и газопаросодержащем водороде и сформулированы рекомендации для практического применения методики.

Литература

1. Артюхов Ю.А., Бершадский В.А., Петров В.И. Влияние свойств газовой фазы в газожидкостном потоке на энергетические кавитационные и динамические характеристики лопастных насосов // Космонавтика и ракетостроение. 2015. № 3(82). С. 120-126.
2. Бершадский В.А., Петров В.И. Результаты исследований параметров потока в элементах систем подачи низкокипящей жидкости, насыщенной неконденсирующимся газом // Лопаточные машины и струйные аппараты: научно-технический сборник ЦИАМ. 1989. Выпуск 10 (№ 1242). С. 115-126.
3. Бершадский В.А. Смешение криогенной жидкости с конденсирующимся газом для имитации теплового состояния потока топлива на входе насоса двигателя // Космонавтика и ракетостроение. 2015. № 4(83). С. 105-110.
4. Бершадский В.А. Способ определения концентрации газа, растворённого в криогенном топливе при испытаниях ракетных двигателей // Информационно-технический вестник. 2020. № 2(24). С. 19-25.
5. Бершадский В.А., Коломенцев А.И. Основы технологии стендовых испытаний ракетных двигателей. М: Изд-во МАИ. 2014. 214 с.
6. Петров В.И., Чебаевский В.Ф. Кавитация в высокооборотных лопастных насосах. М: Машиностроение, 1982. 192 с.

УДК 621.396.946

Пропускная способность сети спутниковой связи с космическим сегментом – геостационарным искусственным спутником Земли

Л.В. Меньшикова, кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры информационных технологий и управляющих систем,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область,
Д.М. Найденова, студентка 1-го курса
Факультета вычислительной математики и кибернетики,
Московский Государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Предложена методика расчета пропускной способности спутниковой сети связи по измерениям распределения мощности усилителя ретранслятора, в том числе для частного случая – сети спутниковой связи с архитектурой «центральная звезда». Данная методика может быть масштабирована на телекоммуникационные сети связи и передачи данных, имеющие другую топологию сети, а так же работающие по иным технологиям.

Проекты информатизации, информационно-аналитические системы, проектирование сети спутниковой связи, телекоммуникационные сети с архитектурой «звезда», пропускная способность сетей передачи данных.

Bandwidth of the satellite communication network with the space segment – geostationary artificial satellite of the earth

L.V. Menshikova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor of the Department
of Information Technologies and Control Systems,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region,
D.M. Naydenova, 1st year student of the Department of Applied Mathematics and
Cybernetics of Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Moscow

The method of bandwidth calculating of a satellite communication network based on measurements of the power distribution of a transponder amplifier, including for a special case – a satellite communication network with the «central star» architecture. This technique can be scaled to telecommunication networks of communication and data transmission, having a different network topology, as well as working on other technologies.

IT-projects, BI-systems, satellite communication network design, the telecommunications networks with the star-architecture, bandwidth of data communication networks.

Введение

В современную эпоху всеобщей глобализации, природных бедствий и техногенных катастроф необходима новая стратегия [4, С.81] освоения космоса. Её отличие стратегии XX века [3, С.67] заключается в изменении космической деятельности – постепенном переходе от космической гонки «за лидером» в целях достижения превосходства в космосе – к совместной космической деятельности, направленной на удовлетворение реальных потребностей мирового сообщества. Особенно остро этот вопрос встал в период пандемии, когда стали уделять значительное внимание мониторингу природных бедствий и катастроф, равно как и прогнозированию техногенных катаклизмов, которые классифицированы на рисунке 1.

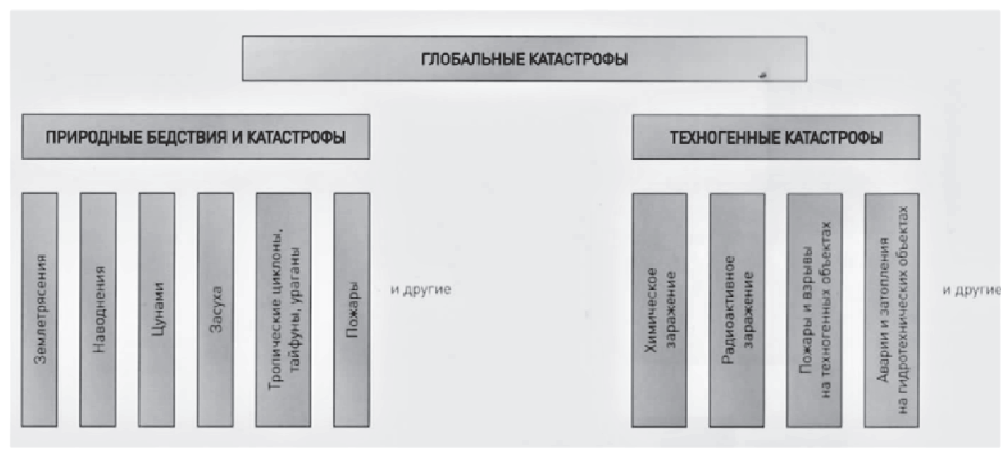


Рисунок 1 – Глобальные природные и техногенные катастрофы

Предупреждать стихийные явления и техногенные катастрофы на основе мониторинга их предвестников и первичных признаков, ослаблять разрушительные последствия и быть к ним готовыми – экономически более выгодно, чем реагировать на их последствия. Мировая практика позволяет с уверенностью утверждать, что затраты на прогнозирование и обеспечение готовности к стихийным бедствиям в 15 раз ниже затрат на ликвидацию ущерба, причинённого катаклизмами природы.

Для нашей страны, так же как и для всего мирового сообщества, в связи отсутствием в большинстве стран хорошо развитой инфраструктуры телекоммуникаций, альтернативы спутниковой связи фактически не существует. Поэтому спутниковая связь, позволяющая предоставлять минимальный набор телекоммуникационных услуг, будет становиться все более востребованной, невзирая на активное развитие других видов связи. В районах стихийных бедствий и чрезвычайных ситуаций

чайных ситуаций только оперативное развертывание наземных станций спутниковой связи может решить проблему обеспечения взаимодействия с внешним миром, так как любые имеющиеся на этой территории иные виды связи и телекоммуникаций могут в любой момент отказать.

XX век характеризовался бурным развитием науки и техники. Два великих русских ученых еще в конце XIX века положили начало двум научно-техническим направлениям, которые и заняли лидирующее место в этом процессе. Это Константин Эдуардович Циолковский, положивший начало космонавтике, и Александр Степанович Попов, с первого радиоприемника которого и началась радиотехника. Именно симбиоз этих двух передовых направлений и привел к появлению в дальнейшем искусственных спутников Земли (ИСЗ), на которые в качестве полезной нагрузки устанавливаются ретрансляторы систем спутниковой связи (ССС).

ССС с космическими аппаратами (КА) на геостационарной орбите (ГСО) используются, в основном, для организации фиксированной связи и телевидения.

Спутниковая связь существенно отличается от других видов связи – радиорелейной, тропосферной, ионосферной, сотовой и транкинговой, прежде всего, максимальным охватом территории, на которой осуществляется связь, и слабой зависимостью от атмосферных явлений.

И хотя сейчас широкое распространение получили сотовая связь и оптоволоконные линии связи, альтернативы спутниковым сетям связи с учетом необъятных просторов нашей страны – пока не существует.

Системы спутниковой связи делятся на две большие категории – с космическими аппаратами на геостационарной орбите и с космическими аппаратами на негеостационарной орбите. Негеостационарные орбиты, в свою очередь, подразделяются на низкоорбитальные (LEO), средневысотные (MEO) и высокоэллиптические (HEO).

Начиналось все в начале шестидесятых годов, когда были запущены первые спутники связи – высокоэллиптический «Молния-1» (СССР, 1965 г.) и низкоорбитальный Тельстар (США, 1962 г.). Надо отметить, что высокая эллиптическая орбита широко используется до сих пор для обслуживания приполярных районов, в которых неэффективно использовать геостационарные спутники (из-за малых углов места, под которыми видны КА), а порой и невозможно (вблизи полюса).

Основной недостаток эллиптических орбит – необходимость отслеживать антеннами земных станций движение спутника и переход с одного на другой спутник три раза в течение суток, что приводит к усложнению аппаратуры и, иногда, к перерывам в связи.

Впервые использовать для спутников связи геостационарную орбиту предложил в 1945 году английский инженер Артур Кларк, который определил необходимую высоту орбиты и показал, что трех геостационарных спутников достаточно для создания системы спутниковой связи, охватывающей всю территорию Земли.

Таким образом, достаточно трех современных космических аппаратов на геостационарной орбите с достаточным в части частотно-энергетического ресурса количеством ретрансляторов, а к ним в дополнение шесть космических аппаратов на эллиптической орбите, работающих во взаимно перпендикулярных плоскостях, для охвата полюсов Земли и прилегающих к ним районов, чтобы проводить глобальный мониторинг Земли и предоставлять минимальный набор телекоммуникационных услуг, включая услуги связи.

За последние годы достигнут значительный прогресс в понимании процессов, предопределяющих зарождение негативных и потенциально опасных геофизических явлений. Для решения одной из насущных проблем современности – предотвращения и снижения ущерба от происходящих стихийных природных бедствий и техногенных катастроф – создается ряд систем мониторинга техногенных явлений, в частности Международная аэрокосмическая система глобального мониторинга (МАКСМ), структурная схема которой представлена на рисунке 2.

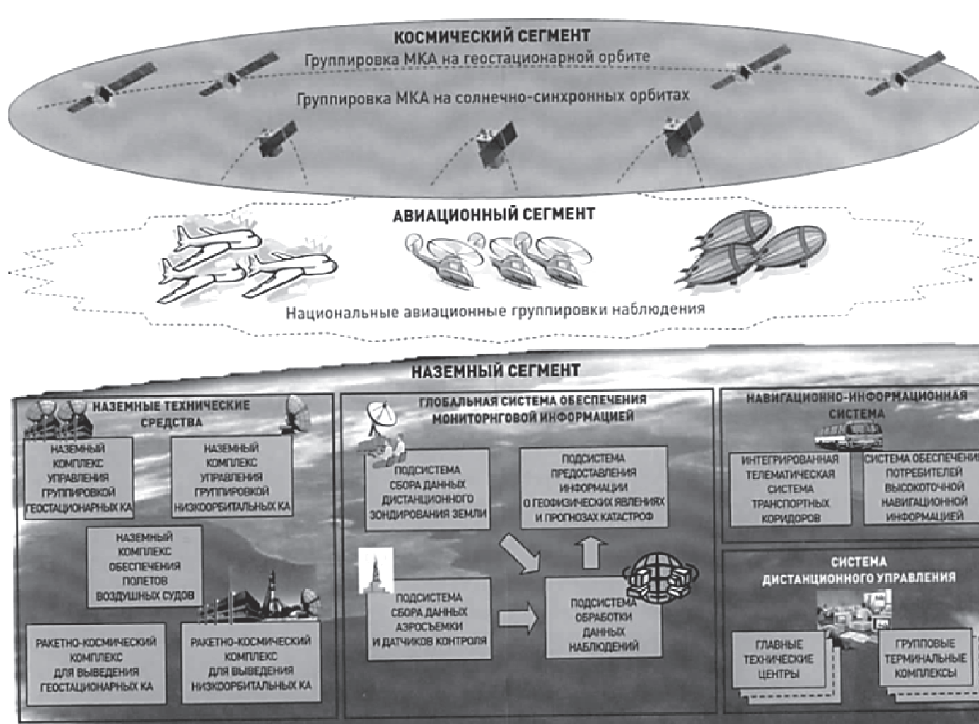


Рисунок 2 – Структурное построение МАКСМ

Концептуально эту схему можно считать общей для всех систем, предоставляющих телекоммуникационные услуги или проводящих любого рода глобальный мониторинг, имеющих в своем составе космический сегмент.

За годы, прошедшие момента вывода на орбиту первого геостационарного спутника, системы спутниковой связи с геостационарными КА стали чрезвычайными

чайно популярны. Космический сегмент фиксированной спутниковой связи в настоящее время строится исключительно на основе геостационарных спутников связи.

Средняя стоимость создания геостационарного спутника составляет примерно 300 млн. долларов. Геостационарные спутники относятся к классу тяжелых КА. Вывод их на орбиту осуществляется с помощью тяжелых ракет-носителей. Стоимость запуска составляет в среднем 200 млн. долларов. Наиболее дорогим является запуск с помощью ракеты Ariane, а самым дешевым – с помощью Long March. Россия обладает достаточными техническими возможностями для создания и запуска собственными различными геостационарных спутников связи и вещания с помощью своих ракет-носителей, в частности для запуска геостационарных спутников ракетами «Протон» и «Зенит» [4, С.15]. Если процесс создания полноценного спутника-ретранслятора занимает три года, то малые геостационарные спутники создаются в гораздо более короткие сроки. Стоимость их в разы меньше. Поэтому скоординированные точки стояния на ГСО являются стратегическим ресурсом страны, координировать их все сложнее из-за появления разного рода частных компаний в этом промышленном сегменте. Это тоже одна из причин появления малых СР на ГСО, так как в случае запуска в точку стояния пусть даже и малого КА, скоординированная ранее точка не аннулируется.

Итак, преимущества ССС с КА на ГСО очевидны, это, во-первых, максимальная зона обслуживания, а во-вторых, длительный срок существования геостационарного спутника на орбите с минимальными энергетическими затратами (спутник находится на высоте почти 36000 км над экватором Земли и движется по орбите под действием только силы притяжения Земли и центробежных сил). На данный момент срок активного существования современных спутников составляет около 25 лет. В-третьих, отсутствие каких-либо атмосферных явлений на такой высоте, что приводит к высокой эффективности работы солнечных батарей, и, наконец, то, что геостационарный спутник удерживается в заданной рабочей области ГСО и как бы неподвижно зафиксирован относительно Земли, что позволяет организовывать связь без сопровождения спутника антеннами земных станций и без каких-либо перерывов в работе.

Основные диапазоны частот спутников-ретрансляторов на геостационарной орбите – С-диапазон (6/4 ГГц), Ku-диапазон (14/11 ГГц) и Ka-диапазон (30/20 ГГц). К-диапазон, зарезервированный для радиолокации и спутниковой радиосвязи и Х-диапазон, используемый для радиолокации, наземной и спутниковой радиосвязи, не используются для передачи информации. Кроме того, для сетей подвижной спутниковой связи используются L- , и S-диапазоны. Эти же диапазоны частот используются на средневысотных и высокоэллиптических негеостационарных орбит.

За последнее 20 лет в связи с введением упрощенной процедуры получения разрешительных документов большую популярность приобрели интерактивные VSAT-сети, использующие технологию многостанционного доступа TDM/MF-TDMA или технологию широкополосного доступа по стандарту циф-

рового видеовещания с обратным спутниковым каналом DVB-RSC [3, С. 67]. Кроме того, в настоящее время регламентируется только геостационарная орбита и зоны видимости ГЛОНАСС/GPS.

Актуальные сведения о спутниках российской космической группировки с указанием точек стояния геостационарных спутников и частотных диапазонов их ретрансляторов, через которые передается информация, есть в открытом доступе в Интернет, например, на сайте Википедии. Помимо этих ресурсов Россия использует некоторые ретрансляторы международных организаций, в состав которых она входит или входила ранее. Так, например, до сих пор используются СССР «ИНТЕЛСАТ», «ИНМАРСАТ» и «ЕВТЕЛСАТ», документация по которым доступна Российской Федерации в полном объеме, в отличие от документации СР и каналов связи частных или локальных, принадлежащих одной стране или группе стран, кампаний.

Спутниковые системы связи делятся по типу предоставляемых услуг на односторонние (широковещательные), предназначенные для передачи теле- и радиопрограмм и другой информации для большого числа абонентов, такой как биржевые сводки, новости и т.п., и интерактивные, предназначенные для организации информационного обмена между абонентами.

По топологии сети спутниковой связи делятся на сети с топологией типа «точка-точка», «звезда» (в том числе и многоуровневая) и полносвязные сети, предоставляющие каналы связи по требованию.

В сетях спутниковой связи с топологией «точка-точка» для организации связи между двумя абонентами используется пара частот, выделенная этим станциям на постоянной основе.

В полносвязных сетях любая земная станция (ЗС) может связаться с любой ЗС, получив по запросу пару частот на время одного сеанса связи.

Одним из основных вопросов при проектировании, развертывании и дальнейшей эксплуатации сетей спутниковой связи с использованием спутника-ретранслятора на геостационарной орбите является организация и обеспечение контроля за использованием частотно-энергетического ресурса в сетях спутниковой связи и определения местоположения наземных станций, создающих помехи этим сетям связи.

Пропускная способность сети спутниковой связи, космическим сегментом которой является геостационарный ИСЗ

Одним из ключевых параметров любых сетей передачи данных, в том числе и спутниковых сетей связи, без которого использование сетей передачи данных неэффективно, является пропускная способность такой сети.

Пропускная способность сетей спутниковой связи определяется либо общим объемом информации, передаваемой через искусственный спутник Земли, либо необходимым числом каналов между каждой парой земных станций.

Пропускная способность сети определяется архитектурой сети, возможностями коммутации, количеством информационных каналов, их качеством, а так же пропускной способностью и механизмами перераспределения ресурсов бортового ретранслятора и земных станций.

Следует отметить, что учитывая время существования сетей спутниковой связи, составляющее не менее 6...7 лет и не более 20...25 (иногда до 50) лет, наблюдается постоянный рост потребностей в дополнительных каналах сетей спутниковой связи, с одной стороны, и ухудшение характеристик спутника-ретранслятора и земных станций с увеличением их периода эксплуатации (до замены их на новые), поэтому при проектировании сетей спутниковой связи всегда следует предусматривать некоторый запас частотно-энергетического ресурса, особенно для спутника-ретранслятора и центральной земной станции (ЦЗС) в случае использования топологии «звезда».

В современных сетях спутниковой связи используются разные технологии доступа к ресурсам спутника-ретранслятора и организации каналов связи. Наибольшее распространение имеют следующие технологии:

- с временным мультиплексированием (Time Division Multiplexing – TDM) и многостанционным доступом с временным разделением абонентских линий в одном частотном канале (Time Division Multiple Access – TDMA) и топологией типа «звезда»;
- с предоставлением каналов по требованию (Demand Assigned Multiple Access – DAMA) и полносвязной топологией;
- с предоставлением частотного канала спутниковой связи паре абонентов по предварительному временному расписанию или на постоянной основе на неопределенное время (Pre-assignment Multiple Access или Permanent Assignment Multiple Access – PAMA) – топология, как правило, «точка-точка», но может иметь разные топологии;
- многочастотный TDMA (Multifrequency TDMA – MF– TDMA) (как правило, полносвязная сеть, может иметь разные топологии);
- широкополосный доступ по стандарту цифрового видеовещания с обратным спутниковым каналом (Digital Video Broadcasting – Return Satellite Channel «Multifrequency TDMA – MF– TDMA» «Multifrequency TDMA – MF– TDMA» DVB «Multifrequency TDMA – MF– TDMA» RSC) с топологией «звезда».

Остановимся подробнее на каждой из вышеупомянутых технологий.

В сетях TDM/TDMA, которые как говорилось выше, имеют топологию «звезда», все потоки данных проходят через ЦЗС, а поэтому при взаимодействии двух ЗС передаваемые между ними данные дважды проходят через спутник-ретранслятор. При этом возникает задержка, которая незначительна при передаче данных, но делает их малоприспособными для телефонии. В сетях TDM/TDMA ЗС совместно используют частотные каналы и постоянно находятся в активном состоянии, что обеспечивает малое время реакции сети. Принцип работы сетей таков: ЦЗС объединяет потоки данных, предназначенных разным терминалам, в один исходящий канал (TDM). При этом в одном частотном канале образуется несколько независимых подканалов. Причем каждый из них получает неизменную во времени часть пропускной способности общего канала независимо от проходящего по нему трафика. Все терминалы сети принимают всю информацию, но каждый обрабатывает адресованные только ему данные. Для передачи данных на ЦЗС терминалы используют один или несколько входящих каналов в

режиме разделения времени (TDMA) и конкурируют за таймслоты в них. При этом возможны коллизии. В этом случае ЗС делают случайную паузу и затем пытаются передать данные снова. Такие сети нередко используют для объединения локальных вычислительных сетей, верификации кредитных карточек, удаленного доступа к централизованным базам данных, передачи факсов и т.п. Как правило, скорость TDM-канала – 128 кбит/с, а TDMA – 64 кбит/с.

В сетях DAMA используется метод многостанционного доступа с предоставлением паре абонентов частотного канала спутниковой связи по запросу и только на время одного сеанса связи, что позволяет эффективно использовать частотный ресурс. Сети DAMA имеют полносвязную топологию, а значит информация, передаваемая между двумя станциями, проходит через спутник только один раз. Благодаря этому задержка сигнала минимальна, и данные сети используют, в основном, для телефонии. Принцип их работы следующий: ЗС, к которой подключен телефон вызывающего абонента, формирует запрос на установление соединения и передает его ЦЗС по общему для всех каналу сигнализации. ЦЗС идентифицирует вызов и устанавливает соединение между вызывающим и вызываемым абонентами. При этом абонентам выделяется пара каналов – один для приема, а другой для передачи. По окончании сеанса ЦЗС освобождает каналы и они становятся вновь доступными всем абонентам сети. Скорости в таких каналах от 16 кбит/с до 64 кбит/с.

В сетях РАМА для взаимодействия двух станций выделяется постоянная пара частот, то есть канал является дуплексным. Передача по ним осуществляется с использованием протоколов терминального оборудования клиентов. Это самый простой и самый надежный способ организации связи. Но при этом частотный ресурс используется неэкономно. Причем, если станции не передают информацию, то канал пустует. Но следует отметить, что в таких сетях, в общем случае, экономится энергетический ресурс. Эта технология используется, в основном, в корпоративных сетях. Типовая скорость – от 64 кбит/с до 2048 кбит/с.

В сетях MF-TDMA абонентским ЗС предоставляется динамический доступ к общим частотным каналам с временным разделением, то есть любая ЗС может использовать все выделенные частоты и любую доступную полосу по запросу. В таких сетях отсутствует выделенная ЦЗС, ее функции может выполнять любая ЗС. ЗС работают в общем широкополосном канале на разных частотах с предоставлением полосы по требованию, что позволяет эффективно интегрировать высокоскоростные потоки разнородного трафика в рамках одной сети. Эта технология используется для точек подключения провайдеров Интернет, локальных (LAN) и глобальных (WAN) корпоративных сетей, сетей дистанционного обучения и телемедицины, сетей передачи телефонного трафика и данных общего пользования, связи служб спасения и оповещения.

В сетях DVB-RSC для передачи высокоскоростного потока данных от ЦЗС к абонентским ЗС используется широко распространенная в цифровом телевидении технология DVB, а обратный трафик передается по спутниковому каналу с меньшей скоростью (типовой прямой канал – 512 кбит/с, обратный – от 32 кбит/с). Эта технология позволяет строить спутниковые системы связи с асим-

метричным трафиком и используется для доступа в Интернет, цифрового мультимедийного обмена, организации видеоконференций, многоадресной рассылки и т.д. Применение в обратных каналах метода многочастотного доступа (MF-TDMA) повышает эффективность использования полосы частот.

Для всех вышеперечисленных технологий пропускная способность рассчитывается исходя из видов *передаваемой информации* и требования к *качеству передачи*.

Поэтому данные о необходимой пропускной способности сетей спутниковой связи обычно должны содержать перечень видов передаваемой информации и требования к качеству передачи.

Качество передачи оценивается достаточно большим и разнородным числом показателей, таких как:

- достоверность передачи информации, которая количественно определяется вероятностью ошибочного приема одного бита информации,
- скорость передачи информации по каналам связи,
- вероятность предоставления канала связи,
- среднее время ожидания предоставления канала связи и др.

Обеспечить достижение заданных показателей качества можно различными способами: как выбором параметров технических устройств, так и выбором параметров протоколов и алгоритмов функционирования тех или иных подсистем.

Достоверность передачи информации в спутниковых системах связи определяется отношением сигнал/шум на входе земных станций.

Отношение сигнал/шум в основном определяется:

- мощностью передатчиков наземного и космического сегмента сети,
- диаметрами приемно-передающих антенн,
- методом модуляции (манипуляции) радиосигналов,
- методом помехоустойчивого кодирования и декодирования информации,
- способами проектирования приемных устройств и обработки принятых сигналов,
- методом разделения и уплотнения каналов связи,
- диапазоном используемых частот,
- применяемой поляризацией сигналов и др.

Должны быть указаны так же требования к засекречиванию тех или иных сообщений, поскольку такая обработка может изменить фактический объем передаваемой информации и требования к ее качеству.

Необходимый объем информации должен быть распределен по используемым каналам связи на две группы: дуплексные каналы и каналы циркуляционного характера (телевидение, звуковое вещание, изображение газетных полос).

Мощность излучаемых ретранслятором сигналов определяется, в основном, пиковой мощностью усилителя, выбором рабочей точки на амплитудной характеристике усилителя, видом радиосигналов и др.

Если земные станции сетей спутниковой связи находятся в различных зонах, то вследствие различия суточного времени между зонами, которые обслу-

живают разные лучи, временного колебания трафика, случайного характера запросов на установление соединения, групповой сигнал является случайным процессом. В условиях различной активности и числа абонентов, различных энергетических потенциалов радиолиний (если спектр используемых наземных станций достаточно разнороден) возникает задача перераспределения имеющихся ресурсов космической станции, в частности, мощности передатчиков между различными абонентами так, чтобы достоверность передачи информации была не хуже заданной для любой используемой радиолинии в каждом луче.

Пусть задана эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) одного ствола космической станции [1, С.59–61]:

$$EIRP = (P_{прд\ кс} \eta_{прд\ кс}) G_{прд\ кс},$$

где $(P_{прд\ кс} \eta_{прд\ кс})$ – мощность передатчика ствола ретранслятора искусственного спутника Земли, подводимая к передающей антенне искусственного спутника Земли (т.е. с учетом потерь в фидерном тракте). Эта мощность может быть задана при выдаче исходных данных на проектирование системы связи либо выбрана разработчиком на основе имеющихся прототипов и опыта создания искусственного спутника Земли заданной массы и габаритных размеров, определяемых возможностями средств вывода на геостационарную орбиту.

Из общей массы выведенного на орбиту искусственного спутника Земли на собственно ретранслятор и его антенны выделяется не более 15...30%. Остальное приходится на платформу искусственного спутника Земли, содержащую системы коррекции его положения, управления, терморегулирования и жизнеобеспечения. Разумеется, при некоторых общих возможностях по массе и габаритным размерам, можно создавать ретранслятор с разным числом стволов. Чем меньше стволов, тем большей может быть мощность каждого из них.

Необходимо учитывать взаимосвязь между мощностью и полосой пропускания ствола. Существует некоторое оптимальное соотношение между ними, справедливое при используемых параметрах сигналов и типов земных станций. Увеличение мощности за оптимальные пределы дает некоторый рост пропускной способности, однако более медленный, чем это было бы возможно при согласованном изменении мощности и полосы пропускания ствола. На практике установились следующие соотношения: при полосе ствола $\Delta f_{ств} = 35...40$ МГц, используемого для **системы дуплексной связи**, его мощность $(P_{прд\ кс} \eta_{прд\ кс}) = 5...20$ Вт, $EIRP = 23...31$ дБВт при добротности земной станции $G/T=25...39$ дБ/К; снижение G/T требует пропорционального увеличения ЭИИМ.

По выбранному значению ЭИИМ легко определить создаваемую у поверхности Земли плотность потока мощности (ППМ) (SFD – saturation flux density, дБВт/м²):

$$W = 10 \lg \left(\frac{EIRP}{4\pi d^2 L_{дон}} \right), \quad (1)$$

где d – наклонная дальность, $L_{дон}$ – дополнительные потери в атмосфере. Мощность сигнала на входе приемника:

$$P_{вх\ прм} = W S_{эф\ прм}, \quad (2)$$

где $S_{эф.нрм} = S_p q$ – эффективная площадь приемной антенны; S_p – геометрическая площадь раскрыва антенны (для зеркально–параболической антенны $S_p = \pi D^2/4$, где D – диаметр антенны; $q = 0.5...0.7$. По (2) выбирается размер антенны земной станции.

Мощность шума на входе приемника ЗС:

$$P_{ш} = k T \Delta f_{ш}, \quad (3)$$

где k – постоянная Больцмана; T – суммарная температура шума; $\Delta f_{ш}$ – полоса пропускания ствола.

Суммарная температура шума T определяется в основном выбранным типом малошумящего усилителя и составляет обычно от 50...100 до 200...3000 К. Значение $P_{ш}$ следует увеличить относительно определенного по (1.2) на 20...30% для учета помех от других систем связи через искусственный спутник Земли, а также от других стволов данной системы связи, работающих на совпадающих (но с другой поляризацией или с пространственным разнесением зон обслуживания) или соседних частотах.

Из соотношений (1), (2), (3) определяется отношение сигнал-шум [2, С.39–41]: $P_{вх.нрм}/P_{ш}$ как функция ($W S_{эф.нрм}$):

$$\frac{P_{вх.нрм}}{P_{ш}} W = 10 \lg \left(\frac{EIRP}{4\pi d^2 L_{дон}} \right) \frac{S_{эф.нрм}}{kT\Delta f_{ш}}. \quad (4)$$

Выбирая диаметр антенны земной станции D можно изменять $P_{вх.нрм}/P_{ш}$, добиваясь необходимого значения этого отношения. Теоретически необходимое значение следует определять из известного соотношения для предельной пропускной способности ствола (бит/с):

$$C = \Delta f_{ств} \cdot \log_2 \left(1 + \left(\frac{P_c}{P_{ш}} \right)_{дв} \right). \quad (5)$$

Если необходимая пропускная способность задана не в битах в секунду, а в числе каналов, то легко перевести число каналов в эквивалентную скорость передачи: один телефонный канал принимают эквивалентным по скорости передачи 32...64 кбит/с.

Поскольку пропускная способность задана перед проектированием системы, из (5) можно найти необходимое отношение $(P_c/P_{ш})_{дв}$. Однако следует учитывать, что реальная пропускная способность ствола оказывается существенно ниже потенциальной (в 3...10 и более раз) в зависимости от вида используемых сигналов и совершенства аппаратуры. Особенно трудно реализовать потенциальную пропускную способность при особо низких и особо высоких отношениях сигнал-шум $P_c/P_{ш}$, поскольку это требует сложных сигналов и аппаратуры. Обычно принимают $(P_c/P_{ш})_{дв} = 10...20$ дБ. Так, для приема сигналов с частотной модуляцией необходимое $(P_c/P_{ш})_{дв} = 10...12$ дБ во избежание известного явления – порога помехоустойчивости. Для приема двоичных сигналов с фазовой манипуляцией с высокой достоверностью (вероятность ошибки $10^{-5}...10^{-6}$) и некоторым эксплуатационным запасом в зависимости от кратности модуляции требуется отношение сигнал-шум от 10...13 дБ (при двухфазной фазо-

вой модуляции), 13...16 дБ (при четырехфазной фазовой модуляции) до 24...25 дБ (при восьмифазной модуляции). При этом скорость передачи информации (бит/с) может приближаться к значениям $R = \Delta f_{\text{смс}}$ (Гц) при двухфазной модуляции, $R = 2\Delta f_{\text{смс}}$ (Гц) – при четырехфазной, $R = 4\Delta f_{\text{смс}}$ (Гц) – при восьмифазной. Эти значения справедливы при отсутствии многостанционного доступа в системе, т.е. в односигнальном режиме, либо при временном многостанционном доступе, когда потери относительно односигнального режима невелики (1...2 дБ).

Величина $(P_c/P_w)_{dw}$ ограничена также реально осуществимым значением эффективного диаметра антенны $D = \sqrt{4S_{\text{эф}}/(q\pi)}$; из практических и экономических соображений D не бывает более 32 метров, а во вновь создаваемых системах – не более 9...14 м. Минимальное значение D ограничено необходимой пространственной избирательностью антенны для исключения помех от соседних искусственных спутников Земли и обычно для систем фиксированной спутниковой службы должно быть не менее 1,5...7 м в С-диапазоне и 0,9...9 м в Ku-диапазоне. Таким образом, разработчик системы выбирает D в указанных пределах, после чего определяет по (2), (3) $(P_c/P_w)_{dw}$ и, исходя из указанных выше необходимых значений этой величины, выбирает кратность модуляции и скорость передачи информации в стволе.

Выбранное значение D должно также удовлетворять энергетическим требованиям для линии Земля-Космос. Отношение $(P_c/P_w)_{up}$ на входе приемника космической станции должно быть выше определенного нами ранее отношения $(P_c/P_w)_{up}$ на входе приемника земной станции. Если же это условие при приемлемой мощности передатчика не выполняется, то необходимо рассчитать результирующее отношение (P_c/P_w) на входе приемника земной станции с учетом вклада линии вверх и после этого скорректировать оценку скорости R передачи информации в стволе либо увеличить D .

Если для уменьшения мощности передатчика земной станции, упрощения оборудования земной станции и исключения взаимной синхронизации сигналов земной станции принимается решение о применении частотного многостанционного доступа, то оценка емкости ствола $R_{\text{смс}}$ должна быть еще снижена на 2...5 дБ. Оценив $R_{\text{смс}}$ и сопоставив ее с необходимой (заданной) суммарной емкостью системы связи на всех направлениях связи R_{Σ} , найдем необходимое число стволов на спутниках проектируемой сети:

$$n_{\text{ств}} = R_{\Sigma} / R_{\text{ств}}. \quad (6)$$

Расчет пропускной способности спутниковой сети связи

1. Распределение мощности усилителя ретранслятора между лучами

Рассмотрим сеть спутниковой связи, состоящую из спутника-ретранслятора и $N_{\text{зс}}$ земных станций, осуществляющих связь через четыре луча спутника-ретранслятора.

Обозначим число частотных каналов в j -м луче как $N_{\text{зс}j}$.

Обозначим часть мощности, излучаемой спутником-ретранслятором, от-

водимую j -му лучу β_j . Из правила нормировки следует, что $\sum_{j=1}^4 \beta_j = 1$.

Как уже было показано, отношение сигнал-шум на входе приемника космической станции для i -го канала равно:

$$\left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{up\ i} = P_{npd\ зс\ i} \cdot \frac{\lambda_1^2 G_{npd\ зс} G_{нрм\ кс} \eta_{npd\ зс} \eta_{нрм\ кс}}{16\pi^2 d_1^2 L_{дон\ up} kT\Delta f}, \quad (7)$$

где Δf – ширина полосы частот канала.

Пусть $P_{cp} = P_{пик}/H^2$ – средняя мощность сигнала, излучаемого ретранслятором; $P_{пик}$ – пиковая мощность сигнала ретранслятора; H – пикфактор; α_i – доля мощности ретранслятора, отводимая i -му каналу:

$$\alpha_i = \frac{P_i^*}{\sum_{i=1}^{N_{зс}} P_i^*}, \quad (8)$$

где P_i^* – мощность i -го сигнала на входе усилителя ретранслятора после аттенюатора; $\sum_{i=1}^{N_{зс}} P_i^* = P_{ex}$ – мощность сигнала на входе усилителя ретранслятора.

Тогда отношение сигнал-шум на входе приемника земной станции для i -го канала равно:

$$\left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{dw\ i} = \alpha_i P_{cp} \cdot \frac{\lambda_2^2 G_{npd\ кс} G_{нрм\ зс} \eta_{npd\ кс} \eta_{нрм\ зс}}{16\pi^2 d_2^2 L_{дон\ dw} kT\Delta f} \quad (9)$$

Обозначим $K_{npd} = P_{cp} / P_{ex}$ – коэффициент передачи усилителя ретранслятора по мощности. Полное отношение сигнал/шум для всей линии будет равно:

$$\left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{total\ i} = \frac{1}{\frac{1}{(P_c / P_{ш})_{up\ i}} + \frac{J}{K_{npd} P_i^*} + \frac{1}{(P_c / P_{ш})_{dw\ i}}}, \quad (10)$$

где $J = N_{э} \Delta f$ – мощность перекрестных помех.

Поскольку $K_{npd} P_i^* = \alpha_i P_{cp}$, то последнее выражение примет вид:

$$\left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{total\ i} = \frac{1}{\frac{1}{(P_c / P_{ш})_{up\ i}} + \frac{N_{э} \Delta f}{\alpha_i P_{cp}} + \frac{1}{(P_c / P_{ш})_{dw\ i}}}, \quad (11)$$

где спектральная плотность $N_{э}$ перекрестных помех задается формулой:

$$N_9 = \left(\frac{P_{6x}}{N_{3c} \Delta f} + N_{up} \right) \cdot (2e^{\frac{H^2}{2}} (1 - F(H))^2 (H^2 + 1) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} (H(1 - F(H)))), \quad (12)$$

где $N_{up} = 4K \cdot T_B \cdot \Delta f$ – односторонняя спектральная плотность мощности аддитивного белого гауссовского шума на линии вверх;

$$F(H) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^H e^{-t^2/2} dt \quad (13)$$

– гауссов интеграл.

Обозначим в формуле (9) для i -го канала:

$$A_i = \left(\frac{\lambda_2^2 G_{nрd\ кс} G_{nрм\ зс} \eta_{nрd\ кс} \eta_{nрм\ зс}}{16\pi^2 d_2^2 L_{don\ dw} kT \Delta f} \right)_i.$$

Тогда (9) запишется в виде:

$$\left(\frac{P_c}{P_{u_i}} \right)_{dw\ i} = A_i \alpha_i P_{cp}, \quad (14)$$

Соотношение (11) примет вид:

$$\left(\frac{P_c}{P_{u_i}} \right)_{total\ i} = \frac{1}{\frac{1}{(P_c / P_{u_i})_{up\ i}} + \frac{J}{\alpha_i P_{cp}} + \frac{1}{A_i \alpha_i P_{cp}}}. \quad (15)$$

Отсюда:

$$\alpha_i = \frac{J + \frac{1}{A_i}}{P_{cp} \left(\frac{1}{(P_c / P_{u_i})_{total\ i}} + \frac{1}{(P_c / P_{u_i})_{up\ i}} \right)}. \quad (16)$$

При заданной приемной и передающей наземной антенне и антенно-фидерном тракте спутника-ретранслятора ($(P_c/P_{u_i})_{total\ i}$, $(P_c/P_{u_i})_{up\ i}$, A_i) и задаваясь пикфактором H в диапазоне от ∞ до 1 (P_{cp} и J) можно рассчитать необходимую долю α_i мощности ретранслятора для i -го канала при заданном пикфакторе H для обеспечения необходимой достоверности передачи информации. При этом необходимо следить за выполнением условия: $S = \sum_{i=1}^{N_{3c}} \alpha_i \leq 1$.

Если это условие не выполняется, то необходимо уменьшить значение H . Если условие не выполняется ни при каких значениях H из диапазона от ∞ до 1, значит, данная система не может обеспечить заданный уровень функционирования.

Если $S < 1$, то ресурсы СР используются не полностью. Так как спутник – ретранслятор не может при заданном H излучать мощность меньшую P_{cp} , то для i -го канала отводится рабочая доля мощности $\gamma_i = \alpha_i/S$. При этом возникает запас по отношению сигнал/шум $\Delta(P_c/P_u)_i$, определяемый по формуле, аналогичной (15):

$$\Delta\left(\frac{P_c}{P_u}\right)_i = \frac{1}{\frac{1}{(P_c/P_u)_{up\ i}} + \frac{J}{\gamma_i P_{cp}} + \frac{1}{A_i \gamma_i P_{cp}}} - \left(\frac{P_c}{P_u}\right)_{total\ i}. \quad (17)$$

Доля мощности спутника-ретранслятора, отводимая j -му лучу:

$$\beta_j = \sum_{i \in j} \gamma_i. \quad (18)$$

2. Расчет пропускной способности сети спутниковой связи с архитектурой «центральная звезда»

Рассмотрим расчет пропускной способности следующей сети спутниковой связи:

- связь между абонентами сети осуществляется только через центральную земную станцию;
- ретрансляция сигналов земных станций осуществляется через линейный бортовой ретранслятор космической станции с автоматической регулировкой усиления;
- через коммутируемые стволы космической станции одновременно ретранслируются сигналы от центральной земной станции и абонентских земных станций.

Расчет производится по следующим основным расчетным формулам:

$$(P_c/P_u)_1 = P_{c\ \text{вх.азс}} / (P_{u\ \text{азс}} + P_{u\ \text{кз}} + P_{\text{помех}}); \quad (19)$$

$$(P_c/P_u)_2 = P_{c\ \text{вх.цзс}} / (P_{u\ \text{цзс}} + P_{u\ \text{кз}} + P_{\text{помех}}), \quad (20)$$

где $(P_c/P_u)_1$ – отношение сигнал/шум по входу демодулятора абонентских земных станций, $(P_c/P_u)_2$ – отношение сигнал/шум по входу демодулятора центральной земной станции, $P_{u\ \text{кз}}$ – шум космической станции на входе абонентских земных станций и центральной земной станции, $P_{\text{помех}}$ – помеха на входе абонентских земных станций и центральной земной станции от других систем.

Величины $P_{c\ \text{вх.азс}}$ и $P_{c\ \text{вх.цзс}}$ определяются для участка радиолинии Космос-Земля следующими соотношениями:

$$P_{c\ \text{вх.азс}} = PG_1 \frac{S_{\text{эф азс}}}{4\pi d^2 L_{\text{дон dw}}}, \quad (21)$$

$$P_{c\ \text{вх.цзс}} = PG_2 \frac{S_{\text{эф цзс}}}{4\pi d^2 L_{\text{дон dw}}}, \quad (22)$$

где PG_1 и PG_2 – парциальные ЭИИМ космической станции в направлении

абонентских земных станций и центральной земной станции соответственно; $S_{эф.цзс}$ и $S_{эф.азс}$ – эффективные площади антенн абонентских земных станций и центральной земной станции соответственно; $L_{дон\ dw}$ – потери сигнала в атмосфере, потери сигнала за счет наведения антенн, поляризационные потери, потери из-за технической реализации и др.; d – дальность.

Величины PG_1 и PG_2 зависят от мощности сигналов на входе космической станции от абонентских земных станций и центральной земной станции, количества каналов, а также от собственных шумов космической станции и помех на входе:

$$PG_1 = PG_{кc} \frac{P_{с\ вх.\ кс\ от\ цзс}}{N_1 \cdot P_{с\ вх.\ кс\ от\ цзс} + N_2 \cdot P_{с\ вх.\ кс\ от\ азс} + P_{ш\ кс} + P_n}; \quad (23)$$

$$PG_2 = PG_{кc} \frac{P_{с\ вх.\ кс\ от\ азс}}{N_1 \cdot P_{с\ вх.\ кс\ от\ цзс} + N_2 \cdot P_{с\ вх.\ кс\ от\ азс} + P_{ш\ кс} + P_n}, \quad (24)$$

где $G_{кc}$ – ЭИИМ ствола космической станции; N_2, N_1 – количество частотных каналов центральной земной станции или количество работающих абонентских земных станций соответственно; $P_{ш\ кс}$ – собственные шумы космической станции; P_n – мощность помехи на входе космической станции.

Величины $P_{с\ вх.\ кс\ от\ цзс}$ и $P_{с\ вх.\ кс\ от\ азс}$ определяются для участка радиолинии Земля-Космос:

$$P_{с\ вх.\ кс\ от\ цзс} = PG_{цзс} \cdot S_{эф.кc} / (4\pi d^2 L_{дон\ up}), \quad (25)$$

$$P_{с\ вх.\ кс\ от\ азс} = PG_{мст} \cdot S_{эф.кc} / (4\pi d^2 L_{дон\ up}), \quad (26)$$

где $PG_{цзс}$ и $PG_{азс}$ – ЭИИМ абонентских земных станций и центральной земной станции соответственно; $S_{эф.кc}$ – эффективная площадь антенны КС по лучу; $L_{дон\ dw}$ – потери сигнала в атмосфере, потери наведения, поляризационные и др. потери.

Отметим, что суммарные энергетические потери на линии «вверх» в Ku – диапазоне составят приблизительно $L_{дон\ up} = 6$ дБ, на линии вниз $L_{дон\ dw} = 6.5$ дБ.

Суммарное приращение шумовой температуры на линии «вверх» в Ku – диапазоне составит 350К, на линии «вниз» 80К.

В статье рассмотрен простейший случай. На самом деле, сеть спутниковой связи, состоящая из большого числа земных станций, имеет в своем составе земные станции, связанные и по технологии DAMA (для телефонии), и по технологии РАМА (например, для связи центральной земной станции и узловой земной станции), и по технологии TDM/TDMA (региональные сети передачи данных), не говоря уже о доступе в Интернет по технологии DVB-RSC и т.п. Поэтому, в общем случае, расчет пропускной способности сети спутниковой связи представляет собой довольно сложную задачу, которая решается статистическими методами.

Выводы

Пропускная способность сети определяется не только ее архитектурой и количеством каналов связи в ней и типами этих каналов, но и качеством информационных каналов, а также возможностями коммутации, пропускной способностью и механиз-

мами перераспределения ресурсов космической станции и земной станции.

В решении основной проблемы современности – предотвращении и снижении ущерба от происходящих стихийных природных бедствий и техногенных катастроф – система глобального мониторинга с КА на ГСО может сыграть важную роль в случае минимизации ресурсных затрат и доступа к информации всех заинтересованных организаций в рамках международной программы.

Литература

1. Кантор Л.Я., Тимофеев В.В. Спутниковая связь и проблема геостационарной орбиты. М.: Радио и связь, 1988. 168 с.
2. Меньшикова Л.В. Особенности контроля радиочастотного спектра территориально распределенной системы // Полет. 2005. № 9. с. 3-41.
3. Меньшикова Л.В. Спутниковая связь-2006: итоги и перспективы // Технологии и средства связи. 2006. № 6. с. 67.
4. Найденова Д.М., Меньшиков В.А. Роль космодрома Байконур в освоении космического пространства // Научно-технический журнал «Вестник «НПО «ТЕХНОМАШ»». 2020. № 3. с. 3-16.
5. Найденова Д.М. Тезисы к докладу «Космос и безопасность человечества» / XVI молодежные Циолковские чтения. Секция «Географические информационные технологии и дистанционное зондирование Земли» / Правительство Кировской области, Кировское областное государственное бюджетное учреждение культуры «Музей К.Э. Циолковского, авиации и космонавтики». Кировская область, г. Киров, 2021. с. 81.

УДК 629.7

Повышение достоверности контроля надежности систем ракетно-космической техники при наземной отработке на основе учета результатов предшествующего контроля их технических параметров

В.Б. Рудаков, главный научный эксперт по надежности и безопасности РКТ и НКИ;

М.И. Макаров, первый заместитель директора – научный руководитель НИИ КС, «НИИ КС им. А.А. Максимова» – филиал АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», г. Королев, Московская область

Рассматривается задача поэтапного контроля сложных систем ракетно-космической техники (РКТ) в статистической постановке. На первом этапе проводится контроль технических параметров системы, на втором этапе проводится контроль выполнения заданных требований к ее надежности. Поскольку контроль технических параметров предшествует контролю надежности системы, результаты контроля параметров системы несут информацию не только о состоянии ее работоспособности, но и долю информации о надежности системы. И эту информацию необходимо учитывать при контроле надежности системы для повышения достоверности ее контроля. Впервые разработана формализованная постановка задачи и математические зависимости для определения достоверности контроля выполнения требований к надежности систем РКТ с учетом результатов предшествующего контроля технических параметров.

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

Increasing the reliability of monitoring the reliability of rocket and space technology systems during ground testing based on taking into account the results of previous control of their technical parameters

V.B. Rudakov, Chief scientific expert on the reliability and safety of rocket and space technology and ground-based space infrastructure;

M.I. Makarov, First Deputy Director – Scientific Director of the Space Systems Research Institute, A.A. Maksimov Space Systems Research Institute – branch of the joint-stock company Khrunichev State Research and Production Space Centre, Korolev, Moscow region

The problem of step-by-step control of complex systems of rocket and space technology in a statistical formulation is considered. At the first stage, the technical parameters of the system are monitored, at the second stage; the fulfillment of the specified requirements for its reliability is monitored. Since the control of technical

parameters precedes the control of system reliability, the results of the control of system parameters carry information not only about the state of its operability, but also a share of information about the reliability of the system. And this information must be taken into account when monitoring the reliability of the system to increase the reliability of its control. For the first time, a formalized formulation of the problem and mathematical dependencies have been developed to determine the reliability of monitoring compliance with the requirements for the reliability of rocket and space technology systems, taking into account the results of previous control of technical parameters.

Control, optimization, parameters, planning, losses, risks of the 1st and 2nd kind, technical documentation, requirements, economic costs.

Этап наземной отработки систем РКТ является сложным и многообразным, включает в себя большое количество разнообразных экспериментальных исследований, различного вида испытаний. К числу этих испытаний относятся: лабораторно-отрабочные испытания (ЛОИ), конструкторско-доводочные испытания (КДИ), граничные испытания (ГИ), специальные испытания (СПИ), автономные и комплексные испытания, которые могут быть отработочными и приемо-сдаточными, и другие виды испытаний.

Нормативной базой для организации и проведения этих испытаний РКТ являются требования руководящих документов, например, [9, С. 1-382)], государственных, отраслевых стандартов и других. Главная задача отработки РКТ сводится к всесторонней проверке реализуемости разработанных принципов построения и функционирования изделий; оценке эффективности принятых при проектировании конструкторских и технологических решений; контролю работоспособности и технических параметров элементов и систем; разработке и реализации мероприятий по доведению значений технических характеристик до уровней, соответствующих требованиям документации.

Одним из главных признаков любой сложной технической системы РКТ, отражающим ее целостность, является наличие у нее определенной иерархической структуры. Этот признак полностью определяет характер организации ее наземной отработки и испытаний. Отработку систем [3, С. 19-23; 7, С. 38-45] проводят строго поэтапно и последовательно, испытывая изделия по мере возрастания иерархических уровней. После успешных отработочных испытаний и контроля элементов низших иерархических уровней переходят к автономным испытаниям и контролю подсистем, а после них проводят комплексные испытания и контроль системы в целом. При этом на каждом уровне контролируется работоспособность, дается оценка и проводится контроль технических характеристик и параметров элементов, подсистем и системы в целом и принимаются меры по доведению их значений до уровня требований технической документации. Такая последовательность проведения испытаний свидетельствует о том, что на каждом иерархическом уровне контроль заданных значений технических параметров системы, определяющих ее работоспособность, предшествует кон-

тролю заданных значений показателей надежности. Вместе с тем, очевидно, что результаты предшествующего контроля параметров системы несут информацию не только о состоянии каждого параметра и их совокупности, определяющей работоспособное состояние системы, но и какую-то долю информации о надежности системы. И эту информацию необходимо учитывать для повышения достоверности контроля надежности системы, которая представляет собой вероятность принятия правильных решений о соответствии показателя надежности заданным требованиям. Таким образом, задача, которая рассматривается в данной работе, состоит в том, чтобы ответить на важный вопрос: каким образом при контроле надежности систем РКТ можно учесть результаты предшествующего контроля ее технических параметров для повышения достоверности контроля заданных требований к надежности системы?

Поскольку решение этого вопроса связано с результатами, которые были получены раньше, последовательно приведем эти результаты.

1. Сначала рассмотрим контроль технических параметров системы.

Предположим [2, С. 265-278; 3, С. 227-245], что показатель работоспособности конкретной системы РКТ полностью определяется некоторой совокупностью N_n независимых между собой параметров $\{x_j\}$, $j = \overline{1, N_n}$. Пусть на каждый параметр в технической документации задан допуск (двухсторонний или односторонний). Величина этого допуска может быть определена известными методами, например [1, С. 195-200; 4, С. 6-9; 5, С. 4-5; 11, С.1-393; 12, С. 5-10]. Реально, как правило, контроль параметров проводится следующим образом: с использованием технических средств контроля по результатам контроля определяется, находится ли каждый параметр в допуске или он вышел за пределы заданного допуска.

С учетом изложенного определим некоторые понятия. Условимся под *годным* понимать параметр, находящийся в пределах заданного допуска, под *дефектным* – параметр, вышедший за пределы допуска. *Годной* будем считать систему, у которой годны (находятся в пределах допусков) все параметры, и соответственно *дефектной* - систему, у которой дефектен хотя бы один параметр.

По результатам контроля принимаются определенные решения. А поскольку контроль параметров системы не является абсолютно достоверным, что связано с погрешностями технических средств измерения [1, С. 195-200; 4, С. 6-9; 5, С. 4-5; 11, С. 1-393; 12, С. 5-10], принимаемые решения могут быть правильными и ошибочными. Поэтому такой контроль можно охарактеризовать следующими показателями: потерями, которые обусловлены принятием ошибочных решений по результатам контроля, и экономическими затратами на контроль.

В работах [3, С. 175-179, 208-215, 265-267; 7, С. 148-153, 187-193, 227-231] предложены методы оптимального планирования контроля систем РКТ, основанные на минимизации целевой функции затрат на контроль и потерь, связанных рисками принятия ошибочных решений. Эта целевая функция вытекают из самой вероятностно-статистической структуры контроля каждого технического параметра системы и системы в целом. Она включает в себя сумму математических ожиданий:

математического ожидания экономических потерь за счет браковки годной системы (связаны с риском 1 рода α);

математического ожидания экономических потерь за счет приёмки дефектной системы (связаны с риском 2 рода β);

математического ожидания экономических затрат на контроль системы.

При этом с использованием аппарата алгебры событий получены математические зависимости для определения рисков 1 и 2 рода, которые представляют собой *безусловные* вероятности забраковать годную или принять дефектную систему, соответственно. В случае контроля всей совокупности N_{Π} параметров системы, определенных в технической документации, риски 1 и 2 рода имеют следующий вид:

$$\alpha_{\Pi} = P(A_{\Pi})P(\bar{B} / A_{\Pi}) = \prod_{j=1}^{N_{\Pi}} P(A_j) \left[1 - \prod_{j=1}^{N_{\Pi}} (1 - \alpha_{yj}) \right], \dots\dots\dots (1)$$

$$\beta_{\Pi} = P(\bar{A}_{\Pi})P(B / \bar{A}_{\Pi}) = \prod_{j=1}^{N_{\Pi}} \left[P(A_j)(1 - \alpha_{yj}) + \beta_{\pi j} \right] - \prod_{j=1}^{N_{\Pi}} P(A_j) \prod_{j=1}^{N_{\Pi}} (1 - \alpha_{yj}), \dots\dots\dots (2)$$

где индекс « Π » означает «параметры системы»;

$P(A_{\Pi})$ – вероятность того, что система годная;

$P(\bar{A}_{\Pi})$ – вероятность того, что система дефектная;

$P(\bar{B} / A_{\Pi})$ – вероятность забраковать систему, при условии, что она годная;

$P(B / \bar{A}_{\Pi})$ – вероятность принять систему, при условии, что она дефектная;

$P(A_j)$ – вероятность того, что j -й параметр системы годный (находится в пределах заданного допуска);

$\alpha_{\pi j}$ и $\beta_{\pi j}$ метрологические риски 1 и 2 рода, относящиеся к каждому j -му параметру системы РКТ

$$\alpha_{\pi j} = P(A_j)P(\bar{B}_j / A_j) = P(A_j) \alpha_{yj}; \quad \beta_{\pi j} = P(\bar{A}_j)P(B_j / \bar{A}_j) = P(\bar{A}_j) \beta_{yj};$$

$\alpha_{yj} = P(\bar{B}_j / A_j)$ – условная вероятность того, что по результатам контроля j -й параметр признан дефектным (событие $\bar{B}_j$), хотя на самом деле он является годным (событие A_j);

$\beta_{yj} = P(B_j / \bar{A}_j)$ – условная вероятность того, что по результатам контроля j -й параметр признан годным (событие B_j), хотя на самом деле он является дефектным (событие $\bar{A}_j$).

Эти метрологические риски определяются методами метрологии [11, С. 393].

2. Перейдем теперь к статистическим планам контроля надежности.

В работах [3, С. 175-179, 208-215, 265-267; 7, С. 148, 187-193, 227-231] решена задача оптимального планирования контроля надежности систем РКТ на основе минимизации целевой функции, о которой говорилось выше. Для таких систем требования по надежности в технической документации задаются в виде вероятности их безотказной работы $P_{\text{тр}}$ за заданное время $t_{\text{зад}}$.

В работе [3, С. 175-179, 208-215, 265-267; 10, С. 10-11] были разработаны

математическая постановка задачи оптимального планирования контроля надежности и математические зависимости для определения рисков 1 и 2 рода, связанные с принятием неправильных решений по результатам контроля надежности при отработке систем и обусловленные стохастическим характером появления их отказов. Такая постановка задачи соответствует следующей наиболее общей схеме контроля надежности системы при отработке: проводятся испытания системы в течение определенного времени, заданного в технической документации, по их результатам определяется оценка вероятности безотказной работы системы. Далее, эта характеристика по определенным правилам сравнивается с заданными требованиями. Если требования выполняются, то система принимается как годная (удовлетворяющая заданным требованиям по надежности), в противном случае система является дефектной (не удовлетворяющей требованиям) и она бракуется (проводится повторный контроль, доработка системы, и др.).

Постановка задачи оптимального планирования контроля надежности формулируется следующим образом:

найти такое значение объема контроля системы РКТ $n^* > 0$ и соответствующие ему значения рисков 1 и 2 рода α_n^* и β_n^* , которые доставляют минимум целевой функции экономических затрат на контроль и потерь, связанных с принятием ошибочных решений [3, С. 175-179; 7, С. 148-153]:

найти

$$\min_{(n, \alpha_n, \beta_n)} C_{\Sigma} = \min [C_{1\alpha} \alpha_n + C_{1\beta} \beta_n + C_{1k} n], \quad (3)$$

где

$$\alpha_n = \int_{P_{TP}}^1 (1-P^n) f(P) dP = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_{P_{TP}}^1 (1-P^n) P^{b-1} (1-P)^{a-1} dP, \quad (4)$$

$$\min_{(n, \alpha_n, \beta_n)} C_{\Sigma} = \min [C_{1\alpha} \alpha_n + C_{1\beta} \beta_n + C_{1k} n]$$

$$\beta_n = \int_0^{P_{TP}} P^n f(P) dP = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_0^{P_{TP}} P^{n+b-1} (1-P)^{a-1} dP, \quad (5)$$

в области $n > 0$, $\alpha_n \geq 0$, $\beta_n > 0$.

где C_{Σ} – математическое ожидание затрат на контроль и потерь, связанных с принятием ошибочных решений;

$C_{1\alpha}\alpha$ и $C_{1\beta}\beta$ – математические ожидания потерь при контроле одной системы; α – риск 1 рода или безусловная вероятность того, что система является годной (удовлетворяет заданным требованиям по надежности) и по результатам контроля будет забракована; β – риск 2 рода или безусловная вероятность того, что система является дефектной (не удовлетворяет заданным требованиям по надежности) и будет принята для дальнейшего использования; C_{1k} – математическое ожидание затрат на контроль системы РКТ;

N – объем контроля надежности, подлежащий определению (количество

систем, подвергаемых контролю, либо количество циклов контроля системы, связанное с временем ее испытаний и т.д.);

индекс «н» означает «надежность системы».

Результатом минимизации целевой функции (3) является оптимальный статистический план контроля надежности системы (n^* , α_n^* , β_n^* , $c=0$).

Априорные риски 1 и 2 рода (4) и (5) получены с использованием плотности теоретически обоснованного в [3, С. 192; 7, С. 168] сопряженного априорного бета-распределения, где P – показатель надежности системы, трактуется как случайная величина (в байесовском смысле), имеющая плотность бета-распределения

$$f(P) = \frac{1}{B(b, a)} P^{b-1} (1-P)^{a-1} = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} P^{b-1} (1-P)^{a-1}, \dots\dots\dots (6)$$

$$B(b, a) = \frac{\Gamma(a)\Gamma(b)}{\Gamma(a+b)} \text{ – полная бета-функция.}$$

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

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

табличные значения, которого можно найти, например, в [2, С. 398; 8, С. 239; 13, С. 67-71].

Параметры a и b априорного бета-распределения определяются по накопленной статистической информации о надежности системы по формулам [3, С. 182; 7, С. 239]:

$$a = N_{\Sigma} (1 - \hat{P}) + 1, \dots\dots\dots (7)$$

$$b = (N_{\Sigma} \hat{P} + 1), \dots\dots\dots (8)$$

где $\hat{P}$ – реализовавшаяся оценка максимального правдоподобия показателя надежности системы

$$P = 1 - \frac{m_{\Sigma}}{N_{\Sigma}}, \dots\dots\dots (9)$$

m_{Σ} – количество отказавших систем, определенное по предварительной накопленной информации о результатах контроля и испытаний совокупности N_{Σ} систем (или количество отказов одной системы при N_{Σ} испытаниях). При этом если накопленная информация о надежности статистически неоднородна, то привлекаются методы обработки такой информации, изложенные в [3, С. 143-164; 7, С. 123-136]. Поэтому значения m_{Σ} и N_{Σ} в общем случае могут быть нецелочисленными. Для их определения используется, наряду с самой оценкой максимального правдоподобия, и среднее квадратическое отклонение случайной величины P относительно этой оценки

$$\sigma_{\hat{P}}[P] = \frac{1}{N_{\Sigma} + 2} \sqrt{\frac{(1 + N_{\Sigma} \hat{P})(1 + N_{\Sigma} - N_{\Sigma} \hat{P})}{N_{\Sigma} + 3} + (2\hat{P} - 1)^2} \dots\dots\dots(10)$$

В работах [3, С. 193; 7, С. 169] показано, что риски 1 и 2 рода в зависимости от величины n (формулы (4),(5)) изменяются в противоположных направлениях, поэтому целевая функция (3) должна иметь минимум, которому соответствует оптимальный план контроля ($n^*, \alpha^*, \beta^*, c=0$), где c – приемочное число плана контроля, которое для высоконадежных систем РКТ равно нулю.

Здесь следует особо заметить, что по определению [3, С. 166-167; 7, С. 139] *статистический план контроля* ($n, \alpha, \beta, c=0$) – это совокупность данных о виде контроля, объеме контролируемой выборки, контрольных нормативах и решающих правилах. Статистический план контроля (план контроля) учитывает вероятностную природу контроля, поскольку содержит риски 1 и 2 рода α и β , связанные с принятием ошибочных решений. В свою очередь эти риски являются характеристиками **достоверности контроля** D , которая представляет собой **вероятность принятия правильных решений о выполнении заданных требований по результатам контроля** и является важнейшей характеристикой, то есть:

$$D = 1 - (\alpha + \beta). \quad (11)$$

Установлено, что целевая функция вида (3) в зависимости от величин входящих в нее составляющих может быть убывающей по переменной n , возрастающей и иметь минимум.

Если функция является возрастающей, то контроль надежности проводить нецелесообразно, поскольку это приведет к увеличению экономических затрат и потерь, связанных с рисками принятия ошибочных решений.

Если функция является убывающей, то необходим контроль в пределах заданного времени $t_{зад}$ безотказной работы, либо заданной в документации наработки $T_{тр}$ системы на отказ, определяющей количество циклов контроля, если контроль автоматизированный, и т.д.

И, наконец, если функция имеет минимум, то контроль следует проводить по оптимальному плану ($n^*, \alpha^*, \beta^*, c=0$), реализация которого обеспечивает минимальные экономические затраты на контроль и потери, связанные с рисками принятия ошибочных решений. То есть, сама целевая функция является как бы индикатором необходимости проведения контроля и испытаний.

Как отмечалось, контроль технических параметров системы предшествует контролю надежности системы, поэтому риски, возникающие при контроле надежности системы, связаны с рисками, возникающими при предшествующем контроле ее технических параметров. Такая взаимосвязь определяется следующей спецификой:

при контроле параметров *системы* возникают ошибки 1 и 2 рода, в результате которых годную систему можно принять за дефектную, а дефектную – за годную. Эти ошибки обусловлены ограниченной точностью и погрешностями средств измерения. Вероятности этих ошибок характеризуются соответствующими рисками 1 и 2 рода;

при проведении испытаний и контроля *надежности* системы по оптимальным планам также возникают ошибки 1 и 2 рода, в результате которых годную систему (удовлетворяющую требованиям к надежности) можно принять за дефектную (не удовлетворяющую требованиям к надежности), а дефектную – за годную. Эти ошибки обусловлены стохастическим характером проявления отказов, ограниченным временем проведения контроля системы (количеством циклов проведения контроля за время испытаний). Вероятности этих ошибок также характеризуются соответствующими рисками 1 и 2 рода.

Наблюдается следующая взаимосвязь ошибок или рисков 1 и 2 рода:

риски при контроле технических параметров *системы* и риски при контроле надежности системы при реализации оптимальных планов контроля надежности.

При этом риски, возникающие при контроле надежности, связаны с рисками, возникающими при контроле технических параметров, через функционал достоверности контроля системы (11):

$$D = F[\alpha_{\Pi}, \beta_{\Pi}, \alpha_H^*, \beta_H^*], \quad (12)$$

где α_H^* и β_H^* – риски 1 и 2 рода, возникающие при контроле надежности по оптимальному плану;

α_{Π} и β_{Π} риски 1 и 2 рода, относящиеся к результатам предшествующего контроля технических параметров системы, которые определяются по выражениям (1) и (2).

Из этого следует, что достоверность контроля заданных требований к надежности системы, которая представляет собой вероятность принятия правильных решений по результатам контроля, можно повысить, если учесть результаты предшествующего контроля технических параметров системы.

Таким образом, возникает задача, которую в общем виде можно сформулировать следующим образом.

Определить такое значение достоверности контроля надежности системы, которое учитывает результаты предшествующего контроля ее технических параметров и соответствует оптимальному плану контроля заданных требований к надежности системы при наземной отработке.

В формализованном виде эту задачу можно записать так.

Найти функционал

$$D = F[\alpha_{\Pi}, \beta_{\Pi}, \alpha_H^*, \beta_H^*], \dots\dots\dots (13)$$

где $\alpha_{\Pi}, \beta_{\Pi}, \alpha_H^*, \beta_H^*$ являются функциями

$$\alpha_{\Pi} = \alpha(N_{\Pi}, \alpha_{\Pi j}, \beta_{\Pi j}), \quad (14)$$

$$\beta_{\Pi} = \beta(N_{\Pi}, \alpha_{\Pi j}, \beta_{\Pi j}), \quad (15)$$

$$\alpha_H^* = \alpha_H[P_{TP}, n^*, f(P), a, b], \quad (16)$$

$$\beta_H^* = \beta_H[P_{TP}, n^*, f(P), a, b], \quad (17)$$

оптимальный план контроля надежности системы
 $(n_H^*, \alpha_H^*, \beta_H^*, c=0) = \operatorname{argmin} C_{\Sigma}$, (18)

а минимум $C_{\Sigma} = \min \{C_{1\alpha}\alpha_H + C_{1\beta}\beta_H + C_{1kn}\}$ (19)

определяется в области следующих неравенств

$\beta_H > 0, \alpha_H \geq 0, \alpha_{II} \geq 0, \beta_{II} > 0, \dots$ (20)

$n > 0, \dots$ (21)

Данная задача записана в наиболее общем виде. Решение задачи в постановке (13)-(21) позволит:

с одной стороны, повысить достоверность контроля надежности системы, то есть вероятность принятия правильного решения по результатам контроля, за счет учета результатов предшествующего контроля ее технических параметров;

с другой стороны, снизить затраты и потери при отработке системы за счет проведения контроля надежности по оптимальному плану.

Конкретизируем задачу. Пусть при отработочных испытаниях проводится контроль параметров некоторой системы РКТ, определяющей ее работоспособность. То есть, в системе контролируется совокупность N_{II} независимых между собой параметров $\{x_j\}$, $j = \overline{1, N_{II}}$, на которые в технической документации заданы допуски. При этом если какой-либо параметр или группа параметров не находится в пределах заданного допуска система подвергается регулировкам, повторному контролю, доработкам и т.д. Но в конечном итоге система принимается как годная для дальнейшего контроля заданных требований к ее надежности $P_{тр}$.

Введем в рассмотрение следующие случайные события.

A_{II} – система является годной (все параметры системы находятся в пределах заданных допусков); $\overline{A_{II}}$ – противоположное событие (система дефектная, у которой дефектен хотя бы один параметр); B – система по результатам контроля будет принята для дальнейшего проведения контроля ее надежности; $\overline{B}$ – противоположное событие (система будет забракована).

По определению [3, С. 177; 7, С. 150-151] *априорных* безусловных рисков 1 и 2 рода, относящихся к контролю параметров, и учитывая выражения (1) и (2)

$$\alpha_{II} = P(A_{II}) P(\overline{B} / A_{II}), \quad (22)$$

$$\beta_{II} = P(\overline{A_{II}}) P(B / \overline{A_{II}}). \quad (23)$$

Среди введенных событий по условию задачи событие B является достоверным, поскольку система по результатам контроля ее параметров принята, и вероятность этого события $P(B) = 1$, а событие $\overline{B}$ является невозможным событием, поэтому $P(\overline{B}) = 0$, поскольку система принята. Поэтому $P(\overline{B} / A_{II}) = 0$ и $P(B / \overline{A_{II}}) = 1$, то есть $\alpha_{II} = 0$ и $\beta_{II} = P(\overline{A_{II}})$, или с учетом выражения (2) *апостериорный* риск 2 рода будет

$$\beta_{\Pi}^A = \prod_{j=1}^{N_{\Pi}} [P(A_j)(1 - \alpha_{y_j}) + \beta_{\Pi j}] - \prod_{j=1}^{N_{\Pi}} P(A_j) \prod_{j=1}^{N_{\Pi}} (1 - \alpha_{y_j}) \dots (24)$$

Таким образом, в результате контроля технических параметров системы РКТ после ее принятия для дальнейшего контроля заданных требований к надежности могут реализоваться только два события:

событие $\bar{A}_{\Pi}$ с вероятностью β_{Π} событие A_{Π} с вероятностью $(1 - \beta_{\Pi})$.

Перейдем теперь к следующему этапу контроля системы – контролю ее надежности.

По-прежнему будем считать, годной систему, удовлетворяющую заданным требованиям к надежности, и дефектной – не удовлетворяющую заданным требованиям. Учитывая эти определения, введем в рассмотрение следующие события.

A_H – система с точки зрения ее надежности является годной (где индекс «н» означает «надежность системы»); $\bar{A}_H$ – противоположное событие; В – система по результатам контроля ее надежности будет принята; $\bar{B}$ – противоположное событие. По определению *априорные* риски 1 и 2 рода, возникающие при контроле надежности, связаны с вероятностями наступления следующих событий:

$$\alpha_H = P(A_H \bar{B}) \quad \text{и} \quad \beta_H = P(B \bar{A}_H).$$

Поскольку этапы контроля технических параметров системы и контроля ее надежности в виде P_{mp} независимы, то возможные события A_{Π} с вероятностью $(1 - \beta_{\Pi})$ и $\bar{A}_{\Pi}$ с вероятностью β_{Π} , как результат предшествующего параметрического контроля системы, могут наступить вместе со следующими сложными событиями, реализация которых определяет *априорные* риски 1 и 2 рода: сложное событие $(A_{\Pi} A_H \bar{B})$ и сложное событие $(\bar{A}_{\Pi} \bar{A}_H B)$. Отсюда, с учетом независимости этапов, получаем следующие выражения для рисков 1 и 2 рода:

$$\alpha = P(A_{\Pi}) \alpha_H = (1 - \beta_{\Pi}^A) \alpha_H, \quad (25)$$

$$\beta = P(\bar{A}_{\Pi}) \beta_H = \beta_{\Pi}^A \beta_H \quad (26)$$

или, учитывая выражения (4) и (5)

$$\alpha = (1 - \beta_{\Pi}^A) \alpha_H = (1 - \beta_{\Pi}^A) \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_{P_{mp}}^1 (1 - P^n) P^{b-1} (1 - P)^{a-1} dP, \quad (27)$$

где величина *апостериорного* риска 2 рода β_{Π}^A определяется на основе формулы (24) с учетом результатов контроля технических параметров системы РКТ и с использованием методов метрологии.

Тогда, используя формулу (11), *априорная* достоверность контроля надежности системы с учетом результатов предшествующего контроля ее технических параметров будет равна

$$D = 1 - (\alpha + \beta) = 1 - [(1 - \beta_{\Pi}^A) \alpha_H + \beta_{\Pi}^A \beta_H] \quad (29)$$

или с учетом формул (17) и (18)

$$D = 1 - \left\{ (1 - \beta_{\Pi}^A) \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_{P_{TP}}^1 (1-P^n) P^{b-1} (1-P)^{a-1} dP + \dots \right. \\ \left. + \beta_{\Pi}^A \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_0^{P_{E3}} P^{n+b-1} (1-P)^{a-1} dP \right\}. \quad (30)$$

Полученные выражения (29), (30) соответствуют любому статистическому плану контроля надежности системы ($n, a, \beta, c=0$). При этом если контроль надежности по результатам испытаний уже проведен и система принята для дальнейшего использования (*апостериорный случай*), то $\alpha_H = 0$. В этом случае выражение (30) для *апостериорной* достоверности контроля заданных требований к надежности с учетом результатов предшествующего контроля технических параметров системы РКТ принимает следующий вид

$$D^A = 1 - \beta_{\Pi}^A \beta_{H=0}^A = \beta_{\Pi}^A \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_0^{P_{TP}} P^{n+b-1} (1-P)^{a-1} dP \quad (31)$$

где $\beta_{H=0}^A$ – *апостериорный* риск 2 рода, с которым принята
 $\min_{(n, \alpha_n, \beta_n)} C_{\Sigma} = \min [C_{1\alpha} \alpha_n + C_{1\beta} \beta_n + C_{1\kappa} n]$ система после контроля ее
 надежности и который определяется с учетом результатов, полученных при контроле надежности системы.

Выражение (31) представляет собой *апостериорную* достоверность, то есть вероятность принятия правильных решений о выполнении заданных требований по результатам контроля надежности системы РКТ при наземной отработке с учетом результатов предшествующего контроля ее технических параметров.

Если испытания системы проводятся по оптимальному плану контроля надежности ($n^*, \alpha_n^*, \beta_n^*, c=0$) в соответствии с постановкой (3)-(5), то можно определить *априорную* и *апостериорную* достоверность контроля на основе (29) и (31) следующим образом

$$D^* = 1 - \left\{ (1 - \beta_{\Pi}^A) \int_{P_{TP}}^1 (1 - P^{n^*}) f(P) dP + \beta_{\Pi}^A \int_0^{P_{TP}} P^{n^*} f(P) dP \right\}, \quad (32)$$

$$D^{A*} = 1 - \beta_{\Pi}^A \int_0^{P_{TP}} P^{n^*} f(P) dP. \quad (33)$$

В заключение заметим, что поскольку величины β_{Π} и $(1 - \beta_{\Pi})$, входящие в выражения (29)-(33) меньше единицы, то, можно сделать важный вывод – проведение предшествующего контроля *технических параметров* систем РКТ повышает достоверность контроля их надежности на этапе наземной отработки.

Таким образом, разработаны математические зависимости, которые по-

звolyют учесть результаты предшествующего контроля технических параметров систем для повышения достоверности контроля выполнения заданных требований к ее надежности.

Литература

1. Беляев Ю.К., Ушаков И.А. Оптимальные границы контрольных допусков // В сб.: О надежности сложных систем. М.: Сов. радио, 1965. С. 193-203.
2. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983. 416 с.
3. Волков Л.И., Рудаков В.Б. Статистический контроль иерархических систем. М.: СИП РИА, 2002. 355 с.
4. Донецкая Т.В., Сиднев А.Г. Инженерный метод определения вероятностей ошибок 1 и 2 рода при допусковом контроле параметров // Метрология: Прил. к журн.: Измерительная техника. 1983. № 8. С. 3-10.
5. Земмельман М.А. и др. О связи погрешности измерений при контроле с показателями достоверности контроля параметров образцов продукции // Измерительная техника. 1986. № 10. С. 3-5.
6. Макаров М.И., Рудаков В.Б. и др. Апостериорные риски при планировании наземной отработки ракетно-космической техники // Двойные технологии. 2013. № 3. С. 31-34.
7. Меньшиков В.А., Рудаков В.Б., Сычев В.Н. Контроль качества космических аппаратов при отработке и производстве. М.: Машиностроение, 2009. 400 с.
8. Пагурова В.И. Таблицы неполной гамма-функции. М.: ВЦ АН СССР. 1963. 239 с.
9. РК-11. Положение о порядке создания и серийного производства ракетных и космических комплексов. М.: РОП, 2010. 382 с.
10. Рудаков В.Б., Макаров В.М. Оптимизация иерархического контроля технических параметров сложных изделий автоматических космических аппаратов при отработочных испытаниях // Двойные технологии. 2016. № 1. С. 9-12.
11. Сычев В.И., Храменков В.Н., Шкитин А.Д. Основы метрологии военной техники. М.: Воен. издат., 1993. 393 с.
12. Фридман И.Д. Способ вычисления вероятностей ошибок допускового контроля // Прил. к журн.: Измерительная техника. 1984. № 10. С. 3-12.
13. Шор Я.Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. М.: Сов. Радио, 1962. 551 с.

УДК 67.03

Новый композиционный материал как шихта для прямого восстановления железа

В.М. Баринков, аспирант I года обучения кафедры
«Материаловедения и технологии художественных изделий»,
В.Ю. Пиирайнен, доктор технических наук, профессор кафедры
«Материаловедения и технологии художественных изделий»,
Санкт Петербургский Горный университет, г. Санкт-Петербург

Работа посвящена проблеме «красных шламов», а именно разработке гибридной композиционной смеси – (шихты) на основе бокситового остатка и торфяного сырья для прямого восстановления железа. В настоящее время в мире накоплено более 4 млрд. тонн этих антропогенных отходов. Отсутствие экономически приемлемых методов переработки побочного продукта приводит к постоянному накоплению. Изучены преимущества и недостатки существующих методов переработки и утилизации красного шлама. Экспериментально обосновано применение гибридной композиционной смеси в качестве шихты для прямого восстановления железа, проведен подбор её оптимального состава.

Композиционный материал, красный шлам, извлечение металлов, переработка отходов, бокситовые остатки, оксиды железа.

New composite material as a charge for direct reduction of iron

V.M. Barinkov, Ph.D. student of the department «Material Science and Technology»,
V.Yu. Piirainen, doctor of Engineering Science, professor of the department
«Material Science and Technology»,
Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

The work is devoted to the problem of «red muds», namely the development of a hybrid composite mixture – (charge) based on bauxite residue and peat raw materials for direct reduction of iron. At present, more than 4 billion tonnes of these anthropogenic wastes have accumulated in the world. Lack of economically acceptable methods of by-product recycling leads to constant accumulation. Advantages and disadvantages of existing methods of recycling and disposal of red mud have been studied. The use of a hybrid composite mixture for direct reduction of iron was experimentally substantiated, the selection of the optimum charge composition was carried out.

Composite material, red mud, metal extraction, bauxite residue, iron oxides, waste recycling, aluminum production.

Введение. В условиях современности, наличие в государстве стратегических отраслей промышленности является фактором успешного развития и ста-

бильности. Россия, являясь сырьевой страной, во многом зависит от стабильной и эффективной работы отечественного минерально-сырьевого комплекса. Поэтому, решение существующих проблем данной отрасли имеет особую государственную важность и значение, а работы, связанные с модернизацией и реконструкцией действующих производств, являются неизменно актуальными.

Одной из таких является проблема красного шлама – техногенного отхода, получаемого при производстве глинозёма на предприятиях цветной металлургии. Речь идёт о его утилизации, хранении и использовании, так как на 1 тонну получаемого алюминия, на производстве образуется больше 2-х тонн красного шлама [1-2]. Щелочная активность этого отхода создает основные потенциальные угрозы для окружающей среды и человека, а также проблемы, связанные с применением этого материала без предварительной нейтрализации. В свою очередь, известные способы нейтрализации существенно повышают конечную стоимость продукта. В такой ситуации использовать красный шлам как материал в дальнейшем становится экономически не выгодно [3]. Но, несомненно, отход является ценным для извлечения из него редкоземельных элементов и таких металлов, как железо, алюминий, титан и др.

Одним из путей комплексного использования техногенных отходов, является создание композиционного материала, применяемого в качестве шихты для прямого восстановления железа, что является целью настоящей работы.

Снижение щелочности красного шлама достигается за счет создания двухкомпонентной гибридной композиции из красного шлама и торфа. Торф – порода повышенной кислотности, находящее применение как горючее полезное ископаемое [4]. Свойства торфа позволяют рассматривать его потенциальным деактиватором щелочности красного шлама, а содержание в торфе 50-60% углерода позволяет его рассматривать еще и как восстановитель железа в композиционном материале.

Алюминиевая промышленность напрямую связана с развитием современного общества. Сохраняется ежегодный рост объемов потребления алюминиевой продукции у нас в стране и за рубежом. В этой связи, прогнозировать снижение объемов производства первичного алюминия и, соответственно, его отходов в ближайшие десятилетия не приходится, что подтверждает актуальность обозначенной темы.

Материалы и методы. Был использован красный шлам Уральского алюминиевого завода (УАЗ), как источник железосодержащей составляющей гибридной композиции, и верховой торф Заозерского месторождения Ломоносовского района Ленинградской области (табл. 1,2) в роли углеродосодержащей составляющей. Исходная влажность верхового торфа составляла – 80,6%, а красного шлама – 30,4%. Состав красного шлама определялся с помощью рентгеноспектрального анализа и представлен в таблице 3. Стоит отметить, что на сегодняшний день УАЗ входит в АО «РУСАЛ» – одна из крупнейших в мире компаний по производству первичного алюминия и глинозема.

Таблица 1 – Торфяное месторождение Заозерское [составлено авторами]

Наименование торфяного месторождения, землепользователь, кем разрабатывалось, расположение	Тип залежи	Площадь в промграницах, га Площадь торфа м.с.р., га	Средняя глубина залежи, м	Балансовые запасы, тыс. т		Качественная характеристика		
				Всего	в т.ч. торф м.с.р.	R, %	A %	П, %
Заозерское, (ГЛФ) Разрабатывается ООО Террафлор. Остаток на 01.01. 2018 г. От г. Ломоносов на ЮЗ – 40 км, от ст. Копорье на ЮЗ – 6 км	В	496/416 450	3,81	2179 1216	1015	19	2,4	0,1

Таблица 2 – Состав торфа (элементы в % на горючую массу) [составлено авторами]

Тип торфа	Элемент	Состав торфа (в % на горючую массу)
		средние значения
Верховой	Сг	56
	Нг	5,9
	Ог	36,43
	Сг	0,19
	Нг	1,6

Таблица 3 – Элементный состав исходного красного шлама [составлено авторами]

Наименование продукции (№ проб)	Влажность (красный шлам), %	Определяемый компонент	Единицы Измерений	НД на методы испытаний	Результат испытаний	Приписанная характеристика погрешности, $\pm \Delta$
Красный Шлам	30,4%	Массовая доля влаги	%	МВИ 041	Более 10,0 (~30,2)	-
		Массовая доля компонентов в пересчете на сухое вещество				
		Массовая доля потери при прока-	%	МВИ 041	8,9	0,3

Наименование продукции (№ проб)	Влажность (красный шлам), %	Определяемый компонент	Единицы Измерений	НД на методы испытаний	Результат испытаний	Приписанная характеристика погрешности, $\pm \Delta$
		ливании		СТО 4767361 1-12-2011		
		Массовая доля оксида алюминия			14,0	0,6
		Массовая доля оксида железа (III)			42,3	0,6
		Массовая доля диоксида кремния			10,1	0,4
		Массовая доля диоксида титана			4,4	0,2
		Массовая доля оксида кальция			10,6	0,5
		Массовая доля оксида магния			0,9	0,1
		Массовая доля оксида марганца (II)			0,33	0,04
		Массовая доля оксида натрия			4,2	0,4
		Массовая доля оксида калия			0,27	0,07
		Массовая доля суммы оксидов натрия и калия, в пересчете на оксид натрия*			4,4	-

* – показатель расчетный: $\sum (Na_2O + K_2O), \% = Na_2O, \% + 0,66 * K_2O, \%$

Термическая обработка гибридной композиционной смеси проводилась с целью установления восстановительной способности торфа. Условия проведения – выдержка в муфельной печи в течение 1 и 3 часов при температурах 560 °С и 1000 °С. Полученный продукт перемалывался в порошок.

В ходе исследования был проведен рентгенофазовый анализ с использованием Rigaku SmartLab 3 в диапазоне углов 2θ 10-100° (CuK α излучение, Ni-фильтр, шаг 0,01°). Морфология и структура порошков была проанализирована с помощью Tescan Vega 3SBH. Изучение химического состава осуществлялось на микроанализаторе Aztec X-Act (Oxford Instruments).

3. Результаты и обсуждение.

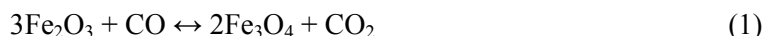
3.1. Теоретические исследования.

Мировые накопление красного шлама на сегодняшний день свыше 4

млрд. тонн. Отстойники, являющиеся временным решением проблемы «красный шламов», занимают территории до 100 га земли каждый и хранят в себе этот тонкодисперсный и высоковлажный отход [5]. Однако, в ходе увеличения объемов складированного красного шлама возрастает нагрузка на стенки шламохранилища, и опасность их разрушения. Подобные случаи имеют масштабные последствия, их нельзя игнорировать, поэтому работ по уменьшению количества складированного отхода и по его переработке с каждым годом становится все больше.

Утилизация красного шлама на предприятии может составлять 30-50% от общего объема стоимости работ [6]. Поскольку содержание железа в красном шламе велико, его извлечение непосредственно в цикле производства может существенно снизить общее количество выгружаемых отходов.

Количество Fe_2O_3 в красных шлаках может достигать до 50% состава, что позволяет его рассматривать в качестве исходного материала для восстановления железа [7]. Восстановительный процесс можно описать следующими уравнениями:



В работе [8] был рассмотрен метод низкоинтенсивной магнитной сепарации для отделения восстановленного железа. Показано, что выдерживая отход при температуре 1150 °С в течение 60 минут, можно повысить содержание железа в красном шламе с 32,87% до 65,93%. Установлено, что процент отделенного железа после магнитной сепарации может составить 61,85%.

В работе [9] было исследовано прямое восстановление гематита и магнетита до металлического железа с помощью водородной плазмы. Достигнутый процент восстановления составляет 98,23%. Известен еще один метод [10], который включает в себя получение «самовосстанавливающихся» окатышей, содержащих восстановитель (уголь, кокс), и обжига их при температурах выше 1400 °С. Однако, большие энергетические затраты, связанные с сушкой красного шлама на предварительных этапах и технологическая сложность этих методов являются существенным недостатком.

В качестве альтернативы, был рассмотрен гидрометаллургический метод [11]. Рассмотрен ряд работ, посвященных выщелачиванию отхода с целью получения железа из хвостов алюминиевого производства [12].

Результаты одного из исследований [13] показали возможность выщелачивать железо из промытого HCl красного шлама с использованием щавелевой кислоты. Процент полученного железа эксперимента составил 94,15%, а щавелевая кислота была регенерирована для её повторного использования.

В ходе анализа вышеприведенных работ предпочтение отдано гидрометаллургическим методам. Процесс выщелачивания железа гидрометаллургическими методами, не смотря на перспективу извлечения других ценных минералов, является более сложным и влечёт за собой необходимость многостадийной эффективной очистки выщелачивающего раствора от побочных продуктов и

вредных примесей [14]. Недостатками пирометаллургических методов, которые необходимо устранять в новых исследованиях, являются: низкая производительность процесса плавки; большие тепло и энергозатраты; необходимость проведения сушки «красного шлама» (влажность не более 10%) [15].

Разработка методики дальнейших исследований проводилась с учетом преимуществ и недостатков рассмотренных методов.

3.2. Экспериментальные исследования.

В ходе работы по восстановлению железа было подготовлено несколько образцов композиционной смеси с разным отношением компонентов.

Красный шлам в сухом виде добавлялся к торфу, влажность которого составляла больше 80%. Однородное пастообразное состояние гибридной смеси было получено благодаря размолу и перемешиванию. Наличие Fe_2O_3 придает полученной смеси ярко-коричневый оттенок. Далее формировались образцы и подвергались естественной сушке на протяжении 48 часов (рис.1, 2). Образцы были подготовлены в нескольких конфигурациях для проведения параллельных исследований. В представленном исследовании работа проводилась с образцами в виде гранул (окатышей) диаметром 10мм. После отвердевания, была проведена термическая обработка полученного материала при различных режимах. В таблице 4 представлены соотношения масс исходных материалов и режимов термической обработки опытных образцов.



(1)



(2)

Рисунки 1, 2 – Естественная сушка композиционного материала

**Таблица 4 – Соотношение масс компонентов и режимы термообработки
[составлено авторами]**

Образец, №	Торф, грамм	КШ, грамм	Соотношение по массе	Режим обработки
1	120	40	3:1	1000 °С – 1 час
2	110	110	1:1	1000 °С – 1 час
3	75	15	5:1	700 °С – 1 час
4	360	132	3:1	560 °С – 1 час

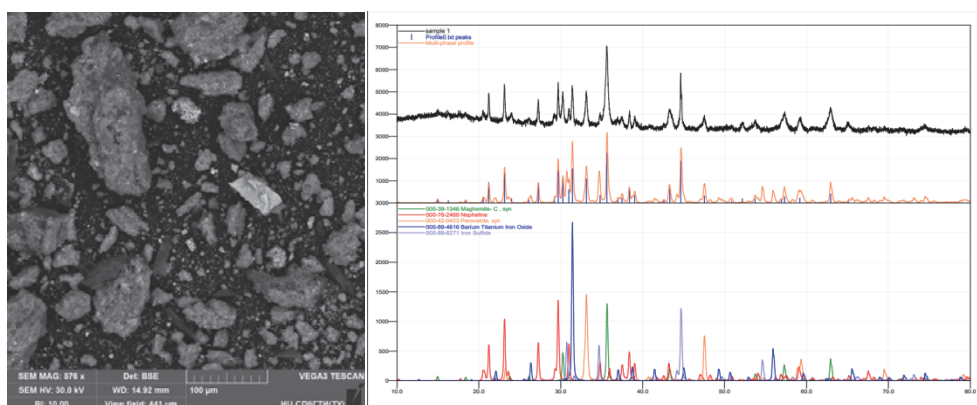
После воздействия термической обработкой на образцы, спеченные гранулы дробились до состояния порошка и анализировались. Во всех случаях был получен магнитный порошок. Результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты после проведения термообработки

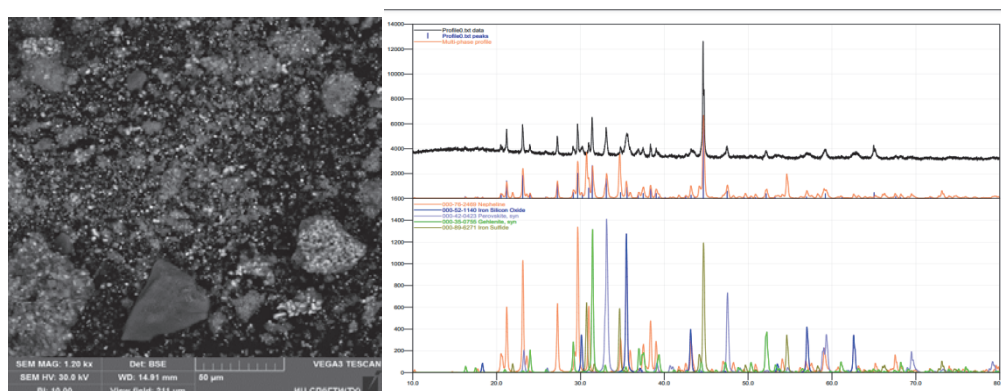
Образец, №	Режим обработки	Результат
1	1000 °С в течение 1 часа	pH=7,0 Получен черный порошок, 100% магнитный.
2	1000 °С в течение 1 часа	pH=7,7 Получен черный порошок, 100% магнитный.
3	700 °С в течение 1 часа	pH=5,0
4	560 °С в течение 1 часа	pH=7.0 Получен черный порошок, 100% магнитный.

Впоследствии был проведен рентгенофазовый анализ порошков, микро-рентгеноспектральный анализ химического состава и анализ структуры и морфологии порошков.

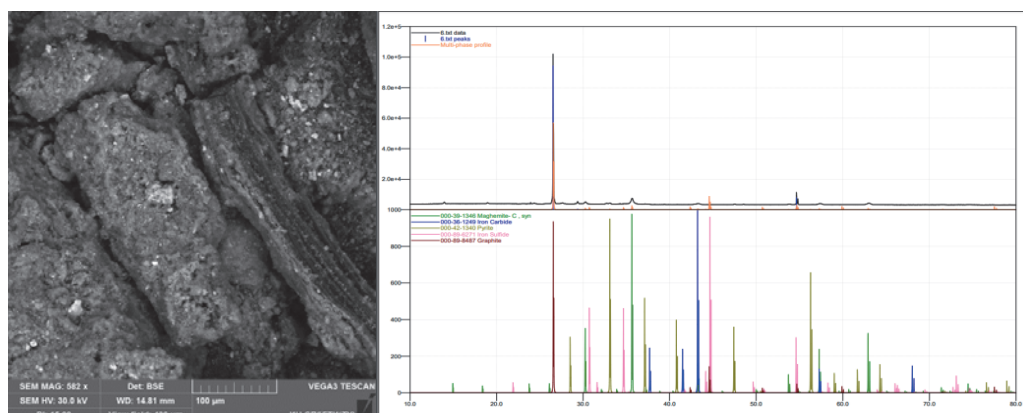
Ниже, на рисунках 3-4 (образец 1), 5-6 (образец 2), 7-8 (образец 3), 9-10 (образец 4), представлены результаты проведенного анализа.



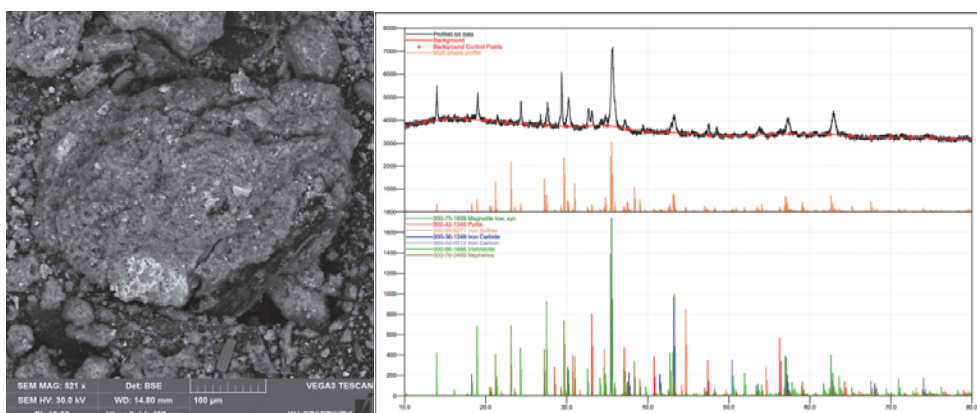
Рисунки 3, 4 – Структура, анализ фаз и состава образца № 1



Рисунки 5, 6 – Структура, анализ фаз и состава образца № 2



Рисунки 7, 8 – Структура, анализ фаз и состава образца № 3



Рисунки 9, 10 – Структура, анализ фаз и состава образца № 4

Полученные данные позволяют судить о том, что:

1) На снимках светлые частицы – соединения железа, в том числе карбиды железа.

2) Анализ спектрограмм показывает, что содержание железа меняется следующим образом:

- Опыт № 1, спектр 1, железа – 63,74 масс%;
- Опыт № 2, спектр 21, железа – 68,58 масс%;
- Опыт № 3, спектр 34, железа – 93,23 масс% в виде γ -Fe₂O₃ и мартенсита;
- Опыт №4, спектр 39, железа – 92,70 масс% в виде магнетита и мартенсита.

3) Многие частицы железа вплавлены в оксиды и не дают возможности определить их количество на поверхности.

4) Необходимо в дальнейшем проводить более тонкое измельчение.

5) Полученные предварительные результаты экспериментов позволяют судить о перспективности проведения дальнейших исследований в этом направлении.

Закключение. Поиск новых подходов к обработке техногенных продуктов является одним из ключевых направлений в металлургической промышленности. Используемый сейчас метод складирования красного шлама изживает себя с каждым годом. Известные на сегодняшний день способы извлечения железа из красного шлама остаются недостаточно проработанными и обоснованными с экономической точки зрения, чтобы массово использоваться на предприятиях. Поэтому разработка композиционной смеси на основе красного шлама и торфа является многообещающей для металлургических предприятий и может решить задачу нейтрализации отхода с последующим получением вторичного сырья из красного шлама. В рамках исследования в дальнейшем планируется подобрать оптимальный состав и термообработку для получения концентрированных железосодержащих окатышей – сырья для производства стали и чугуна.

Литература

1. Баринкова А.А., Пиирайнен В.Ю. Гибридный композиционный материал на основе нейтрализованного красного шлама // Информационно-технологический вестник. 2022. № 1(31). С. 170-181.
2. Piirainen V.Yu., Barinkova A.A., Starovoytov V.N. and Barinkov V.M. «Deactivation of Red Mud by Primary Aluminum Production Wastes». Materials Science Forum 1040 (July 27, 2021): P. 109-16.
3. Khalifa, Abdurrahman Abuabdalla, Vladimir Bazhin, Mohamed El-Menshawi Hussein Shalabi, Atif Abdelmoneim and Mamdouh Omran. «Improving the efficiency of the carbothermal reduction of red mud by microwave treatment». Proceedings of Irkutsk State Technical University (2021): n. Pag., doi:10.21285/1814-3520-2021-2-264-279.
4. Михайлов А.В., Федоров А.С. Анализ параметров мундштука шнекового пресса для 3D-экструзии торфяных кусков трубчатого типа // Записки Горного института. 2021. Т. 249. № 3. С. 351-365. doi 10.31897/pmi.2021.3.4.
5. Eldeeb A.B., Vyacheslav Nikolayevich Brichkin, R.V. Kurtenkov and I.S. Bormotov. «Extraction of alumina from kaolin by a combination of pyro- and hydro-metallurgical processes». Applied Clay Science (2019): n. Pag.
6. Paramguru R. Trends in red mud utilization – A review // Min. Process. Extract. Metall. Rev. 2005. Vol. 26. № 1. P.1-29.
7. Anameric B., Kawatra S.K., Properties and features of direct reduced iron. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 28(1) (2007). 9-116.
8. Sadangi J.K., Das S.P., Tripathy A. & Biswal S.K., Investigation into recovery of iron values from red mud dumps, Separation Science and Technology, 53 (14) (2018) 2186-2191.
9. Tripathy A., Bagchi S., Chaudhry S., Sadangi J.K., Das S.P., Biswal S.K., Red mud: avaluable source for iron recovery. Journal of Sustainable Planet, 8(1) (2017) 38-44.
10. Zhang R., Zheng S., Ma S., Zhang Y., Recovery of alumina and alkali in Bayer red mud by the formation of andradite-grossularhydrogarnet in hydrothermal process. Journal of Hazardous Materials, 189 (2011) 827-835.
11. Зиновьев Д.В., Грудинский В. Г., Дюбанов Л.В., Коваленко Л.В., Леонтьев Л.И. Обзор мировой практики переработки красных шламов. Часть 1. Пирометаллургические способы // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Том 61. № 11. С. 843-858.
12. Трушко В.Л., Утков В.А, Бажин В.Ю. Актуальность и возможности полной переработки красных шламов глиноземного производства // Записки Горного университета. Санкт-Петербург. 2017. Т. 227. С. 547-553.
13. Wei Dingyi, Xia Junhui, Peng Yang, Shen Si-Yue and Chen Tao. Iron Extraction from Red Mud using Roasting with Sodium Salt. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 42 (2019) 153-161.
14. Utkov V.A., Sizyakov V.M., Current issues in metallurgical processing of red mud, Journal of Mining Institute 202 (2013). 39-43.
15. Brichkin, Vyacheslav, Kurtenkov, Roman. (2015) Dealkylation of alumina production red mud on the basis of hydro chemical processing. Vol. 40, pp. 189-194.

УДК 629.735.33

Контроль качества лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей

Н.Г. Серёгин, кандидат технических наук,
доцент кафедры управления качеством и стандартизации,

И.А. Сигутин, студент,

Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области

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

Рассмотрены основные методы неразрушающего контроля и их особенности, применяемые в производстве и эксплуатации лопаток газотурбинных двигателей. Предложено применение конфокальной лазерной сканирующей микроскопии в качестве метода неразрушающего контроля лопаток газотурбинных двигателей.

Газотурбинный авиационный двигатель, лопатка турбины, неразрушающий контроль, конфокальная лазерная сканирующая микроскопия.

Quality control of turbines of aviation gas turbine engines

N.G. Seregin, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Quality Management and Standardization,
I.A. Sigutin, student,

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

The main methods of non -destructive control and their features used in the production and operation of the shoulder blades of gas turbine engines are considered. The use of confocal laser scanning microscopy as a method of non - destructive control of the shoulder blades of gas turbine engines is proposed.

Gas turbine aircraft engine, turbine blade, non-destructive testing.

Предмет исследования

Наиболее дорогостоящими и важными деталями газотурбинных двигателей (ГТД) являются лопатки турбин. В современных ГТД применяются лопатки из жаропрочных материалов, при эксплуатации подвергающиеся интенсивным нагрузкам, что приводит к неисправности двигателей. Неисправности ГТД, которые сопровождаются повышением температуры газов в турбине, приводят к перегреву лопаток, который подразумевает под собой нагрев материала детали до температуры, превышающей максимально допустимую температуру нагрева для

данного сплава. Надежность лопаток турбин определяет ресурс ГТД, а, следовательно, летно-технические и эксплуатационные характеристики летательных аппаратов, а также безопасность полетов. Поэтому так необходимо проверять лопатки ГТД на наличие различных дефектов в конструкции и материале деталей, которые могут в себя включать расслоения, дефекты применяемых материалов, воздушные раковины и так далее. При проверке лопаток ГТД задействуют различные методы разрушающего и неразрушающего контроля качества изделий, главной задачей которых является выявление дефектов на ранней стадии их развития, что может привести к разрушению как частично, так и полностью. К неразрушающим методам контроля относятся: магнитные, акустические, визуально-оптические, тепловые, токовихревые, капиллярные, радиационные и другие методы.

Так как ГТД обладают значительной длительностью межремонтного цикла, то возникают дополнительные требования к эффективности их неразрушающего контроля [1, 2].

Целью данной работы является выбор методов неразрушающего контроля при проверке поверхностей лопаток газотурбинных двигателей, а также рассмотрение перспективы внедрения визуально-оптических методов неразрушающего контроля на примере конфокальной микроскопии, и разработка рекомендаций по их применению.

Методы исследования

Эхо-импульсным методом формируют импульс ультразвуковых волн, а затем регистрируют эхо-сигнал, отражаемый от дефектов [3]. На рисунке 1 представлена схема применения эхо-импульсного метода.

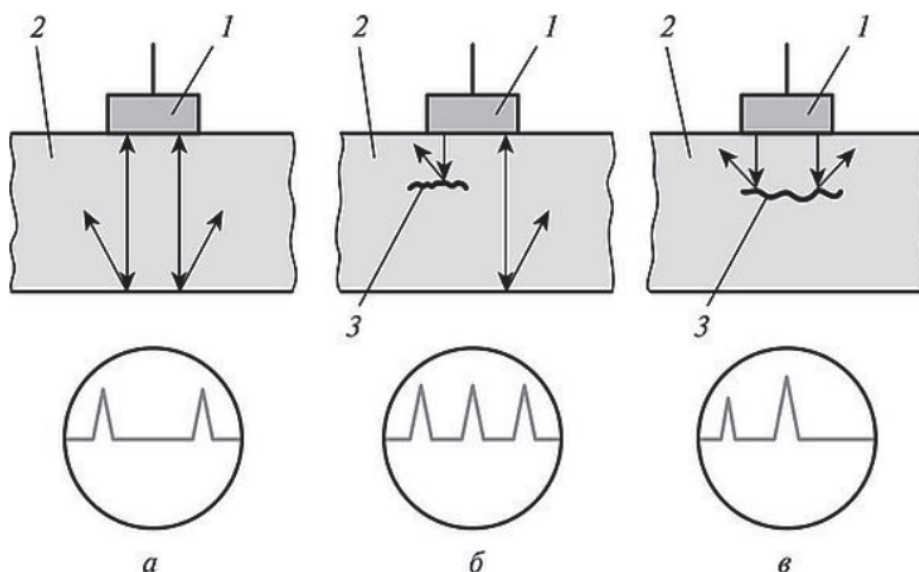


Рисунок 1 – Схема применения эхо-импульсного метода

Импульс проходит через деталь 2 и отражается от противоположной сто-

роны, а затем возвращается к излучателю. Возвращённый сигнал регистрирует прибором (рис. 1, а). Если дефект 3 не в полном объёме перекрывает импульс, тогда на экране возникнет дополнительный сигнал (рис. 1, б). При блокировании импульса полно объёмным дефектом на приборе импульс не отражается (рис. 1, в). Размеры дефекта прямо пропорциональны величине и глубине залегания сигнала.

Достоинства и недостатки эхо-импульсного метода приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Эхо-импульсный метод

Эхо-импульсный метод	
Достоинства метода	Недостаток метода
Возможность настройки ультразвукового луча	Высокая стоимость преобразователей
Точное определение координат дефектного места	
Определение вида дефекта	
Универсальность преобразователей	
Возможность контроля объектов с геометрически сложными формами	

Резонансным методом производят неразрушающий контроль в многослойных конструкциях [4]. Изображение схемы контроля резонансным методом представлена на рисунке 2, где 1 – преобразователь, 2 – дефект.

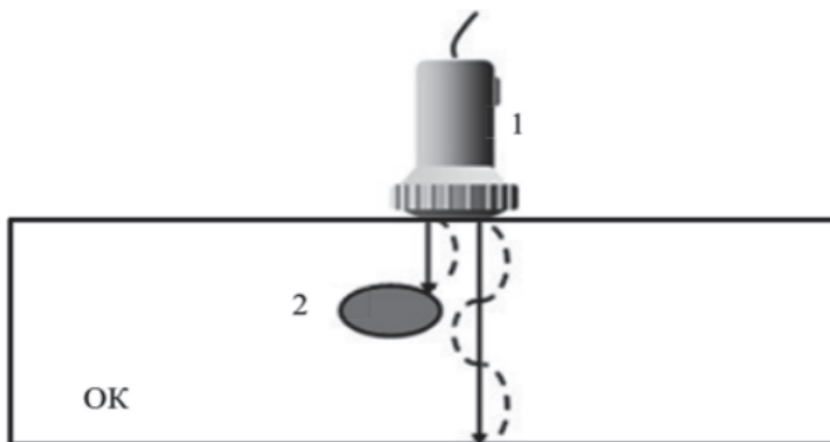


Рисунок 2 – Схема контроля резонансным методом

Достоинства и недостатки резонансного метода приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Резонансный метод

Резонансный метод	
Достоинства метода	Недостаток метода
Определяют наличие дефектов и толщину объекта контроля	Высокая сложность контроля криволинейных изделий
Определяют глубину расположения дефекта	

Методом свободных колебаний (МСК) в течение непродолжительного времени, воздействуя на изделие, генерируют импульсы затухающих колебаний.

Иллюстрация МСК, в которой 1 – генератор; 2 – вибратор; 3 – приемник; 4 – анализатор спектра; 5 – индикатор, приведена на рисунке 3.

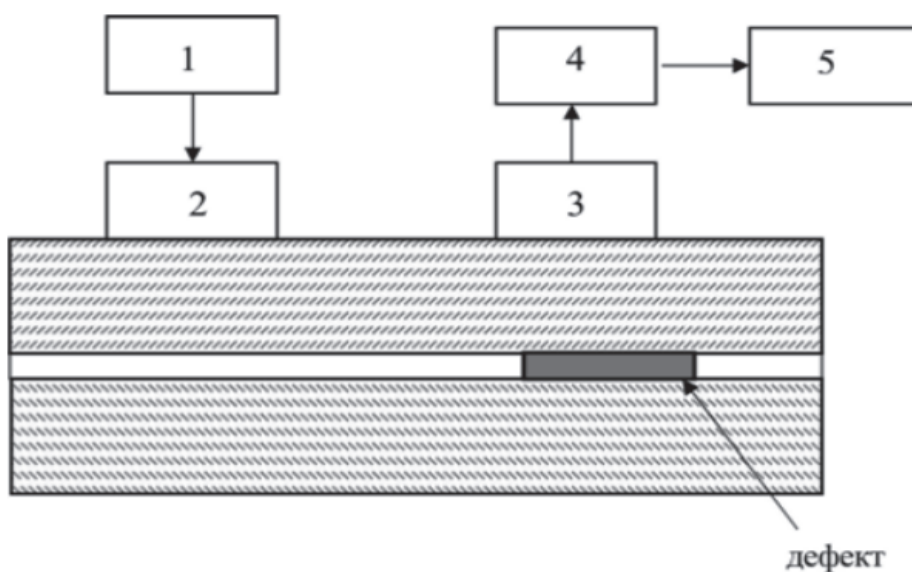


Рисунок 3 – Схема контроля методом свободных колебаний

Спектральный состав акустического сигнала по МСК, где изделие с дефектом – 1 и без дефекта – 2 рассмотрено на рисунке 4.

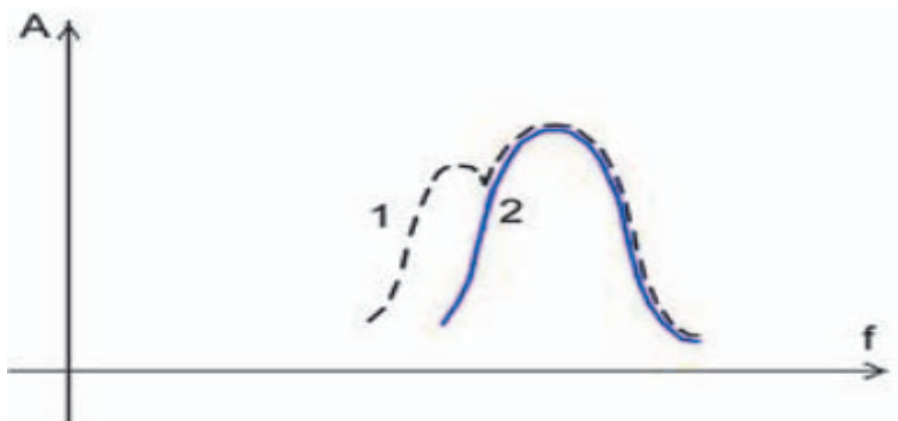


Рисунок 4 – Спектральный состав акустического сигнала при использовании метода свободных колебаний

Достоинства МСК приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Достоинства МСК

Достоинства МСК
Неразрушающий контроль деталей из материалов, обладающих с малым модулем Юнга
Значительные коэффициенты затухания вибраций
Поиск дефектов в глубине деталей

Реверберационно-сквозным ультразвуковым методом на определённом расстоянии друг от друга на объекте контроля фиксируют передающий и приемный преобразователи [5].

Схема неразрушающего контроля внутренних дефектов для изделий без дефекта (а) и с дефектом (б) реверберационно-сквозным ультразвуковым методом приведена на рисунке 5.

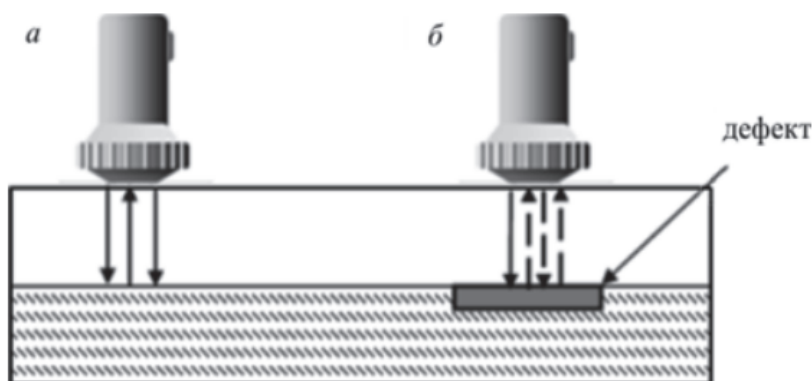


Рисунок 5 – Схема неразрушающего контроля внутренних дефектов для изделий без дефекта (а) и с дефектом (б) реверберационно-сквозным ультразвуковым методом

Рассмотрим процесс вывода изображений на экране дефектоскопа, работающего реверберационно-сквозным ультразвуковым методом (рис. 6), где *a* – отсутствие дефекта; *б* – наличие дефекта; t_2 – время реверберации.

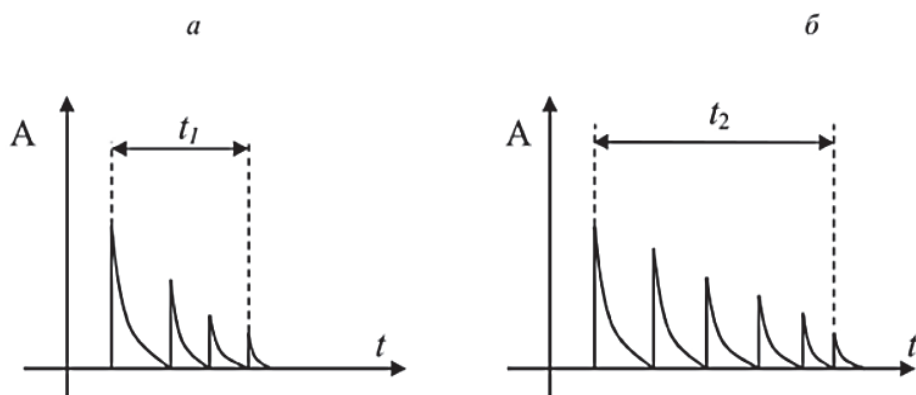


Рисунок 6 – Вид экрана дефектоскопа при контроле реверберационно-сквозным ультразвуковым методом

Импедансным методом ультразвукового контроля производят анализ изменения входного импеданса поверхности объекта контроля, с которым взаимодействует преобразователь [6]. Метод наиболее эффективен при контроле качества сотовых клеёных конструкций, с целью определения наличия непроклеев и расслоений. Преобразователи, применяемые при оценке качества изделий, могут быть выполнены совмещенными (рис. 7, а) и раздельно-совмещенными (рис 7, б).

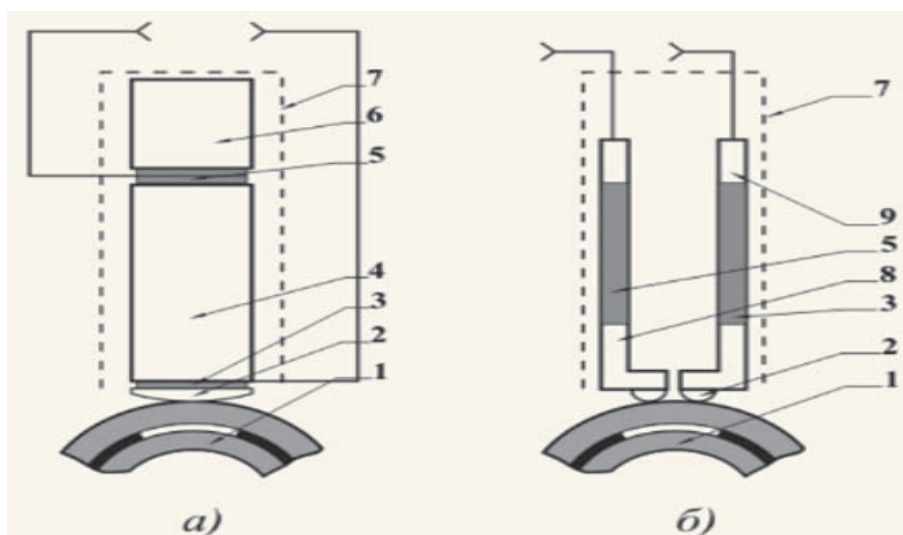


Рисунок 7 – преобразователи импедансного дефектоскопа: 1 - контролируемый объект; 2 – контактный наконечник пьезоэлементов; 6 – тыльная масса; 7 – корпус преобразователя; 8 – излучающий вибратор; 9 – приемный вибратор.

Достоинства и недостатки импедансного метода ультразвукового контроля приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Импедансный метод ультразвукового контроля

Импедансный метод ультразвукового контроля	
Достоинство метода	Недостаток метода
Высокая чувствительность	Относительно малая глубина залегания выявляемых дефектов

Методом акустико-эмиссионного контроля наиболее эффективно выявляют наличие трещин в деталях изделий [7] (рис. 8).

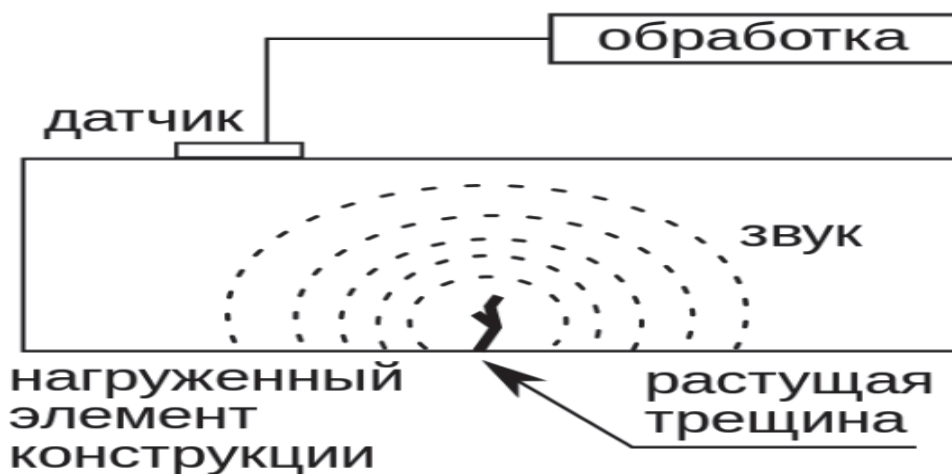


Рисунок 8 – Принцип диагностики трещин при помощи акустической эмиссии

Однако, при всех достоинствах ранее перечисленных методов неразрушающего контроля изделий машиностроения, для решения задач контроля качества лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей наиболее оптимальным может служить метод конфокальной лазерной сканирующей микроскопии (МКЛСМ) [8, 9,10].

При выполнении неразрушающего контроля изделий машиностроения МКЛСМ применяют одновременно два источника тока: источник белого света в оптическом режиме и лазер в режиме лазерного сканирующего конфокального микроскопа.

Конфокальный микроскоп позволяет создать трехмерное изображение за счёт послойного сканирования деталей по глубине.

Представленные ниже рисунки 9, 10 и 11 наглядно демонстрируют широкие возможности и перспективу конфокальной микроскопии.

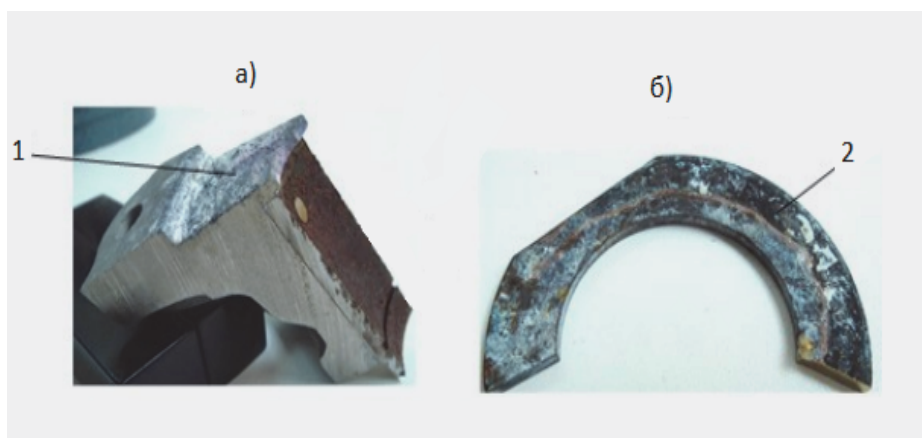


Рисунок 9 – Внешний вид детали «а» и «б» в зонах 1 и 2

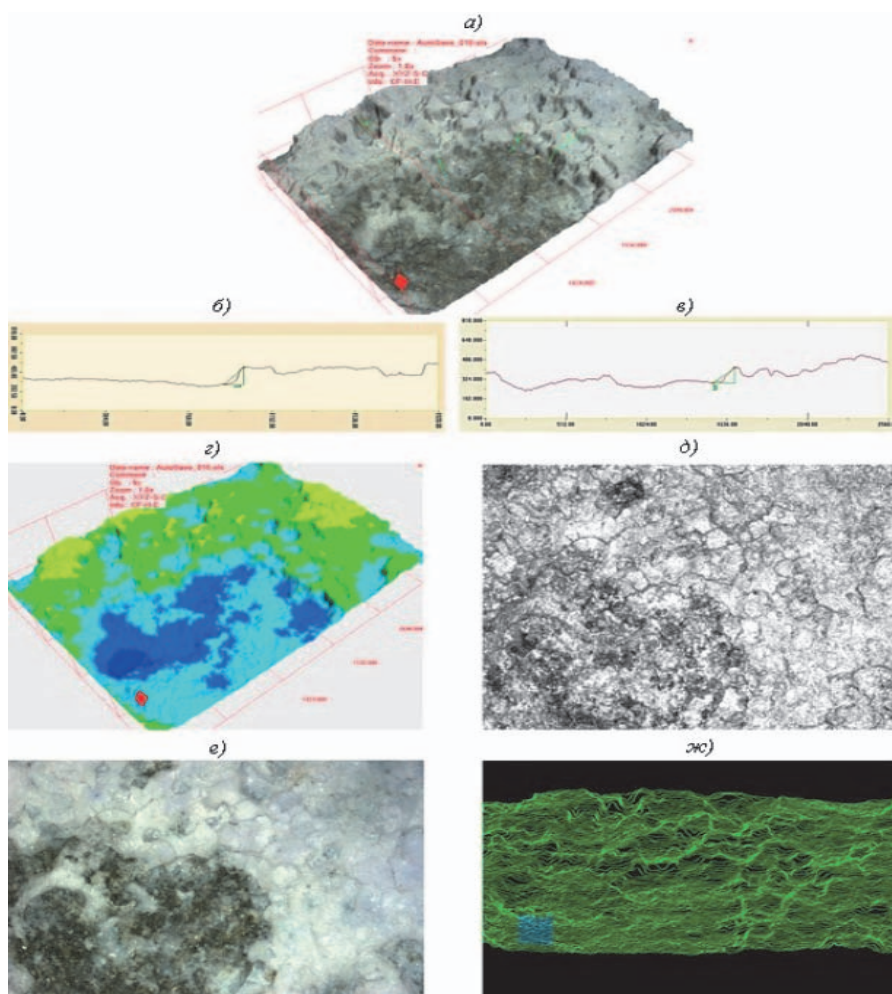


Рисунок 10 – Поверхность детали «а» в зоне 1 при разрешении x50

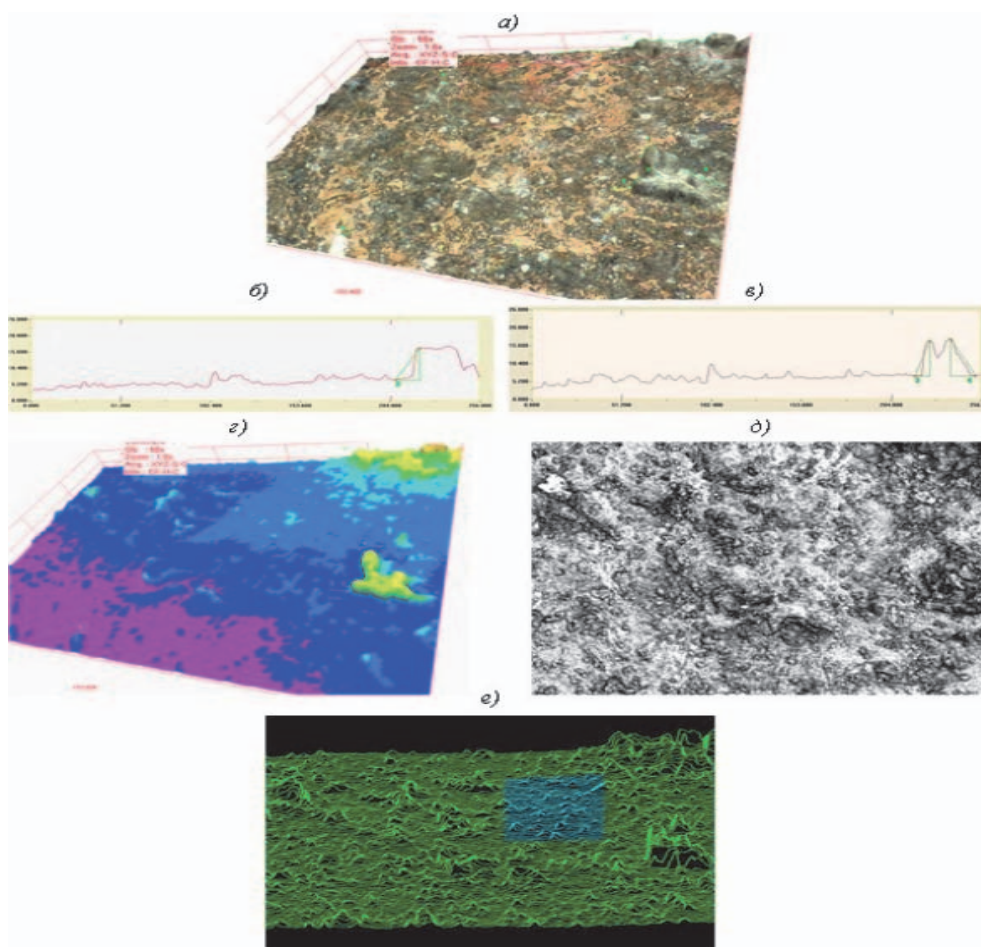


Рисунок 11 – Поверхность детали «б» в зоне 2 при разрешении x500

Кроме того, МКЛСМ позволяет исследовать структуру и определять шероховатость поверхности различных деталей.

Результаты исследования

На основании рассмотренных данных по методам неразрушающего контроля, для контроля качества лопаток ГТД предлагается применять МКЛСМ, так как данный метод обладает следующими преимуществами:

- высокая разрешающая способность;
- возможность построения 3D изображения объекта контроля путем сканирования каждой точки объекта;
- возможность проводить исследования с объектами сложной формы;
- возможность определять шероховатость поверхности объекта;
- хорошая контрастность изображения.
- цифровая обработка полученных данных в результате исследования.

Однако, несмотря на все преимущества метода неразрушающего контро-

ля с применением МКЛСМ, данный метод не может выступать в качестве единственного метода неразрушающего контроля лопаток ГТД. Методы неразрушающего контроля должны применяться комплексно, совместно, чтобы обеспечить наивысшее качество изделий и предупредить будущее разрушение детали. МКЛСМ может дополнять методы контроля, направленные на выявление дефектов внутри самого изделия. Идеальным дополнением метода МКЛМС могут выступать резонансный и эхо-импульсный методы, так как МКЛМС не способен обнаружить дефекты в теле детали. При комбинировании данных методов возможно существенно улучшить неразрушающий контроль лопаток турбин ГТД, а, следовательно, и продлить ресурс работы лопаток газотурбинных двигателей, что, в свою очередь, позволит продлить ресурс работы и самого газотурбинного двигателя.

Литература

1. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие. СПб.: Профессия, 2008. 560 с.: ил.
2. Алёшин Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений: учебное пособие. Издание 2-е, переработанное и доп. М.: Машиностроение, 2013. 576 с.: ил.
3. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. Издание 2-е, переработанное и доп. СПб.: Издательство «СВЕН», 2007. 296 с.
4. Мурашов В.В. Неразрушающий контроль клеевых соединений. Клеи. Герметики. Технологии, 2008. № 7. С. 21-28.
5. Генералов А.С., Бойчук А.С., Мурашов В. В. Контроль прочности углепластиков на клеевых препрегах ультразвуковым методом. Клеи. Герметики. Технологии, 2012. № 5.
6. Бойцов Б.В., Васильев С.Л., Громашев А.Г., Юрсенсон С.А. Методы неразрушающего контроля, применяемые для конструкций из ПКМ. Электронный журнал «Труды МАИ». 2011. Выпуск № 49.
7. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т. Под общ. ред. Клюева В.В. т.3: Ультразвуковой контроль: издание 2-е, испр. М.: Машиностроение, 2006. 864 с.
8. Исходжанова И.В. Применение конфокальной лазерной сканирующей микроскопии для решения материаловедческих задач / В сб. материалов VII Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур». М.: МИС и С, 2014. С. 138.
9. Чабина Е.Б., Алексеев А.А., Филонова Е.В., Лукина Е.А. Применение методов аналитической микроскопии и рентгеноструктурного анализа для исследования структурно-фазового состояния материалов // Труды ВИАМ. 2013. № 5. Ст. 06 (viam-works.ru).
10. Клевцов Г.В., Мерсон Е.Д. О возможности использования конфокального лазерного сканирующего микроскопа для исследования микрорельефа поверхности разрушения металлических материалов // Фундаментальные исследования. 2012. № 11. С. 1185-1189.

УДК 621.793.74:62-408.64

**Аппроксимация профиля сечения пятна напыления
при газотермическом нанесении порошкового покрытия**

М.Е. Соловьев, доктор физико-математических наук,
профессор кафедры Информационные системы и технологии,
Институт цифровых систем Ярославского государственного
технического университета, г. Ярославль,

С.С. Кокарев, кандидат физико-математических наук, директор,
Региональный научно-образовательный центр «Логос», г. Ярославль,

С.Л. Балдаев, кандидат технических наук,
заместитель генерального директора по технологиям,

Л.Х. Балдаев, доктор технических наук, генеральный директор,

В.И. Мищенко, заместитель генерального директора по качеству,

М.О. Федорова, начальник отдела,

ООО «Технологические системы защитных покрытий», г. Москва, г. Щербинка

Предложена физически обоснованная универсальная методика построения аппроксимирующих функций профиля сечения пятна напыления при газотермическом и лазерном нанесении порошковых покрытий. Использование предлагаемых функций позволяет существенно расширить класс аппроксимируемых профилей покрытий, что, в свою очередь, обеспечит возможность увеличения точности геометрии профиля сечения детали и экономию материала покрытия.

Газотермическое напыление, профиль сечения, моделирование.

**Approximation of the profile of the section of the spray spot during gas
thermal deposition of powder coating**

M.E. 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,

S.S. Kokarev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Director of the Logos Regional Scientific and Educational Center, Yaroslavl,

S.L. Baldaev, Candidate of Technical Sciences,
Deputy General Director for Technologies,

L.Kh. Baldaev, Doctor of Technical Sciences, General Director,

V.I. Mishchenko, Deputy General Director for Quality,

M.O. Fedorova, head of department of Technological Systems
of Protective Coatings LLC, Moscow, Shcherbinka

A physically substantiated universal method for constructing approximating functions of the spray spot cross-sectional profile in gas-thermal and laser deposition

of powder coatings is proposed. The use of the proposed functions makes it possible to significantly expand the class of approximated coating profiles, which, in turn, will provide an opportunity to increase the accuracy of the geometry of the part section profile and save the coating material.

Thermal spraying, section profile, modeling.

Введение

Технология газотермического нанесения порошковых покрытий широко применяется для создания на поверхности деталей и оборудования функциональных покрытий, обладающих повышенной износостойкостью, коррозионной стойкостью, теплостойкостью и другими специальными свойствами [1-5]. Суть данной технологии состоит в нанесении на поверхность изделия дисперсного материала высокотемпературным газовым потоком, создаваемым при помощи газофакельной или плазменной свечи. Похожим образом покрытие наносится методом порошковой лазерной наплавки [6-8]. К числу общепризнанных достоинств данных технологий относятся: широкий набор составов покрытий (от простых элементов до многокомпонентных сплавов и керамик), их функциональных возможностей, удобства контроля параметров процесса, позволяющие управлять качеством получаемого покрытия и ряд других преимуществ.

В отличие от плазменного напыления из газовой фазы [9], в этих технологиях на поверхность детали наносятся частицы не атомно-молекулярных, а микроскопических размеров. В этой связи характерной особенностью технологий газотермического и лазерного напыления является то, что первичным актом создания покрытия является образование на поверхности детали характерного бугорка [10,11], образующегося из наплавляемых частиц, который далее в результате движения головки распылителя трансформируется в валик [12,13]. При повторных проходах головки отдельные валики накладываются друг на друга, в результате чего формируется поверхность покрытия [14,15]. Форма поперечного сечения пятна напыления, то есть первичного валика, имеет важное значение, поскольку на ее основе формируется окончательный профиль поверхности покрытия, и свойства покрытия также зависят от взаимодействия материала в смежных слоях.

В большинстве работ профиль сечения пятна напыления аппроксимируют достаточно простыми функциями [11,12,14], такими как парабола, дуга окружности или эллипса, хотя на практике форма профиля может быть более сложной [10, 16]. Кроме того, в процессе формирования первичного пятна напыления характер его профиля изменяется, так что описать данный процесс только изменением параметров одной функции, например, параболы, не удастся, и для описания динамики формирования покрытия необходимо использовать несколько функций. При моделировании процесса формирования покрытия численными методами гидродинамики профиль пятна контакта формируется непосредственно в процессе моделирования [13, 17,18]. Вместе с тем, в этом случае также полезно иметь простую и универсальную аппроксимирующую функцию профиля для сравнения результатов численного моделирования с экспериментальными дан-

ными, а также в тех случаях, когда собственно задача динамики частиц не решается, а решается задача теплопереноса [19] или моделируется процесс формирования покрытия конкретного изделия [20-22]. С помощью аппроксимирующих функций строится профиль поверхности готового покрытия [23] путем наложения данных функций со смещением. При этом вид аппроксимирующей функции оказывает влияние на точность моделирования поверхности покрытия. Выбор конкретной функции при этом оказывается неоднозначным.

В связи с изложенным целью настоящей работы явилось создание физически обоснованной методики построения аппроксимирующей функции профиля сечения пятна напыления.

С научно-исследовательской точки зрения технологии газотермического напыления представляют собой многосоставный комплекс физико-химических процессов, нетривиально зависящих от контролируемых параметров процесса, частично контролируемых или неконтролируемых параметров внешней среды и еще более нетривиально влияющих друг на друга. В связи с этим более-менее реалистичные модели данных технологических процессов сводятся к решению задач, стоящих на стыке гидродинамики плазмы и увлекаемой ею частиц, физики тепло- и массопереноса, физической кинетики, химической физики, теории упругости и, возможно, квантовой теории конденсированного состояния, необходимой для описания более тонких или фундаментальных свойств получаемых покрытий. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными исследованиями физических свойств покрытий и их геометрии на микрофотографиях позволяет очертить область применимости той или иной модели, и одновременно констатировать отсутствие общей модели с универсальной (хотя бы в рамках одного метода) областью применимости.

Для решения сформулированной выше задачи с наиболее общих позиций, в значительной мере свободных от деталей конкретных моделей, целесообразно основываться на соображениях размерностей и теории подобия [24-26], которые:

1. опираются на самые общие теоретические основы процессов без конкретизации их детальными механизмов;
2. позволяют записать искомые соотношения в самом общем виде, удобном для их экспериментального исследования и конкретизации;
3. позволяют оперативно и эффективно уточнять картину за счет введения дополнительных безразмерных параметров (критериев подобия), отвечающих за те или иные свойства процесса или его результата;
4. дают возможность построения очень точных и удобных для практического использования полуэмпирических зависимостей, связывающих непосредственно контролируемые параметры процесса и важные для эксплуатации параметры покрытия.

Результаты и их обсуждение

1. Вывод аппроксимирующих формул на основе теории подобия и размерностей

Геометрию профиля сечения пятна напыления – характерной дорожки, получаемой в процессе равномерного движения работающей плазменной свечи, наносящей порошковый материал покрытия на подложку, принято описывать за-

висимостями и их частными параметрами, характеризующими стандартное поперечное сечение дорожки [10-12,14,16]. Схема профиля сечения дорожки показана на рисунке 1.

Основными зависимостями, характеризующими геометрию покрытия, является пара функций f_+ и f_- , которые мы в дальнейшем будем называть, соответственно, *верхним* и *нижним* профилями. В выбранной на рисунке 1 системе координат, отражающей симметрию дорожки относительно вертикальной срединной плоскости, зависимости $f_{\pm}$ являются четными функциями поперечной координаты x , имеющие экстремумы в точке $x = 0$ (точка максимума для f_+ и минимума для f_-). Указанные зависимости содержат максимально полную геометрическую информацию, однако их точное вычисление в рамках конкретной физической модели затруднительно ввиду большого количества различных факторов, их определяющих. По этой причине, как отмечено выше, авторы теоретических исследований, как правило, ограничиваются разумной аппроксимацией – дугами параболы, окружности, эллипса или косинуса, надлежащим образом нормированных по аргументу и значениям. Для подобного рода аппроксимаций, а также для сравнения полуэмпирических зависимостей с простыми аппроксиматорами целесообразно выделить в $f_{\pm}$ самые важные числовые параметры, характеризующие поперечный профиль лишь в целом. К их числу следует отнести: *высоту* $h_+ \equiv f_+(0)$ и *глубину* $h_- \equiv f_-(0)$, *ширину* $d' \equiv |f_+^{-1}(0) - f_-^{-1}(0)|$, а также *верхний* и *нижний краевые углы* $\theta_{\pm} = \pm \arctg(f'_{\pm}(d'/2))$.

Для вывода общих соотношений методом теории размерностей, прежде всего, необходимо выделить характерные размерные комбинации, отражающие самые общие и грубые черты процесса. Для этой цели запишем функцию f_+ в виде:

$$f_+ = H\mathcal{F}_+(\xi, A), \quad (1)$$

где H – параметр, имеющий размерность длины и порядок величины H_+ , $\mathcal{F}_+$ – подлежащая определению безразмерная функция безразмерной переменной $\xi = 2x/d'$ и независимого набора $A = \{a_1, \dots, a_k\}$ безразмерных параметров, которые можно составить из регулируемых параметров процесса и которые влияют на верхний профиль f_+ . Выражение (1) является общей формулой верхнего профиля, согласующегося с общей – теоремой теории размерностей [25].

Для установления размерной структуры множителя H в (1) рассмотрим следующую упрощенную модель работы плазменной свечи. Пусть расход порошка характеризуется параметром расхода μ кг/с и пусть порошок кладется равномерно по сечению сопла (на самом деле это не так, но для вывода размерной структуры множителя H это не важно). Тогда за время t работы свечи, движущейся равномерно со скоростью v , она положит μt кг материала, который расположится в виде протяженного в горизонтальном направлении параллелепипеда объемом $V = vt \cdot H \cdot d$, где H – его высота, d – его ширина, совпадающая с диаметром сопла свечи. Приравнявая:

$\rho vt Hd = \mu t$ найдем:

$$H = \frac{\mu}{\rho vd}. \quad (2)$$

Подставляя теперь (1) в (2), получим

$$f_+ = \frac{\mu}{\rho v d} \cdot \mathcal{F}_+(\xi, A), \quad (3)$$

откуда $H_+ = \alpha_+ \mu / \rho v d$, где $\alpha_+ \equiv \mathcal{F}(0, A)$ – первая структурная геометрическая константа.

Очевидно, что в выбранной безразмерной параметризации должно быть $\mathcal{F}_+(\pm 1, A) = 0$. Отсюда следует, что функцию $\mathcal{F}_+$ можно представить в виде:

$$\mathcal{F}_+(\xi, A) = (1 - \xi^2)_+^B \mathcal{G}_+(\xi, A), \quad (4)$$

где $B_+ > 0$ – параметр, подлежащий определению, а новая четная функция $\mathcal{G}_+$ несет в себе всю зависимость от безразмерных параметров A и уже слабо зависит от ξ . Будем называть ее *верхней структурной функцией*. При этом теперь $\alpha_+ = \mathcal{G}_+(0)$.

Оказывается, что уже даже значения параметра B_+ позволяют ввести некоторую универсальную классификацию верхних профилей. Эта классификация получается на основе формулы (4) и первой и второй производной по переменной ξ от (4):

$$\mathcal{F}'_+ = -2B_+ \xi (1 - \xi^2)^{B_+-1} \mathcal{G}_+ + (1 - \xi^2)^{B_+} \mathcal{G}'_+ \quad (5)$$

и

$$\mathcal{F}''_+ = [4B_+(B_+ - 1)\xi^2(1 - \xi^2)^{B_+-2} \mathcal{G}_+ - 2B_+(1 - \xi^2)^{B_+-1} \mathcal{G}_+ - 4B_+ \xi (1 - \xi^2)^{B_+-1} \mathcal{G}'_+ + (1 - \xi^2)^{B_+} \mathcal{G}''_+], \quad (6)$$

соответственно. Условие максимума в точке симметрии $\xi = 0$ приводит к равенству $\mathcal{F}'_+(0) = 0$, откуда с учетом (5) следует $\mathcal{G}'_+(0) = 0$, как это, впрочем, и должно быть для всякой четной дифференцируемой функции.

В зависимости от значения B_+ выделяются 5 принципиально различных профилей, отличающихся характером края. Рассмотрим их все последовательно.

1. $0 < B_+ < 1$. В этом случае из (5) будет следовать, что в точках границы $\xi = \pm 1$ производная функции профиля принимает неограниченные значения $\mp \infty$ соответственно. Такой профиль будет иметь вид, представленный верхней кривой на левом рисунке 2. Будем называть такой профиль *верхним профилем с вертикальными краями*.
2. $B_+ = 1$. Особый случай, в котором возникает дополнительный структурный параметр $\beta_+ = \mathcal{G}_+(\pm 1)$. Из (5) следует, что в точках границы $\xi = \pm 1$ производная функции профиля может принимать любые значения, так что $tg\theta_{\pm} = \mp 2\beta_+$. Этот случай подходит для моделирования однопроходных покрытий с переменным краевым углом, зависящим от условий напыления. Один из таких профилей представлен второй сверху кривой на рисунке 2 слева. Будем называть его *верхним профилем с наклонными краями*. Любопытно, что в рассматриваемом случае возможны дополнительные естественные варианты формы профиля в зависимости от дополнительного третьего структурного параметра $\gamma_+ = \mathcal{G}'_+(1)$. Действительно, вторая производная (6), вычисленная в точках края, приводит к выражению:

$$\mathcal{F}''_+(\pm 1) = -2\beta_+ - 4\gamma_+. \quad (7)$$

Отмеченный выше в этом пункте пример профиля на левом рисунке 2 имеет место при условии $\beta_+ + 2\gamma_+ > 0$, которому соответствует $\mathcal{F}''_+(\pm 1) < 0$. При условии $\beta_+ + 2\gamma_+ < 0$ имеет место $\mathcal{F}''_+(\pm 1) > 0$ и профиль имеет не выпуклую форму, как это показано на левом рисунке 2 для второй кривой, а выпукло-вогнутую, как это показано на правом рисунке 2. Варьирование трех структурных параметров $\alpha_+, \beta_+, \gamma_+$ в теории профилей с наклонными краями позволяет моделировать широкий спектр форм сечений однопроходных покрытий, встречающихся в реальной практике плазменного и лазерного напыления. Таким образом, для экспериментального исследования геометрии покрытий в данной технологии следует экспериментально измерять зависимость (экспериментальная верхняя структурная функция) $\mathcal{G}_{+\text{эксп}} \equiv \frac{f_{+\text{эксп}}}{(\mu/\rho v d)(1-\xi^2)}$, как функцию безразмерной координаты $\xi = 2x/d'$ и безразмерных контролируемых параметров процесса. Именно в этой зависимости и будет заключаться основная информация о конкретной геометрии одиночного покрытия, учитывающая все детали процесса и именно она требует надлежащей (т.е. простой, достаточно точной и экспериментально обоснованной) аппроксимации.

3. $1 < B_+ < 2$. В этом случае из (5) следует, что в точках границы $\xi = \pm 1$ производная функции профиля принимает нулевые значения, а из (6) следует, что $\mathcal{F}''_+(\pm 1) = +\infty$. Это означает, что закругление на краю профиля имеет резкий характер, т.е. формально бесконечную кривизну. Пример такого профиля представлен третьей (сверху или снизу) кривой на рисунке 2 слева. Будем называть такой профиль *верхним профилем с горизонтальным резким краем*. Все профили этого типа являются выпукло-вогнутыми.
4. $B_+ = 2$. Еще один особый случай, в котором второй структурный параметр β_+ удобнее интерпретировать в терминах кривизны закругления края, так как из (6) следует, что в этом случае $\mathcal{F}''_+(\pm 1) = 8\beta_+$, что по известным формулам дифференциальной геометрии кривых при условии $\mathcal{F}'_+(\pm 1) = 0$ совпадает с кривизной кривой профиля в точке края. Таким образом, в рассматриваемом случае вместо угла наклона края (который здесь всегда нулевой) есть возможность моделировать кривизну его закругления. Как показывает практика, такое моделирование актуально для симметричных следов, получаемых в технологии газотермического напыления. Один из таких профилей представлен второй снизу кривой на рисунке 2. Будем называть его *верхним профилем с горизонтальным плавным краем*. Все профили с горизонтальным плавным краем являются выпукло-вогнутыми.
5. $B_+ > 2$. В этом случае из (5)-(6) следует, что в точках границы $\mathcal{F}'_+(\pm 1) = \mathcal{F}''_+(\pm 1) = 0$ — кривизна кривой профиля обращается в этих точках в нуль. Такой профиль будет иметь вид, представленный самой нижней кривой рисунке 2 слева. Будем называть такой профиль *верхним профилем с плоским горизонтальным краем*.

Очевидно, что полагая $\mathcal{F}_- \equiv -\mathcal{F}_+$ и повторяя все рассуждения для $\mathcal{F}_-$ с нижней структурной функцией $\mathcal{G}_-$, мы получим аналогичную классификацию нижних профилей.

Несколько различных профилей с горизонтальным плавным краем и наклонным краем с различными простыми структурными функциями показаны на рисунке 3 слева и справа соответственно.

Рассмотрим более детально аппроксимацию профилей с наклонными краями ($B_+ = 1$). Для практических и прикладных расчетных задач удобно иметь дело с простыми аппроксимационными зависимостями, содержащими небольшое число параметров, которое, тем не менее, достаточно для воспроизведения реальной геометрии покрытий. По этим причинам остановимся на двух типах 3-х параметрических аппроксиматоров структурной функции: полиномиальной (би-квадратичной):

$$\mathcal{G}_+(\xi) = a_0 + a_1\xi^2 + a_2\xi^4, \quad (8)$$

и дробно-рациональной (дробно-квадратичной) вида:

$$\mathcal{G}_+(\xi) = \frac{a_0 + a_1\xi^2}{1 + a_2\xi^2}, \quad (9)$$

где a_0, a_1, a_2 – параметры аппроксиматоров. Отметим, что не для всех наборов параметров функция $F_+ = (1 - \xi^2)\mathcal{G}_+$ имеет на промежутке $\xi \in [-1, 1]$ физически надлежащий вид одиночной «горки». Сформулируем минимальный перечень требований на зависимость $F_+(\xi)$, который позволит описать допустимую область параметров аппроксиматоров и диапазоны важных геометрических характеристик профилей внутри этой области.

1. В центральной точке профиля функция F_+ имеет максимум, что математически с учетом (5)-(6) отражается неравенством:

$$F''_+(0) \leq 0 \Leftrightarrow -2\mathcal{G}_+(0) + \mathcal{G}''_+(0) \leq 0; \quad (10)$$

2. Функция G_+ не имеет нулей на промежутке $\xi \in [-1, 1]$, таким образом единственные нули функции F_+ на отрезке $[-1, 1]$ – это его концы. Математически это означает, что уравнение $G_+(\xi) = 0$ либо вообще не имеет корней, либо имеет их вне промежутка $(-1, 1)$.
3. Функция F_+ не имеет других локальных экстремумов на $(-1, 1)$, кроме точки $\xi = 0$. Это означает, что уравнение $F'_+(\xi) = 0$ либо вообще не имеет корней, либо имеет их вне промежутка $(-1, 1)$.
4. Если функция G_+ имеет особые точки, соприкасающиеся с областью ее определения, то потребуем, чтобы они лежали вне отрезка $[-1, 1]$.

В совокупности эти требования обеспечивают физически приемлемое разнообразие форм верхнего профиля с запасом покрывающее формы, встречающиеся в реальной практике напыления. Для дальнейшего анализа удобно сформулировать одну полезную для данного типа задач лемму, которую мы приведем без доказательства (оно вполне элементарно).

ЛЕММА (о параметрах квадратичного трехчлена). Множество значений параметров a, b, c квадратного уравнения: $ax^2 + bx + c = 0$, в котором $c > 0$ и которое не имеет корней на интервале $(0, 1]$, описывается системой неравенств:

$$\begin{cases} a \geq -b - c, & b \geq -2c; \\ a \geq b^2/4c, & b \leq -2c \end{cases} \quad (11)$$

Условие $c > 0$ не ограничивает общность утверждения леммы, так как умножением квадратного уравнения на -1 всегда можно добиться условия $c > 0$ для эквивалентного квадратного уравнения. Случай $c = 0$ не годится, так как для него всегда существует корень $x = 0$, что должно исключаться условиями леммы.

1.1. Биквадратичный аппроксиматор

Для функции (8) имеем $\mathcal{G}_+(0) \equiv \alpha_+ = a_0$. Этот параметр является определяющим для многих свойств биквадратичного аппроксиматора. Условие (10) после элементарных вычислений принимает вид:

$$-2\alpha_+ + 2a_1 \leq 0 \Leftrightarrow a_1 \leq \alpha_+ \quad (12)$$

Условие 4 на зависимость $F_+(\xi)$ в рассматриваемом случае неактуально, так как особых точек у зависимости (8) нет. Условия 2 и 3 принимают вид биквадратных уравнений:

$$a_2\xi^4 + a_1\xi^2 + \alpha_+ = 0; \quad 3a_2\xi^4 + 2(a_1 - a_2)\xi^2 + \alpha_+ - a_1 = 0, \quad (13)$$

которые не должны иметь корней, лежащих на промежутке $[0; 1]$. Эта ситуация как раз попадает под условия леммы о параметрах. Применяя ее для каждого уравнения по отдельности с учетом естественного условия $\alpha_+ > 0$ и уже установленного условия (12) и взяв пересечение всех областей на плоскости параметров a_1, a_2 , приходим к следующему физически допустимому диапазону этих параметров:

$$a_1 \in [-3\alpha_+, \alpha_+]; \quad a_2 \in [-2\alpha_+, 4\alpha_+]; \quad (14)$$

при этом точная форма этой области описывается следующей системой неравенств:

$$\begin{cases} \text{для } a_2 \in [-2\alpha_+, \alpha_+] & -\alpha_+ - a_2 \leq a_1 \leq \alpha_+; \\ \text{для } a_2 \in [\alpha_+, 4\alpha_+] & -(a_2 + \sqrt{D})/2 \leq a_1 \leq (-a_2 + \sqrt{D})/2, \end{cases} \quad (15)$$

где $D = 3a_2(4\alpha_+ - a_2)$. Система неравенств (15) характеризуется диаграммой на рисунке 4.

Для введенного ранее параметра наклона β_+ имеем в этом случае выражение:

$$\beta_+ = tg\theta_+/2 = \mathcal{G}(1) = \alpha_+ + a_1 + a_2. \quad (16)$$

Знак комбинации $\beta_+ + 2\gamma_+$, отвечающий за знак кривизны на краях, совпадает, как показывают простые вычисления, со знаком комбинации

$$9a_2 + 5a_1 + \alpha_+ \gtrless 0, \quad (17)$$

причем верхний знак соответствует выпуклой форме края, а нижний – вогнутой. Область с вогнутой границей профиля показана на диаграмме (рис. 4) нижним треугольником, заштрихованным клетчатой штриховкой.

Для практических целей аппроксимации удобно перейти от тройки параметров (α_+, a_1, a_2) к физически наглядным параметрам (α_+, T, r) , где α_+ – высота профиля, измеряемая в единицах размерной комбинации (2), $T = tg\theta_+$, r – радиус кривизны профиля в его вершине, измеренный в единицах H . Измеряя эти па-

раметры по экспериментальным формам покрытий, можно рассчитать параметры биквадратичного аппроксиматора по формулам:

$$a_0 = \alpha_+; a_1 = \frac{2\alpha_+r-1}{2r}; a_2 = \frac{1+Tr-4\alpha_+r}{2r}. \quad (18)$$

С учетом диаграммы (рис. 4) легко вывести диапазон возможных значений этих физических параметров в рассматриваемой аппроксимации:

$$\alpha_+ > 0; 0 \leq T \leq 6\alpha_+; r \geq 1/8\alpha_+. \quad (19)$$

Приведем характерные профили вдоль границ физической области и внутри нее. Далее на всех графиках принимается $\alpha_+ = 1$. Границе $a_1 = \alpha_+$ соответствуют профили с плоским плато на вершине, протяженность которого монотонно растет по мере изменения a_2 от $-2\alpha_+$ до α_+ (рис. 5 слева.) Границе $a_2 = -\alpha_+ - a_1$ соответствуют профили с монотонно увеличивающейся кривизной центральной части (рис. 5 справа).

Криволинейной границе диаграммы (рис.4) соответствуют профили со «ступенькой», наличие которой формально не противоречит сформулированным выше критериям физической области. Если стартовать от точки $(-2\alpha_+, \alpha_+)$ и двигаться вдоль нижней (левой) ветви граничной кривой, то стандартный вогнуто-выпуклый профиль плавно трансформируется в профиль со ступенькой, которая поднимается вверх и увеличивается в размерах, достигая середины высоты профиля и максимального размера в точке с координатами $(-2\alpha_+, 4\alpha_+)$. Дальнейшее продвижение по верхней (правой) ветви граничной кривой приводит к перемещению ступеньки вверх и ее плавной трансформации в плато, которое характерно для профилей на правой границе физической области. Все сказанное иллюстрируется на рисунке 6.

1.2. Дробно-квадратичный аппроксиматор

Для функции (9) имеем $\mathcal{G}_+(0) \equiv \alpha_+ = a_0$. Условие (10) после простых вычислений принимает вид:

$$-2a_2\alpha + 2a_1 - 2\alpha \leq 0 \Leftrightarrow a_2 \geq \frac{a_1}{\alpha_+} - 1. \quad (20)$$

Условие 4 на зависимость $F_+(\xi)$ теперь принимает вид:

$$a_2 > -1, \quad (21)$$

а условия 2 и 3 принимают вид неравенства:

$$a_1 \geq -\alpha_+. \quad (22)$$

(отсутствие дополнительных нулей функции на отрезке $[-1; 1]$) и биквадратного уравнения

$$a_1a_2\xi^4 + 2a_1\xi^2 + a_2\alpha_+ - a_1 + \alpha_+ = 0, \quad (23)$$

которое не должно иметь корней, лежащих на промежутке $[0; 1)$. С учетом (20) это уравнение попадает под условия леммы о параметрах. Применяя ее с учетом (21) и взяв пересечение всех областей на плоскости параметров a_1, a_2 , приходим к следующему физически допустимому диапазону этих параметров:

$$a_1 \in [-\alpha_+, +\infty); a_2 \in (-1, +\infty); \quad (24)$$

при этом точная форма этой области описывается следующей системой неравенств:

$$\begin{cases} \text{для } a_1 \in [-\alpha_+, 0] & -1 < a_2 < +\infty; \\ \text{для } a_1 \in [0, +\infty) & (a_1/\alpha_+) - 1 \leq a_2 < +\infty, \end{cases} \quad (25)$$

Система неравенств (25) характеризуется диаграммой на рисунке 8.

Для введенного ранее параметра наклона β_+ имеем в этом случае выражение:

$$\beta_+ = tg\theta_+/2 = \mathcal{G}(1) = \frac{\alpha_+ + a_1}{1 + a_2}. \quad (26)$$

Знак комбинации $\beta_+ + 2\gamma_+$, отвечающий за знак кривизны на краях, совпадает, как показывают простые вычисления, со знаком комбинации

$$a_1 a_2 - 3a_2 \alpha + 5a_1 + \alpha_+ \geq 0, \quad (27)$$

причем верхний знак соответствует выпуклой форме края, а нижний – вогнутой. Область с вогнутой границей профиля показана на диаграмме (рис. 7) клетчатой штриховкой в верхней части диаграммы.

Параметры аппроксиматора связаны с экспериментально измеряемыми параметрами профиля α_+, T, r посредством формул:

$$a_0 = \alpha_+, \quad a_1 = \frac{4\alpha^2 r - T}{2r(T - 2\alpha)}, \quad a_2 = \frac{Tr - 4\alpha r + 1}{r(2\alpha - T)} \quad (28)$$

С учетом диаграммы (рис. 7) легко вывести диапазон возможных значений физических параметров:

$$\alpha_+ > 0; \quad 0 \leq T < +\infty; \quad 0 < r < +\infty. \quad (29)$$

Мы видим, что диапазон аппроксимируемых профилей дробно-квадратичного аппроксиматора шире, чем биквадратичного.

Приведем характерные профили вдоль границ физической области и внутри нее. Далее на всех графиках принимается $\alpha_+ = 1$. Границе $a_1 = -\alpha_+ = -1$ соответствуют профили с различными наклонами на краях, (рис. 8 слева.) Границе $a_2 \rightarrow -1$ соответствуют профили с монотонно уменьшающейся кривизной центральной части (рис. 8 справа).

Правой наклонной границе диаграммы (рис. 7) соответствуют профили с плато в центральной части (рис. 9 слева). И, наконец, набор кривых из середины рабочей области показан на рисунке 9 справа.

2. Сравнение с известными аппроксимирующими функциями

Рассмотрим в этом разделе аппроксимирующие функции, предложенные выше с позиций общего подхода, с функциями, предложенными ранее в работах [11,12,14]. Мы будем использовать форму параметризации аппроксиматоров, удобную для сравнения и несколько отличающуюся в обозначениях.

2.1. Параболический сегмент

В принятых нами обозначениях параболический профиль описывается зависимостью вида:

$$y = H\alpha_+(1 - \xi^2) \Rightarrow \mathcal{F}_+ = \alpha_+(1 - \xi^2). \quad (30)$$

Отсюда следует, что параболический аппроксиматор попадает в основной (второй) тип профилей с наклонными краями с тривиальной структурной функцией $\mathcal{G}_+ = \alpha_+ = \text{const}$. При этом для введенных выше физических параметров имеем следующие выражения:

$$\beta_+ = \frac{tg\theta_+}{2} = \alpha_+; \quad r = 2\alpha_+. \quad (31)$$

Сравнивая эту ситуацию с аппроксиматорами из разделов 1.1 и 1.2, приходим к выводу, что параболическая аппроксимация по существу является однопараметрической (высота, наклон и кривизна в вершине определяются одним единственным безразмерным параметром α_+ и пропорциональны ему), соответствует аппроксимации (8) при $a_1 = a_2 = 0$, $a_0 = \alpha_+$ и ее возможности для описания реальных профилей напыления по этой причине сильно ограничены.

2.2. cos-сегмент

В принятых нами обозначениях -профиль описывается зависимостью вида:

$$y = H\alpha_+ \cos(\pi \xi/2) = H(1 - \xi^2) \cdot \alpha_+ \frac{\cos(\pi \xi/2)}{1 - \xi^2} \Rightarrow \mathcal{G}_+ = \alpha_+ \frac{\cos(\pi \xi/2)}{1 - \xi^2}, \quad (32)$$

где, учитывая простоту нулей функции $\cos(\pi \xi/2)$ в точках $\xi = \pm 1$, мы выделили структурную функцию $\mathcal{G}_+$.

Как видим, – аппроксиматор, так же как и параболический, попадает в основной (второй) тип профилей с наклонными краями. При этом его структурная функция теперь хотя и трансцендентна, но снова зависит лишь от одного мультипликативного параметра α_+ . Для введенных выше физических параметров имеем:

$$\beta_+ = \frac{tg\theta}{2} = \frac{\pi\alpha_+}{4}; \quad r = \frac{\alpha_+\pi^2}{4} \quad (33)$$

Снова приходим к выводу, что -аппроксимация по существу является однопараметрической и ее возможности сильно ограничены. Подбирая параметры биквадратичного аппроксиматора (8) так, чтобы определяемые им параметры α_+ , β_+ и r совпадали с (33):

$$a_1 = 1 - \pi^2/8; \quad a_2 = \pi^2/8 + \pi/4 - 2; \quad a_0 = \alpha_+, \quad (34)$$

приходим к двум формально различным зависимостям для $\mathcal{G}_+$ (трансцендентной и биквадратичной), которые, однако, в рабочем диапазоне практически неотличимы, как это наглядно видно из их графического представления на рисунке 10.

2.3. Эллиптический сегмент

В основе эллиптической аппроксимации, которая является наиболее общей из всех, рассмотренных в, лежит уравнение эллипса со смещенным по вертикали центром:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{(y+h)^2}{b^2} = 1, \quad (35)$$

где a, b – полуоси, h – параметр смещения, который в контексте рассматриваемой задачи следует считать положительным. Разрешая (35) относительно y выделяя верхнюю ветвь решения, получаем:

$$y = b\sqrt{1 - (x/a)^2} - h. \quad (36)$$

Приравнявая это выражение к нулю, находим выражение для полуширины дорожки:

$$\frac{d}{2} = \frac{a\sqrt{(b^2-h^2)}}{b}. \quad (37)$$

Переходя к принятой переменной $\xi = 2x/d$ и выражая параметр b через безразмерный эксцентриситет эллипса: $e = \sqrt{1 - b^2/a^2}$, приходим к промежуточной формуле:

$$y = \sqrt{a^2(1 - e^2) - \xi^2(a^2(1 - e^2) - h^2)} - h. \quad (38)$$

Для высоты горки имеем

$$H_+ = y(0) = b - h = a\sqrt{1 - e^2} - h = H\alpha_+ \quad (39)$$

С учетом простоты нулей функции (38) в точках $\xi = \pm 1$, выделяем стандартную часть в зависимости (38):

$$y = H(1 - \xi^2) \cdot \frac{\alpha_+ (\sqrt{a^2(1 - e^2) - \xi^2(a^2(1 - e^2) - h^2)} - h)}{(a\sqrt{1 - e^2} - h)(1 - \xi^2)}, \quad (40)$$

откуда легко получается выражение для структурной функции эллиптического аппроксиматора:

$$G_+ = \frac{\alpha_+ (\sqrt{(1 - e^2) - \xi^2(1 - e^2 - \delta^2)} - \delta)}{(\sqrt{1 - e^2} - \delta)(1 - \xi^2)}, \quad (41)$$

где $\delta \equiv h/a$. Мы видим, что эллиптический аппроксиматор характеризуется тремя независимыми параметрами (α_+, e, δ) , что позволяет хорошо аппроксимировать профили с наклонными краями (и только их!). Простые вычисления приводят к следующим формулам для интегральных геометрических характеристик этих аппроксиматоров:

$$\beta_+ = \frac{\alpha_+(1 - \delta^2 - e^2)}{2\delta(\sqrt{1 - e^2} - \delta)}; \quad r = \frac{2\alpha_+(1 - \delta^2 - e^2)}{2\sqrt{1 - e^2}(\sqrt{1 - e^2} - \delta)}. \quad (42)$$

С помощью формул (18), (28) можно легко найти параметры a_i для биквадратичного и дробноквадратичного аппроксиматоров, воспроизводящих те же самые интегральные геометрические характеристики профилей. Характерный результат сравнения структурных функций представлен на рисунке 11.

2.4. Круговой сегмент

Аппроксиматор в форме кругового сегмента получается как частный случай эллиптического: во всех формулах (41)-(42) следует положить $e = 0$. Таким образом, круговой аппроксиматор является 2-параметрическим и занимает промежуточное положение между однопараметрическими параболическим и косинусоидальным аппроксиматорами и эллиптическим. Разумеется, он должен с удовлетворительной точностью заменяться 3-параметрическими биквадратичным и дробноквадратичным аппроксиматорами, что наглядно видно на рисунке 12.

Сравнивая возможности аппроксимации биквадратичным и дробноквадратичным аппроксиматорами, можно прийти к общему выводу о том, что последние воспроизводят более широкий диапазон профилей и потому в целом предпочтительнее. Сравнение предложенных аппроксимирующих функций с функциями, предложенными ранее в работах [11,12,14] позволяет сделать следующие выводы:

1. Параболический сегмент, cos-сегмент с учетом симметрии задачи фактически являются однопараметрическими и не пригодны для описания сложных профилей;
2. Эллиптический сегмент характеризуется тремя независимыми параметрами, но позволяет хорошо аппроксимировать только профили с наклонными краями.

3. Сравнение с экспериментом

В настоящем разделе оценим возможность использования биквадратичной аппроксимирующей функции (8) для описания экспериментальных профилей сечения дорожек, получаемых при лазерной наплавке металлических деталей напылением порошкообразных металлических сплавов, а также применения ее для построения математической модели зависимости профиля сечения от параметров процесса наплавки. Хотя, как показано выше, дробно-квадратичная аппроксимирующая функция (9) имеет несколько более широкие возможности в плане разнообразия форм описываемых профилей, преимуществом функции (8) является ее линейность по параметрам, что позволяет применять для вычисления оценок коэффициентов a_0, a_1, a_2 формулы линейного регрессионного анализа.

Экспериментальные профили сечения покрытий получают путем обработки микрофотографий их поперечных разрезов и могут быть представлены в виде массива координат $(x_i, y_i), i = 1 \dots N$, где N – число экспериментальных точек профиля сечения, снятых с микрофотографии. Поскольку, в силу стохастического характера процесса нанесения порошкообразного покрытия, экспериментальные точки y_i подвержены случайным колебаниям относительно регулярной теоретической кривой, аппроксимирующую функцию

$$F(\xi) = (1 - \xi^2)(a_0 + a_1\xi^2 + a_2\xi^4) \quad (43)$$

можно рассматривать как уравнение регрессии в безразмерных координатах $\xi_i = 2x_i/d'$.

Параметры уравнения регрессии можно оценить методом наименьших квадратов

$$\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \rightarrow \min, \quad (44)$$

где посредством $\hat{y}_i$ обозначены ординаты точек сечения, рассчитанные по теоретической зависимости (43).

Введем в рассмотрение информационную матрицу X размером $N \times 3$, строки которой имеют вид

$$X_i = [1 - \xi_i^2, (1 - \xi_i^2)\xi_i^2, (1 - \xi_i^2)\xi_i^4]. \quad (45)$$

Тогда неизвестный вектор параметров a может быть вычислен по формуле линейного регрессионного анализа, реализующей условие (44):

$$a = (X^T X)^{-1} X^T y. \quad (46)$$

Достоверность аппроксимации может быть оценена по близости к 1 коэффициента детерминированности

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}, \quad (47)$$

где $\bar{y}$ – среднее значение массива y_i .

В настоящей работе формулы (46), (47) использовались как при вычислении коэффициентов аппроксимации профилей сечения, так и при вычислении коэффициентов регрессии зависимостей параметров профилей от параметров технологического процесса нанесения покрытий. В качестве экспериментальных данных использовали приведенные в работе [10] микрофотографии поперечных сечений одинарных дорожек лазерной наплавки порошкообразного сплава NiCr 19E Sulzer-Metco со средним размером частиц порошка 60 мкм на стержень диа-

метром 60 мм из стали С45 при вращении его относительно оси цилиндра. В данной работе были получены микрофотографии профилей сечения дорожек наплавки при различных технологических параметрах процесса, представленных в нашей работе в формуле (3): расход порошка μ и скорость движения лазерной свечи v , а также при разных значениях мощности лазера P .

3.1. Аппроксимация экспериментальных профилей

В цитированной выше работе [10] микрофотографии поперечных сечений одинарных дорожек лазерной наплавки были получены двумя способами: 1) с помощью профилометра и 2) путем обработки шлифов сечений цилиндра вдоль его оси поперек дорожки наплавки. Первый способ прост, но позволяет получать только верхнюю кривую профиля, обозначенную на рисунке 1 посредством $f_+(x)$, тогда как второй способ более трудоемкий, но позволяет изучить также и нижнюю часть профиля $f_-(x)$. Материал в этой части имеет измененную структуру по сравнению с остальной частью подложки из-за плавления основы под действием лазерного луча, а также частичной диффузии в нее материала покрытия. С технологической точки зрения важно контролировать обе эти кривые, поскольку верхняя $f_+(x)$ определяет толщину покрытия при наложении дорожек при многократном проходе свечи, а нижняя $f_-(x)$ определяет качество сцепления покрытия с основой. Площадь под верхней кривой назовем площадью наплавки A_c , а площадь под нижней кривой, соответственно, площадью подплавки A_m . Отношение площади подплавки к общей площади сечения

$$D = \frac{A_m}{A_c + A_m} \quad (48)$$

будем называть коэффициентом подплавления. В зарубежной литературе для этого параметра используется термин «dilution».

При малом значении D покрытие имеет низкую адгезионную прочность с основой, но при слишком большом его значении основа материала детали оказывается чрезмерно изменена, что приводит к ухудшению качества детали.

На рисунках 12, 13 представлены результаты аппроксимации профилей сечений дорожек, полученных первым и вторым способом, соответственно. Все три приведенных сечения получены при разных значениях параметров наплавки (μ , v , P). При этом, как видно, форма кривых профилей существенно изменяется и не может быть описана какой-либо одной простой аппроксимирующей функцией из числа рассмотренных в разделе 2. Вместе с тем, биквадратичная аппроксимирующая функция хорошо аппроксимирует все представленные профили с высокой достоверностью аппроксимации. Это позволяет использовать ее при построении математической модели зависимости профиля сечения дорожки от технологических параметров наплавки.

3.2. Моделирование зависимости профиля сечения дорожки от технологических параметров наплавки

В настоящем разделе в качестве параметров профиля сечения дорожки рассматривались следующие: ширина профиля d , высота наплавки H_+ , глубина подплавки H_- , коэффициент подплавления D . При вычислении коэффициента подплавления D по формуле (48) площади под кривыми A_c и A_m определяли пу-

тем интегрирования аппроксимирующих функций (43). В нормированных переменных этот интеграл имеет простой вид

$$\int_{-1}^1 F(\xi) d\xi = 4(a_0/3 + a_1/15 + a_2/35). \quad (49)$$

Для вычисления площади эту величину нужно домножить на размерные параметры $Hd/2$.

В качестве технологических параметров наплавки использовались следующие: мощность лазерного луча P (в диапазоне 310...1150 Вт) и отношение расхода порошка к скорости движения лазерной свечи $s = \mu/v$ (в диапазоне 12...100 г/м).

Будем обозначать вышеперечисленные выходные параметры профиля сечения дорожки (d, H_+, H_-, A_c, A_m) посредством переменной y , а технологические параметры наплавки P и s , соответственно, переменными x_1, x_2 . В качестве математической модели зависимости параметров профиля сечения дорожки y от технологических параметров наплавки x_1, x_2 будем использовать уравнение параболической регрессии вида

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1^2 + b_4x_2^2 + b_5x_1x_2, \quad (50)$$

где коэффициенты регрессии b_i вычисляются методом наименьших квадратов обработкой экспериментальных данных для каждого отклика y .

Строки информационной матрицы X для уравнения регрессии (50) будут иметь вид

$$X_i = [1, x_{1i}, x_{2i}, x_{1i}^2, x_{2i}^2, x_{1i}x_{2i}]. \quad (51)$$

Коэффициенты уравнения регрессии b_i вычисляются по формуле аналогичной (46)

$$b = (X^T X)^{-1} X^T y. \quad (52)$$

Уравнение двухфакторной регрессии (50) в отличие от линейных одномерных моделей, использованных в работе [10], позволяет учесть в описании влияние не только каждого технологического параметра в отдельности, но также и их взаимодействие, которое в данном процессе, как показывают экспериментальные данные, опубликованные в цитированной статье, является весьма существенным. Кроме того, квадратичная модель (50) позволяет также сформулировать и решить задачу оптимизации процесса.

Таблица 1 – Коэффициенты уравнений регрессии зависимостей параметров профиля дорожки лазерной наплавки от технологических параметров процесса

Параметры	d	H_+	H_-	A_c	A_m
b_0	1.0170E+00	-2.2801E-01	9.6587E-04	-3.7006E-01	5.1109E-02
b_1	3.2233E-04	6.6882E-04	2.7636E-04	7.2990E-04	-2.5296E-04
b_2	3.7294E-03	2.7400E-02	-1.6129E-03	7.0405E-03	-4.4472E-04
b_3	2.1600E-07	-3.5676E-07	4.4681E-07	-5.8364E-07	4.7509E-07
b_4	1.0370E-04	-9.5219E-05	3.6095E-05	2.0892E-04	2.9258E-05
b_5	7.0752E-06	4.4954E-06	-3.0421E-06	1.9234E-05	-2.9282E-06
R^2	0.99	0.99	0.96	0.99	0.96

В таблице 1 приведены рассчитанные значения коэффициентов уравне-

ний регрессии зависимостей параметров профиля дорожки лазерной наплавки от технологических параметров процесса. Как видно, для всех моделей наблюдаются высокие значения коэффициентов детерминированности, что обеспечивает возможности их практического использования.

Для того, чтобы оценить влияние технологических параметров на параметры профиля сечения наплавки, целесообразно построить графики данных зависимостей с использованием полученных коэффициентов регрессии. Анализ зависимостей $d(x_1, x_2)$ и $H(x_1, x_2)$ показывает, что, как ширина профиля, так и максимальная его высота монотонно возрастают с ростом мощности лазера P и удельного расхода порошка s . При этом влияние s является значительно более сильным. Квадратичные эффекты в этих зависимостях несут незначительный характер. Существенным является взаимодействие факторов: при малых s влияние P мало, тогда как при больших s оно становится более заметным. Аналогичный характер имеет зависимость площади наплавки A_c , показанная на рисунке 14 слева. Нелинейность зависимости $A_m(P, s)$, показанной на рисунке 14 справа, выражена в большей степени.

Поскольку на практике, как было отмечено выше, важную роль играет относительное значение площади подплавки – коэффициент подплавления D (48), целесообразно оценить его значения при различных величинах P и s . Как видно из рисунка 15, с увеличением мощности лазера коэффициент подплавления D возрастает, а с увеличением удельного расхода порошка – снижается. Причина этого снижения вполне очевидна и связана с тем, что порошок экранирует лазерный луч, не позволяя в достаточной мере прогреться основе детали. При малой мощности лазерного луча коэффициент подплавки становится близким к нулю, в результате чего качество покрытия резко ухудшается из-за плохой адгезии его к основе.

Еще одним важным практическим параметром наплавки с точки зрения расхода материалов и энергии является ее удельная эффективность, которую можно оценить как отношение площади наплавки к удельному расходу порошка

$$P_c = A_c/s. \quad (53)$$

На рисунке 16 представлен трехмерный график зависимости $P_c(P, s)$. Видно, что при больших удельных расходах порошка удельная эффективность наплавки растет как с увеличением мощности лазера, так и с увеличением удельного расхода порошка. Однако при малых удельных расходах порошка зависимость $P_c(P)$ становится экстремальной. Это объясняется тем, что в данных условиях при большой мощности лазера значительная часть его энергии расходуется на подплавление основы детали, что нецелесообразно.

При выборе оптимальных значений технологических параметров имеет смысл зависимости $P_c(P, s)$ рассматривать совместно с зависимостями $D(P, s)$. Контурные графики этих зависимостей представлены на рисунке 17. Видно, что рост удельной эффективности наплавки с увеличением мощности лазера и удельного расхода порошка не вполне согласуется с требованием обеспечения оптимального значения коэффициента подплавления D . Рекомендуемое из практики значение D лежит в пределах от 5% до 30% [10]. В этой связи, если в каче-

стве критерия оптимальности процесса выбрать его удельную эффективность P_c , то функция $D(P, s)$ может рассматриваться в качестве ограничения. В таблице 2 приведены решения такой задачи условной оптимизации, найденные с помощью полученных математических моделей: оптимальные значения параметров P и s , обеспечивающие максимум функции $P_c(P, s)$ при ограничениях на функцию $D(P, s)$ в пределах из вышеуказанного диапазона.

Таблица 2 – Оптимальные значения параметров P и s , вычисленные из условия максимума функции $P_c(P, s)$, при заданных ограничениях на функцию $D(P, s)$

P , Вт	s , г/м	P_c	D
1150.0	100.0	0.047	5.99%
1150.0	75.5	0.041	7.97%
1150.0	60.8	0.037	10.56%
1150.0	51.0	0.034	13.51%
1150.0	44.5	0.032	16.43%
1150.0	39.6	0.030	19.38%
1150.0	36.3	0.028	21.85%
1150.0	33.1	0.027	24.86%
1134.7	29.8	0.025	27.79%

Как можно видеть, максимальная удельная эффективность наплавки достигается при наибольших значениях мощности лазера и удельного расхода порошка. При этом D имеет достаточно малые значения, что может сказаться на прочности адгезионной связи покрытия, особенно при его большой толщине. Поэтому, если увеличить допустимое значение D , то оптимальное значение удельного расхода будет снижаться, тогда как мощность лазера вплоть до достаточно больших величин коэффициентов подплавления остается максимальной. При этом максимальное значение P_c снижается.

3.3. Моделирование нанесения нескольких дорожек

На практике нанесение покрытия осуществляется последовательным наложением на основу параллельно многих дорожек порошкообразного материала путем движения головки лазерной/плазменной свечи со сдвигом относительно оси первой дорожки на некоторую величину шага нанесения, которую в дальнейшем будем обозначать посредством переменной w . Если величина шага нанесения меньше ширины дорожки ($w < d$), то в области между соседними дорожками возникает наложение их профилей, и материал второй дорожки начинает заполнять пространство между профилями соседних дорожек. Схема этой ситуации показана на рисунке 18 на примере двух дорожек в безразмерных координатах. Результирующий профиль (кривая 3) получен путем сложения профилей первой и второй дорожки. В результате такого сложения в области между дорожками появляется выступ, величина которого с уменьшением w возрастает. Вопрос о форме профиля в области наложения с безразмерными координатами $-1 + w < \xi < 1$ является весьма сложным, поскольку форма профиля в этой области зависит от многих факторов: распределения температур и скоростей час-

тиц, а также физических констант материала порошка. Многими авторами делались разные предположения о том, каким образом следует аппроксимировать этот профиль. Так в работе [27] профиль получается путем простого суммирования профилей последовательных дорожек, аналогично тому, как это сделано на рисунке 18. Данный подход воспроизводится также в более поздних работах [14,23]. Недостаток его состоит в том, что при этом не предполагается изменения формы профиля материала в зоне наложения в результате его плавления. Поэтому для получения ровного покрытия уменьшение колебания линии профиля авторы [27] достигают путем уменьшения шага между дорожками, так что происходит наложение друг на друга не двух соседних, а трех и более смежных дорожек. Таким образом, сильно увеличивается толщина наплавки, а производительность всего процесса наложения покрытия снижается. Авторы работы [28] экспериментально доказали, что материал в зоне наложения расплавляется, а для достижения гладкого покрытия шаг дорожек должен быть таким, чтобы площадь нахлеста под кривыми их профилей ниже точки пересечения профилей должна быть равна площади материала выше этой точки. Такого же мнения придерживаются авторы [11,12]. Недостатком этих работ можно признать то, что в них для аппроксимации профиля были использованы простые геометрические модели. Аналогично, авторы [29] использовали уравнение кругового сегмента для аппроксимации профиля сечения дорожек и области наложения. Как было показано выше, возможности таких моделей ограничены. В качестве примера на рисунке 19 приведены кривые аппроксимации биквадратичным аппроксиматором профилей сечений дорожек, представленных в работе [10] в естественных координатах для различных технологических параметров наплавки. Для всех кривых достоверность аппроксимации составила более 96%. Как видно, некоторые из профилей вполне могли бы быть описаны простыми аппроксиматорами, тогда как для других точность использования простых аппроксиматоров была бы заметно ниже. Авторы работы [30] помимо простого параболического сегмента и $\sin$ -сегмента в качестве аппроксимирующих функций использовали также более сложные трансцендентные функции: гауссовскую функцию и логистическую функцию. Следует заметить, что экспериментальные профили, использованные в данной работе, были достаточно простыми, поэтому все использованные функции, в том числе параболическая и $\sin$ -сегмент, показали высокий коэффициент детерминированности, более 97%. На этом основании авторы данной работы при выборе оптимального значения шага наложения использовали $\sin$ -сегмент. При этом оптимальное относительное значение шага наложения, при котором выполняется равенство площадей криволинейных сегментов ниже и выше точки пересечения профилей смежных дорожек w/d , составило 63.66%.

Ниже мы представим результаты использования предложенной в настоящей статье биквадратичной функции для вычисления оптимального шага наложения смежных дорожек. Так же как и авторы цитированных выше работ, мы делаем следующие допущения относительно характера наложения дорожек:

- 1) Накладываемые смежные дорожки имеют одинаковую форму сечения, совпадающую с формой при однократном наложении.
- 2) Кривые профиля при наложении имеют тот же вид, что и до наложения.

3) Эффекты поверхностного натяжения расплавленного металла и давления профилей дорожек не существенны.

4) Оптимальный шаг наложения дорожек получается из условия равенства площадей криволинейных сегментов ниже и выше точки пересечения накладываемых профилей.

На рисунке 20 представлена схема к вычислению оптимальной безразмерной координаты нахлеста ξ_{opt} при наложении дорожек. При оптимальном значении координаты точки пересечения профилей смежных дорожек площади криволинейных треугольников ABC и DEB должны быть равны. В силу симметрии данных фигур относительно вертикальной линии $\xi_{opt}\xi'_{opt}$, проходящей через точку пересечения профилей, условие равенства этих площадей можно записать в виде

$$H\xi_{opt} - \int_0^{\xi_{opt}} F(\xi)d\xi = \int_{\xi_{opt}}^1 F(\xi)d\xi. \quad (54)$$

Переносим интеграл из левой части равенства в правую и объединяя пределы интегрирования, получим

$$F(0)\xi_{opt} = \int_0^1 F(\xi)d\xi. \quad (55)$$

Отсюда следует выражение для оптимальной безразмерной координаты нахлеста

$$\xi_{opt} = \frac{1}{F(0)} \int_0^1 F(\xi)d\xi. \quad (56)$$

Интеграл в правой части равен половине интеграла (49), так что с учетом $F(0) = a_0$ окончательно получаем выражение для оптимальной безразмерной координаты нахлеста через параметры профиля дорожки

$$\xi_{opt} = \frac{2}{3} + \frac{2}{15} \frac{a_1}{a_0} + \frac{2}{35} \frac{a_2}{a_0}. \quad (57)$$

Шаг нанесения дорожек w в безразмерных единицах может быть выражен через ξ_{opt}

$$w = 2 - 2(1 - \xi_{opt}) = 2\xi_{opt}. \quad (58)$$

Поскольку в безразмерных координатах ширина дорожки равна 2, то относительное значение шага наложения w/d совпадает с ξ_{opt} .

В качестве иллюстрации влияния параметров нанесения покрытия на относительную оптимальную величину шага наложения в таблице 3 приведены значения для различных значений технологических параметров наплавки, вычисленные на основании параметров аппроксимации профилей наплавки, приведенных в работе [10].

Таблица 3 – Оптимальные значения относительного шага наложения дорожек для различных технологических параметров наплавки

P , Вт	s , г/м	ξ_{opt}
310	12	0.683
310	29	0.657
310	45	0.731
570	12	0.603
570	29	0.760

P , Вт	s , г/м	ξ_{opt}
570	45	0.747
720	12	0.669
720	29	0.748
720	45	0.751
720	63	0.764
1150	12	0.706
1150	29	0.752
1150	45	0.763
1150	63	0.788
1150	85	0.764
1150	100	0.785

Как видно из представленных данных, для некоторых значений технологических параметров вычисленные значения оптимального относительного шага наложения дорожек близки к значению 0.637, рассчитанному в работе [30], при аппроксимации профиля sin-сегментом. Однако большинство значений при других технологических параметрах отличается от этого значения. Это говорит о том, что профиль, аппроксимированный в работе [30], представляет собой частный случай и относится к вполне определенному материалу и технологическим параметрам наплавки, а при другом их выборе оптимальный шаг наложения дорожек будет другим.

4. Аппроксимация сечения дорожки при моделировании нанесения покрытия методом дискретных элементов

Метод дискретных элементов (Discrete Element Method, DEM) основан на описании динамики частиц с использованием уравнений классической механики. В настоящее время этот метод находит широкое применение при моделировании процессов, связанных с перемещением сыпучих сред, а также механических процессов в твердых дисперсных системах [31,32]. В связи с развитием аддитивных технологий появились работы, посвященные моделированию этим методом 3D-печати с использованием порошкообразных металлических порошков [33-35]. Данная технология, по сути, является разновидностью лазерной наплавки. В этой связи представляется перспективным использование метода DEM в дополнение к существующим методам моделирования термического нанесения порошкообразных покрытий, основанных на использовании гидродинамики сплошных сред [13,17,18]. Подробное рассмотрение данного вопроса выходит за рамки настоящей работы, поэтому в настоящем разделе мы лишь приведем небольшой пример, иллюстрирующий возможности использования предложенного подхода для аппроксимации профиля сечения пятна напыления при моделировании его методом DEM.

В основе метода дискретных элементов лежит численное решение уравнений 2-го закона Ньютона (59), (60) применительно к ансамблю твердых частиц массами m_i

$$m_i \frac{d^2}{dt^2} r_i = F_i + m_i g, \quad (59)$$

$$I_i \frac{d}{dt} \omega_i = T_i, \quad (60)$$

где g_i , радиус-вектор i -ой частицы, F_i , – вектор силы, действующей на данную частицу со стороны остальных, g – вектор массовых сил, действующих на частицу (например, вектор силы тяжести), I_i – момент инерции частицы, ω_i – вектор угловой скорости частицы, T_i – полный вращательный момент частицы.

В настоящей работе мы рассматриваем только контактные взаимодействия сферических частиц, так что векторы сил F_i и моментов T_i вычисляется суммированием по всем контактным взаимодействиям

$$F_i = \sum F_i^c, \quad (61)$$

$$T_i = \sum (l_i^c \times F_i^c + q_i^c), \quad (62)$$

где первый член в скобках в правой части отвечает контактным моментам, обусловленным сдвиговыми (касательными взаимодействиями), а q_i^c – векторы контактных моментов, не связанных с тангенциальными силами, то есть возникающие при качении и повороте относительно нормали, соединяющей частицы.

Силы контактного взаимодействия могут быть представлены в виде суммы нормальных и касательных составляющих

$$F_i^c = F_i^n n + F_i^t t, \quad (63)$$

где n , t – единичные векторы нормали и касательной в точке контакта.

Поскольку взаимодействующие частицы находятся при температурах, близких к температурам плавления соответствующих материалов, взаимодействие описывается уравнениями вязкоупругости [36].

Силы вязкоупругости описываются в рамках линейной модели

$$F^n = k^n \delta + \gamma^n v^n, \quad (64)$$

$$F^t = k^t \xi + \gamma^t v^t, \quad (65)$$

где k^n , k^t – коэффициенты нормальной и сдвиговой жесткости, соответственно, γ^n , γ^t – коэффициенты потерь при нормальной и касательной деформации, соответственно, v^n , v^t – относительные скорости частиц в направлении нормали и касательной, δ , ξ – нормальная и касательная деформации в точке контакта.

В рамках модели вязкоупругости рассчитывается время контакта частиц

$$t_c = \frac{\pi}{\omega}, \quad (66)$$

где $\omega = \sqrt{k^n/m_{ij} - \eta_0^2}$ – собственная частота колебаний, $\eta_0 = \frac{\gamma^n}{m_{ij}}$ – коэффициент демпфирования, $m_{ij} = m_i m_j / (m_i + m_j)$ – приведенная масса частиц.

Время контакта используется для вычисления коэффициента восстановления скорости, представляющего собой отношение скоростей частицы после и до столкновения

$$e_t = -v'/v = \exp(\eta_0 t_c). \quad (67)$$

В настоящей работе использовалась реализация метода DEM в программном комплексе YADE [37]. Программный код, моделирующий процесс нанесения порошкообразного покрытия, написан на алгоритмическом языке Python с использованием библиотеки numpy [38].

Основа детали моделировалась системой регулярно уложенных сферических частиц диаметром $6 \cdot 10^{-5}$ м, закрепленных в плоскости XOY. Порошок представлял собой полидисперсные сферические частицы с равномерным распределением по размерам со средним радиусом $5 \cdot 10^{-5}$ м и относительным стандартным отклонением 0.3.

Физические свойства материала частиц и основы были приняты соответствующими стали: модуль Юнга $200 \cdot 10^9$ Па, коэффициент Пуассона 0.3, плотность $7.9 \cdot 10^3$ кг/м³, значение угла трения частиц 0.5, коэффициенты вязкоупругого восстановления скорости в нормальном и тангенциальном направлении были приняты равными со значениями для основы равными 0.3, а для частиц 0.001, что отвечает практически полностью вязкому соударению.

Начальные координаты частиц были распределены по высоте на расстоянии от основы $5R_p$, где R_p – радиус частицы. Распределение начальных координат частиц в плоскости XOY было принято нормальным со средним значением 0 и стандартным отклонением, зависящим от размера частиц. Начальная скорость для всех частиц была принята одинаковой и равной (0,0,-100) м/с.

В силу того, что соударения рассматривались практически полностью как вязкие, движение частиц в основном прекращалось после соударений с основой и неподвижными частицами, находящимися на ней. После окончания интегрирования уравнений движения и остановки частиц для каждой частицы было вычислено относительное расстояние от оси OZ и расстояние до плоскости XOY. Таким образом был получен нормированный одномерный профиль сечения, который аппроксимировали двумя функциями: биквадратичной и дробно квадратичной. Результаты аппроксимации показаны на рисунке 21. Биквадратичная функция аппроксимирует внешний контур профиля, а дробно-квадратичная проходит несколько глубже по сечению профиля. Следует отметить неоднородность распределения центров частиц по профилю, что объясняется тем, что частицы на самом деле имеют разные размеры, точки на рисунке символизируют лишь их центры.

В целом процесс нанесения порошкообразного покрытия можно рассматривать как состоящий из нескольких стадий, протекающих последовательно. На первой стадии твердые и частично расплавленные частицы образуют рыхлый контур дорожки. Далее происходит сплавление частиц, образующих этот контур. В ходе этой стадии плотность контура увеличивается, а размеры профиля сокращаются. Метод моделирования DEM позволяет описать только первую стадию.

Для того чтобы последовательно описать весь процесс необходимо использовать многоуровневые теоретические модели. Так согласно [39] методом дискретных элементов описывается формирование первичной структуры покрытия, методом Монте-Карло описывается адсорбция излучения сформировавшимся контуром, методом конечных элементов (FEM) или конечных объемов описывается гидродинамика, теплопередача и механика сплавления частиц и подложки и формирование окончательной структуры дорожки. Рассмотрение всех этих процессов в совокупности выходит за рамки настоящего исследования, в котором мы ограничиваемся лишь демонстрацией возможностей аппроксимации профиля дорожки на разных стадиях формирования покрытия.

5. Моделирование распределения температуры методом конечных элементов при формировании сечения дорожки

В отличие от метода дискретных элементов, в котором рассматривается конкретная структура дисперсных частиц, формирующих структуру покрытия, в методах континуальной механики и термодинамики данная структура рассматривается как непрерывная сплошная среда, обладающая некоторыми усредненными свойствами. При этом выделяется характерный размер системы, в пределах которого материал считается или однородным с постоянным значением физических констант, или таким, в котором значения этих констант изменяются непрерывным образом [40]. На масштабах, превышающих этот размер, дискретная структура среды может учитываться явно введением подвижных или неподвижных границ раздела.

Эволюция состояний системы описывается дифференциальными уравнениями в частных производных второго порядка, являющимися фактически математической формулировкой основных физических законов природы [41-43]:

- 1) Уравнение неразрывности (математическая формулировка закона сохранения массы)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0, \quad (68)$$

- 2) Уравнение движения (математическая формулировка закона сохранения импульса)

$$\rho \frac{dv}{dt} - \nabla \cdot \sigma - \rho g = 0, \quad (69)$$

- 3) Уравнение энергии (математическая формулировка закона сохранения энергии)

$$\rho \frac{du}{dt} = \sigma : D - \nabla \cdot q + \rho r, \quad (70)$$

где ρ – плотность среды, v – вектор скорости среды, σ – тензор напряжений, D – тензор скоростей деформации, g – вектор массовых сил, u – плотность внутренней энергии, q – вектор теплового потока, r – массовая плотность тепловых источников (стоков).

Физические свойства конкретной среды, определяющие связь между тензорами напряжений и деформаций (скоростей деформаций) для конкретного материала задаются с помощью уравнений состояния (определяющих уравнений). Простейшей моделью твердого тела являются анизотропное линейно-упругое тело, уравнение состояния которого в компонентной записи имеет вид

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}, \quad (71)$$

где ε_{ij} – тензор деформаций, C_{ijkl} – тензор четвертого ранга коэффициентов упругости.

Простейшей моделью жидкости является так называемая ньютоновская жидкость, уравнение состояния которой имеет вид

$$\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + \eta \delta_{ij} D_{kk} + 2\tau D_{ij}, \quad (72)$$

где p – давление, D_{ij} – тензор скоростей деформации, η , τ – коэффициенты вязкости, δ_{ij} – тензор Кронекера.

Для того чтобы математически задача поиска неизвестной функции (например, вектора перемещений или скоростей) в результате решения уравнений

(68)-(72) была корректно сформулирована, их необходимо дополнить соответствующими начальными и граничными условиями. Начальные условия используются при решении нестационарных задач и определяют распределение неизвестной функции в точках исследуемой области среды в начальный момент времени. Граничные условия задают значения неизвестной функции и/или ее производных на границах области.

Решение уравнений механики сплошной среды в большинстве случаев осуществляется численными методами [44], среди которых наиболее популярным в настоящее время является метод конечных элементов [45, 46], который был использован в настоящей работе. Схема модели – основы с покрытием для решения задачи в двумерной постановке с разбивкой на сетку треугольных конечных элементов показана на рисунке 22. Расчеты были выполнены для профилей сечения покрытий, полученных при аппроксимации экспериментальных данных, описанных в разделе 3. При разбиении геометрической модели на сетку конечных элементов, контуры дорожки и блока основы разбивались на 30 отрезков, что обеспечивало достаточный уровень сгущения сетки в области дорожки.

Мы ограничимся исследованием распределения температуры при охлаждении дорожки после ее формирования. В этом случае из основных уравнений механики сплошной среды достаточно решения только уравнения энергии (70), которое для неподвижной среды сводится к уравнению теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \Delta T \text{ в области } \Omega \times]0, t_{end}[, \quad (73)$$

где $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – коэффициент температуропроводности, λ – теплопроводность, c – теплоемкость среды.

В качестве основы в настоящей работе рассматривалась сталь, а в качестве покрытия хромо-никелевый сплав. Значения коэффициентов температуропроводности материалов для основы и покрытия были приняты равными, соответственно, $7.97E-06$ и $5.89E-06$ м²/с на основе справочных данных, приведенных в [47].

Начальные условия отвечают распределению температуры в точках среды в начальный момент времени $T(x, 0) = T_0(x)$ в Ω . В нашем случае область Ω состоит из двух областей $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$, где Ω_1 – область основы, Ω_2 – область покрытия. Начальные температуры в областях Ω_1 и Ω_2 были приняты постоянными и равными 25 °C для основы и 1400 °C для покрытия. Начальная температура для покрытия имеет близкое значение к температуре затвердевания хромо-никелевого сплава, а также стали в области подплавки, что соответствовало цели исследования.

В качестве граничных условий использовались следующие.

- 1) Условие симметрии на границах $\partial\Omega_{11}$, $\partial\Omega_{14}$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 . \quad (74)$$

- 2) Постоянная температура (термостат) на границе $\partial\Omega_{15}$

$$T(x, t) = \mu(t) = T_c, T_c = 25^\circ\text{C}. \quad (75)$$

- 3) Теплоотдача по закону Ньютона-Рихмана на границах $\partial\Omega_{12}$, $\partial\Omega_2$, $\partial\Omega_{13}$

$$\alpha \frac{\partial T}{\partial n} + \alpha(T - T_e) = 0, \quad (76)$$

где α – коэффициент теплоотдачи в воздух, T_e – равновесная температура воздуха.

При численном решении уравнения теплопроводности для производной температуры по времени использовалась разностная аппроксимация

$$\frac{T^{m+1} - T^m}{\tau} = a \Delta T^{m+1} \text{ в } \Omega. \quad (77)$$

Для граничных условий использовалась аппроксимация

$$\alpha \frac{\partial T^{m+1}}{\partial n} + \alpha(T^{m+1} - T_e) = 0 \text{ на границах } \partial\Omega_{12}, \partial\Omega_2, \partial\Omega_{13}, \quad (78)$$

$$T^{m+1}(x) = \mu^{m+1} \text{ на границе } \partial\Omega_{15}. \quad (79)$$

С учетом аппроксимаций вариационная постановка для уравнения теплопроводности принимает вид

$$\int_{\Omega} \left\{ \frac{T^{m+1} - T^m}{\tau} v + a \nabla T^{m+1} \cdot \nabla v \right\} + \int_{\partial\Omega_{15}} \mu^{m+1} v + \int_{\partial\Omega_2 \cup \Omega_{12} \cup \Omega_{13}} \alpha (T^{m+1} - T_e) v = 0, \quad (80)$$

где $v \in H^1(\Omega)$ – некоторая произвольная функция.

Программный код для решения задачи написан в пакете FreeFEM [48].

На рисунке 23 приведены рассчитанные профили распределения температуры по сечению дорожки для трех наборов параметров сечений из числа приведенных в таблице 2, различающихся значениями мощности лазера P , удельного расхода порошка s , и, соответственно, площадью сечения. На рисунке 24 представлены зависимости температуры от времени в центральной точке сечения с координатами (0,0) для значений параметров P и s , приведенных на рисунке 23. Как видно, с увеличением площади сечения скорость остывания дорожки закономерно уменьшается, что вполне ожидаемо с физической точки зрения. Важно отметить, что, поскольку в разделе 3.2 были показаны возможности прогнозирования профиля сечения дорожки, использование математической модели (50) зависимости параметров профиля сечения дорожки от технологических параметров ее нанесения совместно моделью (80) позволяет прогнозировать распределение температуры в сечении дорожки для разных условий наплавки. Эта задача актуальна при расчете оптимальных условий формирования покрытия при параллельном нанесении дорожек, поскольку качество покрытия между смежными дорожками в значительной мере зависит от распределения температур в данной области. В этом случае расчет распределения температуры в первой из смежных дорожек используется в качестве начального условия при расчете второй дорожки.

Заключение

Таким образом, предложенная в работе методика, с одной стороны является физически обоснованной, поскольку опирается на теорию подобия и размерностей, а с другой стороны позволяет описать более широкий класс профилей сечений первичного пятна напыления при газотермическом и лазерном нанесении порошкового покрытия по сравнению с используемыми в настоящее время функциями. Использование предложенной методики при разработке программ для станков с ЧПУ плазменного и лазерного напыления позволит увеличить точность описания профиля сечения за один проход рабочей головки распылителя,

чем достигается более высокая чистота поверхности детали, а также экономия материалов покрытия.

В настоящей работе предложен метод аппроксимации профиля сечения дорожки – пятна напыления, формирующейся при газотермическом нанесении, а также при лазерной наплавке порошковых покрытий, основанный на использовании теории подобия и размерностей. В отличие от известных аппроксимирующих функций, применяемых для описания профиля сечения пятна напыления, предлагаемый подход обладает универсальностью и позволяет описать более широкий класс профилей сечений, встречающихся в технологической практике. Преимуществом предлагаемого подхода является возможность его использования при создании математических моделей прогнозирования характеристик покрытия в зависимости от технологических параметров его нанесения. В качестве примеров таких моделей рассмотрены уравнения параболической регрессии, описывающие зависимость удельной эффективности лазерной наплавки и коэффициента подплавления основы от мощности лазера и удельного расхода порошка при лазерной наплавке порошкообразного материала.

Использование предложенной методики при разработке программ для станков с ЧПУ плазменного и лазерного напыления позволит увеличить точность описания профиля сечения за один проход рабочей головки распылителя, чем достигается более высокая чистота поверхности детали, а также экономия материалов покрытия. Для иллюстрации этого предложена методика выбора оптимального шага наложения дорожек.

Показана возможность использования предложенных аппроксимирующих функций при моделировании процесса напыления порошкообразного методом дискретных элементов и численном решении задачи о распределении температуры в формирующемся покрытии методом конечных элементов.

Литература

1. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление. Пер. с яп. В.Н. Попова / под ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
2. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. М.: Металлургия, 1992. 432 с.
3. Газотермическое напыление / под общей ред. Л.Х. Балдаева. М.: Маркет ДС, 2007. 344 с.
4. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Е. Баумана, 2008. 360 с.
5. Davis J.R. Handbook of thermal spray technology. ASM International, 2004. 338 p.
6. Mazumder J., Dutta D., Kikuchi N., Ghosh A. Closed loop direct metal deposition: Art to part // Optics and Lasers in Engineering. 2000. V.34 No4. P. 397-414. doi:10.1016/S0143-8166(00)00072-5.
7. Ocelík V., de Oliveira U., De Hosson J.Th.M. Thick tool steel coatings with laser cladding // WIT Transactions on Engineering Sciences. 2007. V.55. 22 p. doi:10.2495/SECM070021.
8. Donadello S., Motta M., Demir A.G., Previtali B. Monitoring of laser metal deposition height by means of coaxial laser triangulation // Optics and Lasers in Engineer-

- ing. 2019. V. 112. No 1. P. 136-144 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.09.012>.
9. Pierson H.O. Handbook of chemical vapor deposition (CVD). Principles, Technology, and Applications. New York: William andrew publishing, 1999. 506 p.
 10. De Oliveira U., Ocel'k V., De Hosson J.Th.M. Analysis of coaxial laser cladding processing conditions // Surface & Coatings Technology. 2005. V.197. P. 127-136 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.06.029>.
 11. Jhavar S., Jain N.K., Paul C.P. Development of micro-plasma transferred arc (μ -PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications // Journal of Materials Processing Technology. 2014. V.214. P.1102-1110 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.12.016>.
 12. Jhavar S., Jain N.K., Paul C.P. Enhancement of Deposition Quality in Micro-plasma Transferred Arc Deposition Process // Materials and Manufacturing Processes. 2014. V.29. P. 1017-1023. DOI: 10.1080/10426914.2014.892984.
 13. Pinkerton A.J. Advances in the modeling of laser direct metal deposition // Journal of Laser Applications. 2015. V.27. S15001 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.2351/1.4815992>.
 14. Jain N.K., Sawant M.S., Nikam S.H., Jhavar S. Metal Deposition: Plasma-Based Processes. Encyclopedia of Plasma Technology. New York: Taylor and Francis, 2016. P. 19. DOI:10.1081/E-EPLT-120053919.
 15. Sawant M.S., Jain N.K. Evaluation of stellite coatings by μ -PTA powder, laser, and PTA deposition processes // Materials and Manufacturing Processes. 2017. V. 33:10. P. 1043-1050 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2017.1364764>.
 16. Yu T., Yang L., Zhao Yu., Sun J., Li B. Experimental research and multi-response multi-parameter ptimization of laser cladding Fe313 // Optics and Laser Technology. 2018. V.108. P.321-332 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.06.030>.
 17. Kovalev O.B., Bedenko D.V. Development and application of laser cladding modeling technique: from coaxial powder feeding up to the surface deposition and bead formation // Applied Mathematical Modelling. 2018. V. 57. P. 339-359 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.09.043>.
 18. Khamidullin B.A., Tsvil'skiy I.V., Gorunov A.I., Gilmutdinov A.Kh. Modeling of the effect of powder parameters on laser cladding using coaxial nozzle // Surface & Coatings Technology. 2019. V.364. P. 430-443 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.12.002>.
 19. Zhang W., DebRoy T., Palmer T.A., Elmer J.W. Modeling of ferrite formation in a duplex stainless steel weld considering non-uniform starting microstructure // Acta Materialia. 2005. V. 53. P.4441-4453. doi:10.1016/j.actamat.2005.05.040.
 20. Alaluss K., Mayr P. Additive Manufacturing of Complex Components through 3D Plasma Metal Deposition – A Simulative Approach // Metals. 2019. V.9. P.574-693. doi:10.3390/met9050574.
 21. Nikam S.H., Jain N.K. 3D-finite element simulation and image processing based prediction of width and height of single-layer deposition by micro-plasma-

- transferred arc process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. V. 95. P.3679-3691 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1472-x>.
22. Shen C., Li C., Guo Y., Liu C., Zhang X., Feng X. Modeling of temperature distribution and clad geometry of the molten pool during laser cladding of TiAlSi alloys // Optics & Laser Technology. 2021. V.142. P.107277-15 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107277>.
 23. Ocelik V., Nenadl O., Palavra A., De Hosson J.Th.M. On the geometry of coating layers formed by overlap // Surface & Coatings Technology. 2014. V. 242. P.54-61 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.01.018>.
 24. Кирпичев М.В. Теория подобия. М.: Изд-во АН СССР, 1953. 99 с.
 25. Бриджмен П. Анализ размерностей. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 148 с.
 26. Ногид Л.М. Теории подобия и размерностей. Ленинград: Судпромгиз, 1959. 97 с.
 27. Li Y., Ma J. Study on overlapping in the laser cladding process // Surface and Coatings Technology. 1997. V. 90. P.1-5 [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(96\)03022-8](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(96)03022-8).
 28. Aiyiti W., Zhao W., Lu B., Tang Y. Investigation of the overlapping parameters of MPAW-based rapid prototyping // Rapid Prototyping Journal. 2006. V.12. No 3 P. 165-172.
 29. Suryakumar S., Karunakaran K.P., Bernard A., Chandrasekhar U., Raghavender N., Sharma D. Weld bead modeling and process optimization in Hybrid Layered Manufacturing // Computer-Aided Design. 2011. V.43. P.331-344 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2011.01.006>.
 30. Cao Y., Zhu S., Liang X., Wang W. Overlapping model of beads and curve fitting of bead section for rapid manufacturing by robotic MAG welding process // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2011. V.27. P.641-645 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2010.11.002>.
 31. Jing L., Stephansson O. Fundamentals of Discrete Element Methods for Rock Engineering: Theory and Applications. Elsevier, 2007. 545 p.
 32. Onate E., Owen D. R. J. Particle-Based Methods: Fundamentals and Applications. Computational Methods in Applied Sciences. Springer. 2011. V.25. 267 p.
 33. Steuben J.C., Iliopoulos A.P., John G. Michopoulos J.G. Discrete element modeling of particle-based additive manufacturing processes // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2016. V. 305. No15. P. 537-561.
 34. Haeri S., Wang Y., Ghita O., Sun J. Discrete element simulation and experimental study of powder spreading process in additive manufacturing // Powder Technology. 2016. V. 306. P. 45-54.
 35. Chen H., Sun Y., Yuan W., Pang S., Yan W., Shi Y. A Review on Discrete Element Method Simulation in Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing // Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers. 2022. V.1. 100017 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.cjmeam.2022.100017>.

-
36. Luding S. Introduction to discrete element methods // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2011. V.12. No7-8. P.785-826 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2008.9693050>.
37. Smilauer V. et al. Yade Documentation 3rd ed. The Yade Project, 2021. 878 p. DOI:10.5281/zenodo.5705394. <http://yade-dem.org>.
38. Harris, C.R., Millman, K.J., van der Walt, S.J. et al. Array programming with NumPy. *Nature* 2020. V. 585. P. 357-362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2.
39. Markl M., K?rner C. Multiscale Modeling of Powder Bed-Based Additive Manufacturing // *Annual Review of Materials Research*. 2016. V. 46. P. 93-123 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070115-032158>.
40. Бахвалов Н.С. Панасенко Г.П. Осреднение процессов в периодических средах. Математические задачи механики композиционных материалов. М.: Наука, 1984. 352 с.
41. Седов Л.И. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1970. Т. 1. 492 с. Т. 2. 568 с.
42. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. М.: Изд-во МГУ, 1971. 248 с.
43. Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н., Математические модели термомеханики. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 168 с.
44. Победря Б.Е. Численные методы в теории упругости и пластичности. М.: Изд-во МГУ, 1995. 366 с.
45. Hutton D.V. Fundamentals of finite element analysis. New York: McGraw-Hill, 2004. 505 p.
46. Smith L.M., Griffiths D.V. Programming the finite element method. John Wiley & Sons, 1988. 478 p.
47. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М.: Атомиздат, 1968. 484 с.
48. Hecht F. FreeFEM Documentation. Release 4.6. Paris: Sorbonne University, 2021. 673 p. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://freefem.org/>.
-

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 28.09.2022
Формат В5
Печать офсетная. Усл.печ.л. 10,5
Тираж 500 экз.
Заказ № 91-07
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