

Проект SWORLD



Макарова И.В., Семенцов Т.Н., Червоный И.Ф. и др.

НАУКА И ИННОВАЦИИ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ: ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

входит в РИНЦ SCIENCE INDEX

присвоен DOI: 10.21893/978-617-7414-01-7-2

МОНОГРАФИЯ

Книга 2

Одесса
Куприенко СВ
2017

УДК 001.895

ББК 94

Н 34

Авторский коллектив:

Веркин Е.Н. (3), Габдрахманова К.Ф. (10.), Галиакбаров Р.Н. (3),
Головко А.К. (7), Данилів А.Р. (9), Зибров В.А. (5),
Зиброва Н.М. (5), Ковшов С.В. (6), Копистинський Л.О. (9),
Кочкова Н.В. (2), Маврин В.Г. (3), Макарова И.В. (3),
Михалевський Д.В. (8), Поляков А.Л. (3), Решенкин А.С. (2),
Семенцов Г.Н. (9), Сидоркина Н.М. (2), Строителева Н.И. (7),
Тихомиров Д.А. (2), Тюлевин С.В. (1.), Флоренсов А.Н. (4.),
Червоный И.Ф. (7), Шубенкова К.А. (3)

Н 34 **Наука и инновации в современном мире: техника и технологии. В 3 книгах. К 2.: монография / [авт.кол. : Макарова И.В., Семенцов Г.Н., Червоный И.Ф. и др.]. – Одесса: КУПРИЕНКО СВ, 2017 – 175 с. : ил., табл.**
ISBN 978-617-7414-01-7

Монография содержит научные исследования авторов в области техники и технологий. Может быть полезна для инженеров, руководителей и других работников предприятий и организаций, а также преподавателей, соискателей, аспирантов, магистрантов и студентов высших учебных заведений.

**УДК 001.895
ББК 94
DOI: 10.21893/978-617-7414-01-7-2**

© Коллектив авторов, 2017
© Куприенко С.В., оформление, 2017

ISBN 978-617-7414-01-7



Монография подготовлена авторским коллективом:

1. *Веркин Евгений Николаевич*, Казанский Федеральный Университет, Отделение информационных технологий и энергетических систем, кафедра системного анализа и информатики, аспирант - Глава 3. (в соавторстве)
2. *Габдрахманова Клара Фаткуллиновна*, кандидат педагогических наук - Глава 10.
3. *Галиакбаров Рустам Ниязович*, Казанский Федеральный Университет, Отделение информационных технологий и энергетических систем, кафедра системного анализа и информатики, аспирант - Глава 3. (в соавторстве)
4. *Головко Александр Константинович*, Запорізька державна інженерна академія, Кафедра електроники и информационных технологий, аспирант - Глава 7. (в соавторстве)
5. *Данилев А.Р.*, студент - Глава 9. (в соавторстве)
6. *Зибров Валерий Анатольевич*, Донской государственный технический университет, Кафедра "Информационные системы и технологии", кандидат технических наук, доцент - Глава 5. (в соавторстве)
7. *Зиброва Наталья Михайловна*, Донской государственный технический университет, Кафедра "Экономика и менеджмент", кандидат экономических наук - Глава 5. (в соавторстве)
8. *Ковшов Станислав Вячеславович*, Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В.Плеханова, Безопасности производств, кандидат технических наук - Глава 6. (в соавторстве)
9. *Копистинський Л.О.*, аспирант - Глава 9. (в соавторстве)
10. *Кочкова Наталья Владимировна*, Донской государственный технический университет, Институт технологии (филиал) кафедра технического сервиса и информационных технологий, кандидат технических наук, доцент - Глава 2. (в соавторстве)
11. *Маврин Вадим Геннадьевич*, Казанский Федеральный Университет, Автомобильное отделение, кафедра сервиса транспортных систем, кандидат технических наук, доцент - Глава 3. (в соавторстве)
12. *Макарова Ирина Викторовна*, Казанский Федеральный Университет, Автомобильное отделение, кафедра сервиса транспортных систем, доктор технических наук, профессор - Глава 3. (в соавторстве)
13. *Михалевський Дмитро Валерійович*, Винницкий національний технічний університет, Каф. ТКСТБ, кандидат технических наук, доцент - Глава 8.
14. *Поляков Андрей Леонидович*, Казанский Федеральный Университет, Автомобильное отделение, кафедра сервиса транспортных систем, магистр, - Глава 3. (в соавторстве)
15. *Решенкин Андрей Станиславович*, Донской государственный технический университет, Институт технологии (филиал) кафедра технического сервиса и информационных технологий, кандидат технических наук, профессор - Глава 2. (в соавторстве)
16. *Семенцов Георгий Никифорович*, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, кафедра АКГТ, доктор технических наук, профессор - Глава 9. (в соавторстве)
17. *Сидоркина Наталья Михайловна*, Донской государственный технический университет, Институт технологии (филиал), кафедра технического сервиса и информационных технологий, кандидат технических наук, доцент - Глава 2. (в соавторстве)
18. *Строителева Нина Ивановна*, Запорізька державна інженерна академія, Кафедра електроники и информационных технологий, кандидат технических наук, доцент - Глава 7. (в соавторстве)
19. *Тихомиров Дмитрий Александрович*, Донской государственный технический университет, кафедра "Автосервис", студент, - Глава 2. (в соавторстве)
20. *Тюлевин Сергей Викторович*, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева, кандидат технических наук, доцент - Глава 1.
21. *Флоренсов Александр Николаевич*, Омский государственный технический университет, Кафедра Информатика и вычислительная техника, кандидат технических наук, доцент - Глава 4.
22. *Червоный Иван Федорович*, Запорізька державна інженерна академія, доктор технических наук, профессор - Глава 7. (в соавторстве)
23. *Шубенкова Ксения Андреевна*, Казанский Федеральный Университет, Автомобильное отделение, кафедра сервиса транспортных систем, соискатель, ст. преп - Глава 3. (в соавторстве)



Содержание

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ БОРТОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Введение.....	7
1.1. Анализ отказов космических РЭС.....	9
1.1.1. Методы анализа отказов.....	9
1.1.2. Отказы ЭРИ в составе космических РЭС.....	11
1.1.3. Отказы космических радиоэлектронных систем.....	13
1.1.4. Физико-технический анализ отказов электрорадиоизделий.....	13
1.1.5. Определение критичных ЭРИ.....	14
1.1.6. Математическая модель наиболее критичного элемента бортового радиотехнического устройства.....	20
1.1.7. Выбор ЭРИ для космических РЭС.....	24
1.2. Индивидуальное прогнозирование.....	24
1.2.1. Типы прогнозирования.....	24
1.2.2. Структурная модель ИП.....	26
Выводы.....	30

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ МАГНИТОШУМОВОГО КОНТРОЛЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА

Введение.....	31
2.1. Идентификация состояния ферромагнитных материалов после термической обработки.....	31
2.2. Статистическая оценка параметров микроструктуры конструкционных сталей.....	34
2.3. Экспериментальные оценки взаимосвязи структурного состояния конструкционных материалов с информативными параметрами магнитного шума.....	42
Выводы.....	49

ГЛАВА 3. УПРАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА АВТОМОБИЛЕСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Введение.....	51
3.1. Методы и модели управления процессами поточного производства..	51
3.1.1. Методы и модели совершенствования поточного производства.	51
3.1.2. Показатели оценки эффективности оборудования.....	52
3.2. Применение моделирования в совершенствовании технологических процессов управления автомобилестроительного предприятия.....	54
3.2.1. Методы и результаты исследования.....	54
Выводы.....	68



ГЛАВА 4. КИБЕРНЕТИЧЕСКИЕ И ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНЫЕ ОСНОВАНИЯ ДИНАМИКИ РОССИИ

Введение.....	69
4.1. Постановка задачи об естественнонаучных основаниях.....	70
4.2. Теоретические основания применения кибернетического подхода.....	70
4.3. Уникальная специфика природных оснований.....	73
4.4. Естественнонаучные основания многонациональности России.....	75
4.5. Последствия объективной обусловленности многонациональности.....	78
4.6. Кибернетические механизмы регулирования.....	79
Выводы.....	82

ГЛАВА 5. АКУСТИЧЕСКИЙ СТРУКТУРНЫЙ МОНИТОРИНГ ВОДОПРОВОДОВ

Введение.....	83
5.1. Распространение акустической волны внутри водопровода.....	85
5.1.1. Зондирующий датчик внутри трубы.....	85
5.1.2. Зондирующий датчик в подземной трубе.....	90
5.2. Зондирующие датчики.....	95
Выводы.....	97

ГЛАВА 6. БИОГАЗВЕРМИТЕХНОЛОГИЯ КАК ФАКТОР РОСТА ЭНЕРГЕТИЧЕКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РЕГИОНА

Введение.....	99
6.1. Биогаз и биогазвермитехнология.....	99
6.2. Вермитехнологический компонент.....	102
6.3. Потенциал вермитехнологии в обеспечении экологической безопасности.....	104
6.4. Анализ возможностей биогазвермитехнологии в условиях г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области.....	108
Выводы.....	112

ГЛАВА 7. О ВЛИЯНИИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ТРАНСФОРМАЦИИ МИКРОДЕФЕКТОВ В МОНОКРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ

Введение.....	113
7.1. Современная классификация микродефектов в монокристаллическом кремнии.....	113
7.2. Влияние тепловых условий выращивания монокристаллов.....	114
7.3. Влияние радиационной обработки монокристаллов.....	116
7.4. Влияние магнитных полей.....	119
7.5. Механизмы трансформации микродефектов.....	120
7.6. Влияние туннельного эффекта кристаллизации.....	122
Выводы.....	123



ГЛАВА 8. ОСОБЛИВОСТІ КАНАЛЬНОГО ТА ФІЗИЧНОГО РІВНІВ ТЕХНОЛОГІЙ МІМО ДЛЯ СТАНДАРТУ 802.11

Вступ.....	125
8.1. Постановка задачі.....	125
8.2. Мета та задачі дослідження.....	126
8.3. Особливості МІМО у стандарті 802.11.....	126
8.4. Математична модель МІМО каналу.....	128
8.5. Структура кадру канального рівня.....	130
8.6. Інформаційний елемент узгодження.....	131
Висновки.....	135

ГЛАВА 9. АНАЛІЗ МУЛЬТИКОЛІНЕАРНОСТІ НЕЗАЛЕЖНИХ ЗМІННИХ ТА ЇЇ ВПЛИВУ НА ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ БАГАТОВИМІРНИХ ОБ'ЄКТІВ

Вступ.....	137
9.1. Ознаки явища мультиколінеарності та аналіз сучасних методів їх виявлення.....	138
9.2. Критерії та алгоритми, що застосовуються для виявлення МК.....	139
9.3. Аналіз мультиколінеарності показників процесу буріння нафтових і газових свердловин електробурами.....	140
Висновки.....	149

ГЛАВА 10. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ СТАТИСТИКА КАК СРЕДСТВО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА

Введение.....	150
10.1. Анализ литературных данных в постановке проблемы.....	150
10.2. Цель и задачи исследования.....	151
10.3. Результаты исследований. Геолого – промысловые исследования приобского месторождения.....	151
10.4. Эффективность технологии многостадийного ГРП.....	159
Выводы.....	161



ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ БОРТОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Введение

Разработка теории и техники интеллектуальных систем потребовала создания новых информационных технологий, а также новых технических средств микромеханики и микроэлектроники [1].

Современный этап развития радиоэлектроники характеризуется обострением проблемы надежности вследствие усложнения радиоэлектронных средств (РЭС), выражаящемся как в резком увеличении количества используемых элементов и блоков, в появлении качественно новых ответственных функций, возлагаемых человеком на аппаратуру, так и в расширении условий работы. Аппаратуре различного назначения приходится действовать в условиях интенсификации режимов работы и выполнять различные функции [2]. В силу этих причин повышаются требования к точности и эффективности выполнения заданных функций не только системой в целом, но и каждым отдельным элементом.

В наиболее жестких условиях должна функционировать радиоэлектронная аппаратура (РЭА), установленная на борту ракет-носителей и космических аппаратов. Работа в температурном диапазоне $-70\dots+125^{\circ}\text{C}$, наличие вакуума, (98...100) %-ной влажности, вибраций с большими амплитудами и широким спектром частот, линейных ускорений до 20000g, акустических шумов до 165 дБ, многократных ударов, солнечной и космической радиации – все это может привести к увеличению интенсивности отказов в сотни и тысячи раз по сравнению с лабораторными условиями.

Наиболее достоверные и полные показатели надежности обычно получают по результатам эксплуатации аппаратуры. Однако, высокие уровни надежности современных электрорадиоизделий (ЭРИ), их конструктивно-технологическое исполнение, а также специфические особенности их применения не позволяют оперативно получать информацию, необходимую для корректировки технического проекта. Поэтому оценка надежности в условиях эксплуатации сводится к односторонней (нижней) оценке интенсивности отказов элементов и аппаратуры в целом, анализу видов и механизмов отказов. При такой оценке надежности выделяют отказы, обусловленные качеством проектирования и производства ЭРИ и аппаратуры, а также устанавливают эксплуатационные факторы, вызывающие отказы. Информацию, полученную в процессе эксплуатации, можно использовать для изменения конструктивно-технологических вариантов (КТВ) электрорадиоизделий и аппаратуры, корректировки системы управления качеством, а также в новых разработках [3].

Реализация возрастающих требований к качеству и надежности РЭС и ЭРИ обеспечивается постоянным совершенствованием их конструкции, технологии изготовления, методов контроля и испытаний. А также определяющее влияние на надежность скрытых дефектов, не выявляемых существующей системой технологического контроля и приемочных испытаний, определило развитие



работ по исследованию механизмов и причин отказов с использованием методов и средств дефектоскопии и физико-химического анализа.

Однако, несмотря на эффективность работ в этом направлении, сложность и высокая стоимость их выполнения вызвали необходимость поиска и разработки методов и средств выявления скрытых дефектов ЭРИ, соответствующих темпам современного серийного производства. Кроме того, около 30% дефектов и отказов ЭРИ не поддаются контролю с помощью этих методов и средств [4].

В связи с этим получают развитие методы контроля и прогнозирования надежности и других показателей качества по информативным параметрам, которые основываются на предположении о существовании стохастической связи между надежностью и начальными значениями совокупности информативных параметров изделия. Выбор совокупности информативных параметров оказывает решающее влияние на достоверность контроля и прогнозирования и приводит к успешному решению поставленной задачи только в том случае, если в исходном наборе такие параметры содержатся. Обеспечение присутствия информативных параметров в исходном наборе возлагается на исследователя и в большинстве случаев является очень сложной задачей.

Многолетний опыт анализа разработок и эксплуатации изделий ракетно-космической техники (РКТ) был сконцентрирован в последнее время в ряде новых технологий и эффективных методов выявления и устранения основных типов отказов в элементах и узлах на основе неразрушающего выходного контроля изделий, что позволило почти на порядок снизить статистику их отказов при эксплуатации. Поиск дальнейших путей развития достигнутых успехов привел к новой научной задаче - обеспечению устойчивости систем к «лавинным отказам». Дело в том, что в настоящее время особую актуальность в проблеме обеспечения эффективной эксплуатации изделий РКТ приобрели вопросы, связанные не только со «случайными» отказами элементов систем и аппаратуры космического аппарата (КА), но и с системной устойчивостью функционирования в динамических условиях комплексного и длительного воздействия космической среды. При этом, такой учет влияния космической «погоды» при длительной эксплуатации космических систем, как комплексного фактора, оказывающего существенное влияние на целевую эффективность, выдвигает новую важную научно-практическую проблему, которая формирует задачи нового этапа для специальных исследований [5].

Проблема обеспечения устойчивости функционирования КА при длительных космических полетах включает в себя несколько традиционных вопросов частного и общего характера. Так, к числу частных относятся задачи обеспечения надежности элементной базы и стойкости элементов к длительному воздействию внешних факторов и эксплуатационных нагрузок. А к общим вопросам относятся задачи системного характера – защитные меры, принимаемые при конструировании КА для снижения уровня воздействия факторов эксплуатационных нагрузок, и оперативная адаптация характеристик систем и приборного оснащения КА для повышения их устойчивости к



динамике изменения внешних факторов и нагрузок в условиях длительного космического полета. Следует, однако, заметить, что после проблем с рядом КА вопросы обеспечения надежности элементной базы можно отнести к общим.

Таким образом, обеспечение качества и надежности РЭС космического назначения требует широкого внедрения новых методов диагностического неразрушающего контроля. Для их разработки необходимо установить зависимости основных показателей надежности от физических свойств и параметров приборов ЭРИ, от происходящих в них физико-химических процессов, физической природы механизмов отказов [6-11].

Одним из перспективных направлений в разработке эффективных и экономически приемлемых методов оценки качества и надежности РЭС и ЭРИ является индивидуальное прогнозирование (ИП) их будущего состояния [12-15].

Целью данной работы является анализ отказов элементов бортовых РЭС и выявление критичных ЭРИ для ИП.

1.1. Анализ отказов космических РЭС

1.1.1. Методы анализа отказов

Анализ видов и последствий отказов можно проводить структурным, функциональным или комбинированным методом [16-19].

Структурный метод применяют для относительно простых объектов, отказы которых могут быть чётко локализованы, а последствия каждого отказа элементов выбранного начального уровня разукрупнения могут быть прослежены на всех вышестоящих уровнях структуры объекта. Общая схема анализа в этом случае включает следующие основные операции:

- в соответствии с планом устанавливают минимальный уровень разукрупнения, с которого начинают анализ;
- на основе функциональной схемы объекта идентифицируют все элементы выбранного уровня разукрупнения;
- для каждого идентифицированного элемента данного уровня на основе имеющихся классификаторов отказов, инженерного анализа, имеющихся априорных данных, опыта и знаний исследователя составляют перечень возможных видов отказов данного элемента;
- для каждого вида отказов выбранного элемента определяют его возможные последствия на рассматриваемом и следующих уровнях структуры объекта;
- для элементов, отказы которых определённого вида непосредственно приводят к отказу объекта или снижению качества его функционирования, оценивают категорию тяжести последствий отказов или рассчитывают показатели критичности;
- повторяют описанные выше операции последовательно для элементов всех вышестоящих уровней разукрупнения. Последствия отказов элементов нижестоящего уровня, которые не могут быть выражены в виде влияния на функционирование элементов рассматриваемого уровня, рассматривают как самостоятельные виды отказов на этом уровне;
- выделяют отказы, категория тяжести последствий или оценки показателей критичности которых превосходят пределы, установленные планом анализа, а



элементы, соответствующие этим отказам включают в перечень критичных элементов.

Этот метод можно отнести к классу индуктивных. В этом случае анализ проводится «снизу вверх»[16]. При этом для каждого критичного элемента:

- определяют наличие и оценивают достаточность предусмотренных средств и методов обнаружения, локализации и индикации отказов;
- определяют возможные меры, обеспечивающие сохранение работоспособности объекта при возникновении данного отказа (введение резервирования, перестраиваемая структура, изменение алгоритма функционирования) и оценивают целесообразность их введения;
- определяют возможные меры по снижению вероятности отказов (применение в облегчённом режиме, введение защиты от перегрузок, дополнительных проверок и испытаний в процессе изготовления и эксплуатации, введение профилактического обслуживания и плановых замен в эксплуатации и т.п.) и оценивают их эффективность;
- определяют возможные способы предупреждения наиболее опасных последствий отказов (аварийная защита и сигнализация, специальные правила поведения персонала при возникновении отказов и т.п.).

Для сложных многофункциональных объектов, отказы которых трудно априорно локализовать и для которых характерны сложные зависимые отказы, применяют функциональные методы. В этом случае анализ проводится «сверху вниз».

Общая схема анализа для данного варианта включает следующие операции:

- Идентифицируют все функции, выполняемые объектом;
- Для каждой функции на основе априорных данных, опыта исследователя, инженерного анализа и другими доступными способами определяют перечень возможных нарушений (отклонений) данной функции;
- Для каждого нарушения функции оценивают качественно тяжесть возможных последствий этого нарушения или количественно – ожидаемый ущерб;
- Выделяют критические нарушения функции, тяжесть возможных последствий которых или ущерб от которых превосходит пределы, установленные планом анализа;
- Для каждого выделенного критического нарушения, принимая его возникновение в качестве «вершинного события», строят дерево отказов, охватывающее отказы элементов всех уровней разукрупнения, вплоть до нижнего уровня, установленного планом анализа;
- С помощью построенного дерева выделяют единичные элементы, приводящие к критическому нарушению функций изделия, и сочетания элементов, совместные отказы которых ведут к указанному нарушению;
- Оценивают вероятности отказов одиночных элементов и вероятности выделенных комбинаций отказов элементов, с использованием которых рассчитывают показатели критичности соответствующих отказов (сочетаний отказов);
- Составляют перечни критичных элементов.



Для сложных объектов анализ проводят, как правило, комбинированными методами, которые сочетают элементы структурных и функциональных методов.

1.1.2 Отказы ЭРИ в составе космических РЭС

Повышение надежности радиоэлектронной аппаратуры сегодня является одной из важнейших задач, без решения которой невозможно обеспечение ее конкурентоспособности на мировом рынке. Как было установлено ранее, решающий вклад в общее количество отказов РЭС в целом вносят отказы ЭРИ.

Нами был проведен анализ данных по отказам ЭРИ в различных изделиях (за 3 года). Результат анализа представлен в таблице 1.

Таблица 1.

Отказы ЭРИ в различных изделиях

Индекс изделия	Типы отказавших ЭРИ
695	2Д103А (3 шт.); 134ИД6 (3 шт.); ОМЛТ-0,25; Д814В; ММ ФД-00; 249КП1; РЭС-47А; ММ ФД-19; МП 16; РПС-32Б; РПС-36Б; ДП-1-10; 2Т208Е; СФ2-12; 2Т217Г; 2Т324В-1; 505РУ4; РЭС-47 (2 шт.); 134ИД; 2Т324В-1Н; 542НД3; 2Д502А; К52-1А
17Ф12	Б572ПА-1А-1Н; ИМС Д19Н; ТР8; 2Т378Б-1
694	737РУ1-1; МП 12 (3 шт.); 2Т312; разъем РПС1-37; МСБ 4СЯ-20; Д814В; 134ИД6 (2 шт.); Б737РУ1-1; 564ЛЕ5; 765ПУ4-1 (3 шт.); 765ТМ2-1; электродвигатель БК-2414; 1НТ251; 2Д918Г; МП 12; 2Д106А; СП5-3-0,5 Вт-4,7 кОм; 2Д522Б
117	765ИР9-1; 737РУ1-1; 765ЛП13-1; РПС-42Б; 765ИР2-1; 2Т312В; 134ПБ1А; 2Д103А; 765ИР2; РПС-45
116	ТР30Ц5; ММ ИП4-81; конденсатор С12; РПС-43; РЭС-49 (2 шт.); 2Д106А; 2Д103А; Д817Г; 1ГМ305Б; ФД-27; кабель БКС; обрыв провода МГТВ-012; ФД-03; РЭС-47; 2Д522Б
660	2Д103А; 2Т324В-1; 286ЕП1; 2Д901; РЭС-22; 133ЛА8; РЭС-49; 134ЛР2; РПС-45; РПС-43; 1НТ251; Д814Г
11А511У	РЭС-55А; РПС-18/5; П214; 2Т203
8К78М	П214А
12КС	2Д522Б
Л31	2Д918Б-1
11У-2	2Т312Б; 134ИД6; П214; ФД-8К; П102; резистор МГ
511У	ФД-8К; Д814А (2 шт.); 134ИД6 (2 шт.); К77-4Б; разъем ХВП

Также были проанализированы данные (за 1 год) по отказам интегральных микросхем (ИМС) серий 533, К561, 564 с разной приемкой, обнаруженным на различных этапах контроля. Результаты анализа представлены в таблице 2. В таблице 3 приведены результаты анализа отказов ИМС серии 564, полученные по данным, предоставленным различными поставщиками.

По данным, приведенным в таблицах 2, 3, можно сделать лишь



приблизительные выводы в силу ряда причин:

- данные приведены для ИМС с разной приемкой (в связи с различиями в функциональном назначении ИМС);
- различаются также объемы поставок;
- эти данные признаны поставщиками, что не гарантирует их достоверности;
- лишь в перечисленных случаях удалось идентифицировать отказ и провести физико-технический анализ причин его возникновения.

Из вышесказанного следует, что в данном случае необходимо проведение дополнительных исследований.

Таблица 2.

Серия	Вид приемки	Этап контроля	Объем брака
533	ОС	ВПК	0,002 %
533	ПЗ	ВПК	0,02 %
К561	ОТК	ВПК	0,96 %
564	ПЗ	ВПК	0,024 %
564	ОС	ВПК	0,045 %
564	ОСМ	ВПК	0,043 %
564	ПЗ	Производство	9 шт.
564	ОС	Производство	5 шт.
564	ОСМ	Производство	4 шт.
564	ПЗ	Эксплуатация	23 шт.
564	ОС	Эксплуатация	38 шт.
564	ОСМ	Эксплуатация	14 шт.

Таблица 3.

Поставщик	N забр., шт.	Этап контроля	Серия
З-д «Ангстрем»	5	Производство	564
З-д «Экситон»	15	Производство	564
З-д «Ангстрем»	49	Эксплуатация	564
З-д «Экситон»	6	Эксплуатация	564
ПО «Родон»	15	Эксплуатация	564
ПО «Восход»	6	Эксплуатация	564
ПО «Адрон»	7	ВПК	564
З-д «Экситон»	90	ВПК	564

Анализ причин отказов РЭА начинается с диагностики ее функционирования, что позволяет разработать гипотезы возможных отказов. Проверка гипотез осуществляется, как правило, путем контроля функционирования элемента, признанного по гипотезе отказавшим, и



замещением отказавшего элемента заведомо годным. Локализация отказа осуществляется последовательным приближением.

1.1.3. Отказы космических радиоэлектронных систем

Уникальные условия эксплуатации изделий ракетно-космической техники (РКТ) требуют разработки специальных методов повышения их надежности. Они должны учитывать высокую сложность таких изделий, напряженность режимов эксплуатации, сравнительно малые партии однотипных изделий и значительные конструктивные изменения узлов (до 30% и выше) при поэтапном переходе к новой модификации изделия [5].

Многолетний опыт анализа разработок и эксплуатации изделий РКТ свидетельствует о необходимости разработки новых технологий и методов выявления и устранения основных типов отказов в элементах и узлах систем и аппаратуры КА. В настоящее время особую актуальность в проблематике обеспечения эффективной эксплуатации изделий приобрели вопросы, связанные не только со «случайными» отказами элементов систем и аппаратуры КА, но и с системной устойчивостью функционирования в динамичных условиях комплексного и длительного воздействия космической среды. При этом, такой учет влияния космической среды при длительной эксплуатации космических систем, как комплексного фактора, оказывающего существенное влияние на целевую эффективность, выдвигает новую важную научно-практическую проблему, которая формирует задачи нового этапа для специальных исследований.

Проблема обеспечения устойчивости функционирования КА при длительных космических полетах включает в себя несколько задач. В их число входят задачи обеспечения надежности элементной базы и стойкости элементов к длительному воздействию внешних факторов и эксплуатационных нагрузок.

В данном разделе приведены результаты анализа отказов бортовых радиоэлектронных систем ряда космических аппаратов. Такой анализ необходим для разработки рабочих гипотез о возможных причинах возникновения отказов и разработки рекомендаций по их устранению.

1.1.4. Физико-технический анализ отказов электрорадиоизделий

Основным при анализе отказов ЭРИ является их разделение на внезапные и постепенные. Внезапные отказы являются следствие проявляющихся в эксплуатации скрытых дефектов материала и конструкции, возникают в результате скачкообразного изменения параметров и носят окончательный характер [2]. Постепенные отказы являются следствием деградации физико-химических свойств материала под влиянием эксплуатационных факторов и естественного старения, возникают в результате дрейфа рабочих параметров и выхода их за пределы установленных допусков и имеют, как правило, также необратимый характер. При более сложной классификации учитывается динамика развития отказа и различается, в силу этого, категория релаксационных отказов, являющихся следствием постепенного накопления изменений в состоянии устройства и возникающих в результате



скачкообразного перехода в неработоспособное состояние.

Переход в состояние отказа может произойти под влиянием конструктивных, производственно – технологических и эксплуатационных факторов. К конструктивным факторам РЭС можно отнести: неправильный выбор комплектующих элементов, исходных материалов, недостаточный учет их физических возможностей; неоптимальность функциональной и принципиальной электрической схем с точки зрения выполнения заданных функций; выбор неблагоприятных электрических и тепловых режимов работы элементов, блоков; недостаточность мер по стабилизации параметров; неверное определение допусков на параметры элементов, а также на промежуточные и выходные параметры электрических характеристик; нерациональное размещение элементов, узлов, блоков; неэффективность выбора защитных устройств и способов резервирования; различные просчеты в конструктивном решении и др. В большинстве случаев эти недостатки могут привести в дальнейшем к перенапряжению и перегревам.

К производственно – технологическим факторам надежности аппаратуры следует отнести использование неудовлетворительных по качеству материалов и комплектующих элементов; нарушение санитарно – гигиенических норм производственно-технологических помещений; неотработанность и нарушение режимов сложных технологических процессов; несоблюдение правил технологической сборки электрического монтажа; недостаточную организацию и неэффективность контроля качества по операциям и при выпуске готовой продукции; несовершенство оборудования, инструмента, приспособлений.

Эксплуатационным фактором ненадежности аппаратуры является ее использование в несоответствующих электрических режимах и условиях эксплуатации: при электрических и механических перегрузках, в условиях воздействия высоких и низких температур окружающей среды, суточных и сезонных колебаний температуры, влажности, давления; при наличии агрессивных примесей в воздухе; под действием механических колебаний.

На рис. 1 – 3 приведены распределения отказов по их видам.

1.1.5. Определение критичных ЭРИ

Определение критичных к отказам ЭРИ является важнейшей задачей в решении проблемы повышения надежности космических РЭС. Ранее была определена широкая, но минимально необходимая номенклатура перспективных ЭРИ для космических РЭС и изделий с длительным сроком активного функционирования. Она определялась с учетом функциональной полноты, перспективности использования, универсальности, стойкости к внешним воздействиям и спецвоздействиям, массо-габаритных параметров.

Проведенные исследования и лабораторные испытания этих ЭРИ показали, что ряд из них имеет склонность к повышенной деградации параметров во времени. Из этого ряда выбраны потенциально ненадежные ЭРИ. Они представлены в табл. 4.

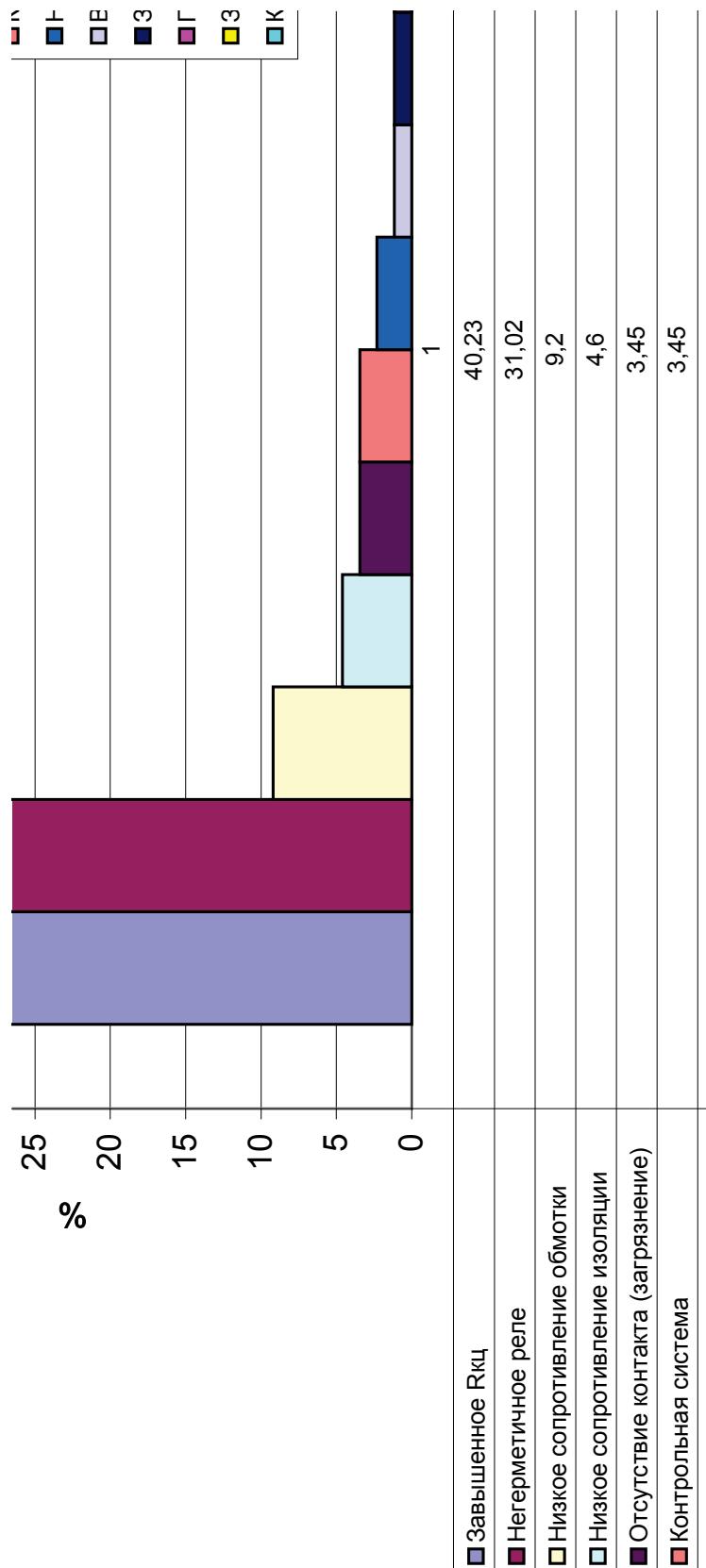
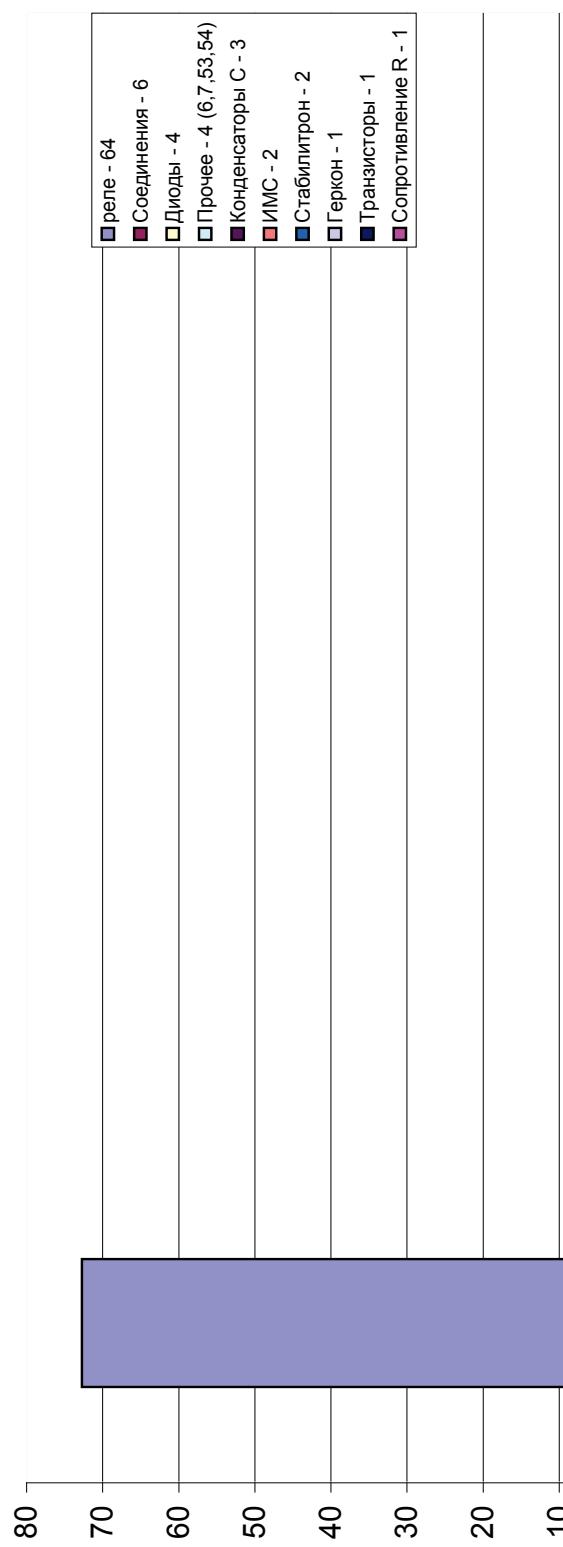


Рис. 1. Распределение видов отказов для ЭМР



Распределение отказов по видам ЭРИ



**Рис. 2. Распределение отказов по видам
ЭРИ**

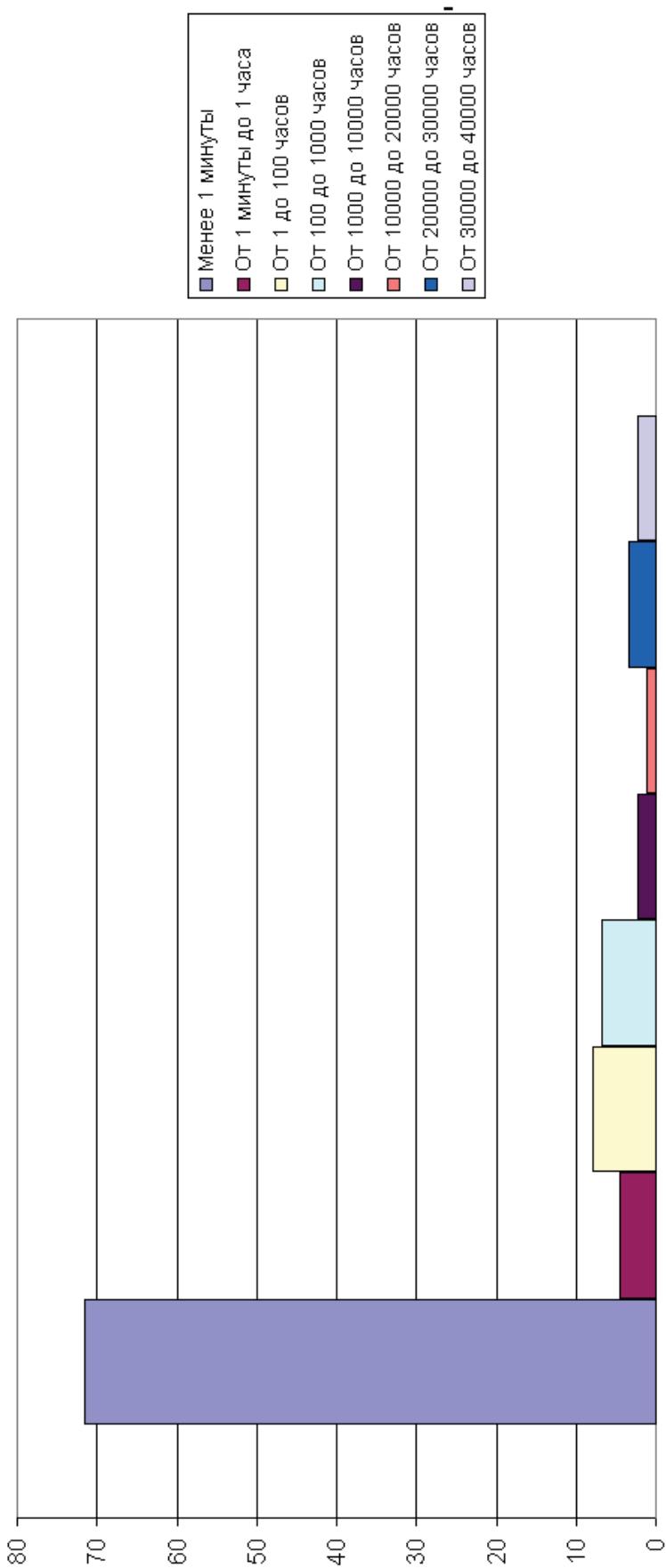


Рис.3. Распределение времени наработки на отказ То ЭРИ космических средств



Таблица 4.

Типы исследуемых ЭРИ (критичные элементы)

Э1	ИМС серии 564
Э2	ИМС серии 765
Э3	142ЕН5
Э4	ИМС серии 1553
Э5	К52-1Б
Э6	Сборка Б19-1
Э7	Реле РЭС80-1
Э8	Сборка Б18-11
Э9	2Д918-1
Э10	2Д103А
Э11	ФД-8К
Э12	Реле РПС-36Б
Э13	2Т312Б
Э14	ИМС 286ЕП2
Э15	Реле РЭС-49
Э16	Реле РПС-32Б
Э17	2С175Ж
Э18	ИМС 522КН2Б
Э19	ИМС 286ЕП1
Э20	ИМС 286ЕП3
Э21	ИМС серии 1554
Э22	740УД4-1
Э23	2С168К-1
Э24	2С182Ж

Была поставлена задача определения степени критичности этих ЭРИ к отказам и выбора наиболее критичных. Для решения этой задачи был использован метод экспертизы оценок.

Результаты первого тура опроса приведены в табл. 5. Как видно из данной таблицы первый тур не дал положительных результатов. Был проведен второй тур опроса. Его результаты представлены в табл. 6. Как и первый тур, он не дал нужной сходимости оценок экспертов. После этого был проведен третий тур опроса. Он также не привел к желанному результату. Это видно из рис. 4. Задача оказалась непосильной. В связи с этим было принято решение все эти элементы предварительно отнести к категории критичных (табл. 7).

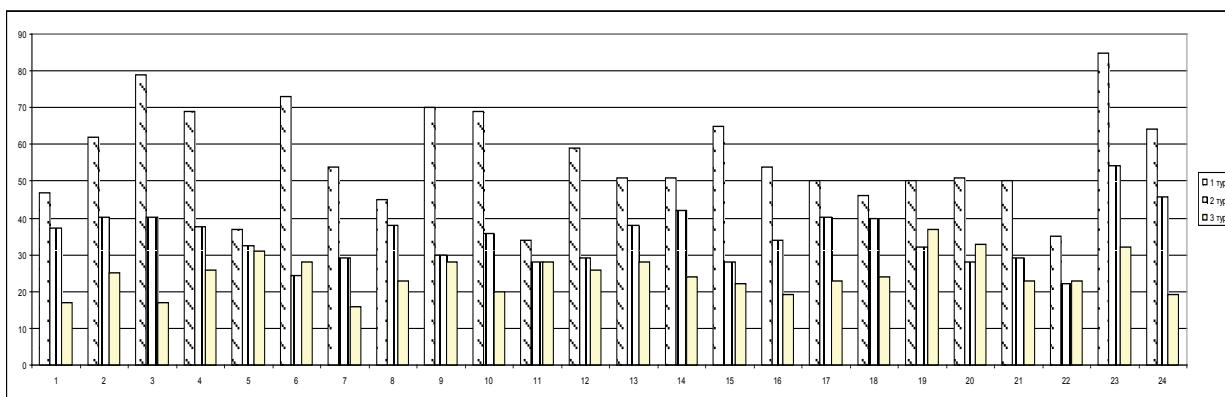


Рис. 4 Сравнительная гистограмма коэффициента вариации оценок при выборе потенциально критичных элементов по трём турам опроса



Таблица 5.

Оценка степени критичности элементов.

Фактор	Среднее	СКО	Коэффициент вариации
Э1	6,29	2,97	47
Э2	5,24	3,27	62
Э3	4,00	3,14	79
Э4	4,35	3,02	69
Э5	6,35	2,37	37
Э6	4,18	3,07	73
Э7	5,65	3,04	54
Э8	5,65	2,55	45
Э9	3,65	2,55	70
Э10	5,24	3,62	69
Э11	7,41	2,55	34
Э12	4,12	2,45	59
Э13	6,18	3,13	51
Э14	5,18	2,63	51
Э15	4,18	2,70	65
Э16	5,71	3,06	54
Э17	5,88	2,93	50
Э18	5,88	2,69	46
Э19	6,06	3,05	50
Э20	6,24	3,15	51
Э21	6,41	3,22	50
Э22	7,47	2,60	35
Э23	4,59	3,89	85
Э24	5,24	3,33	64

Таблица 6.

Оценка степени критичности элементов. Второй тур опроса

Фактор	Среднее	СКО	Коэффициент вариации
Э1	6,23	2,31	37,15
Э2	5,54	2,22	40,11
Э3	4,85	1,95	40,30
Э4	6,23	2,35	37,73
Э5	5,69	1,84	32,40
Э6	6,46	1,56	24,20
Э7	6,62	1,89	29,00
Э8	5,38	20,20	38,00
Э9	6,54	1,94	30,00
Э10	6,31	2,25	35,70



Э11	5,54	1,56	28,00
Э12	6,00	1,73	29,00
Э13	5,85	2,23	38,00
Э14	5,08	2,14	42,00
Э15	6,38	1,76	28,00
Э16	5,85	1,99	34,10
Э17	4,92	1,98	40,17
Э18	5,31	2,14	40,00
Э19	7,31	2,32	32,00
Э20	7,38	2,10	28,00
Э21	6,15	1,77	29,00
Э22	7,46	1,66	22,30
Э23	4,62	2,50	54,20
Э24	5,23	2,39	45,61

Таблица 7.
Потенциально критичные элементы

Э1	ИМС серии 564
Э2	ИМС серии 765
Э4	ИМС серии 1553
Э5	К52-1Б
Э6	Сборка Б19-1
Э7	Реле РЭС80-1
Э9	2Д918-1
Э10	2Д103А
Э11	ФД-8К
Э12	Реле РПС-36Б
Э13	2Е312Б
Э14	ИМС 286ЕП2
Э15	Реле РЭС-49
Э16	Реле РПС-32Б
Э17	2С175Ж
Э18	ИМС 522КН2Б
Э19	ИМС 286ЕП1
Э20	ИМС 286ЕП3
Э21	ИМС серии 1554
Э22	740УД4-1
Э23	2С168К-1
Э24	2С182Ж

1.1.6. Математическая модель наиболее критичного элемента бортового радиотехнического устройства

Эффективность функционирования изделий ракетно-космической техники зависит от многих факторов, в том числе от качества работы бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Проведенный нами анализ отказов бортовых радиотехнических устройств показал, что наиболее критичным элементом является электромагнитное реле.

Основными параметрами и характеристиками, определяющими функциональные возможности и области применения реле являются: чувствительность, коэффициент возврата, рабочее напряжение или токи питания обмотки, сопротивление обмотки, коммутируемая мощность, сопротивление и электрическая прочность изоляции, сопротивление, емкость и



индуктивность цепи контактов, время срабатывания и отпускания, частота срабатывания, износостойчивость и срок службы.

Наиболее распространеными дефектами электромагнитных реле являются следующие: дефекты обмоток и соединения их с выводами, дефекты сборки и регулировки, загрязнения контактов, дефекты токовой системы, затирания якоря, аномальное контактное нажатие, аномальная величина контактного зазора, дребезг, качество герметизации, обрывы соединений, ненадежные пайки. Отказы реле обусловлены в основном дефектами контактного узла и электромагнитной системы.

Известно, что наиболее ответственным узлом, определяющим работоспособность реле, являются контакты. В технологическом отношении процесс изготовления контактов критичен к различным дестабилизирующим факторам (температура, чистота материалов, наличие загрязнений атмосферы твердыми частицами и различными газами).

Для прогнозирования отказов этих элементов, совершенствования их конструкции и технологии изготовления необходима достоверная математическая модель электромагнитного реле.

Известна физико-математическая модель электромагнитных реле [20], отражающая в форме дифференциальных уравнений поведение электромагнитной и механической систем реле. Недостатком такой модели является то, что она не учитывает характера изменения проводимости магнитной цепи реле в зависимости от перемещения якоря в процессе срабатывания электромагнита, а также зависимости проводимости от силы натяжения возвратной пружины.

Одним из важнейших информативных параметров, по которому можно судить о качестве электромагнитной и механической систем реле, является характеристика срабатывания электромагнита [21]. Последняя характеризуется, в первую очередь, величиной изменения проводимости магнитной цепи в процессе срабатывания и опускания реле. Поэтому, описание электромеханической характеристики реле с учётом изменения проводимости в процессе работы коммутационного устройства может служить для достоверного диагностирования неисправностей в электромагнитной и механической системах каждого конкретного типа электромагнитных коммутационных устройств.

Поскольку в электромагнитном реле используется как минимум три цепи различной физической природы: электрическая, магнитная, механическая, то анализ характеристик устройства целесообразно проводить с помощью обобщенных параметров энергоинформационных моделей. Для улучшения наглядности, детализации физических явлений, происходящих в электромагнитном устройстве, необходимо составить параметрическую структурную схему (рис. 5). На основании представленной схемы получим зависимость напряжения $U_\Theta(p)$ на обмотке реле от тока $I_\Theta(p)$, протекающего по обмотке, с учётом всех входящих в схему параметров:

$$U_\Theta(p) = K_{I_\Theta U_\mu} p C_\mu K_{I_\Theta U_\mu} I_\Theta(p) = p N^2 C_\mu I_\Theta(p), \quad (1)$$



где $K_{I_3 U_\mu} = N$ - число витков обмотки, постоянное для каждого типа реле.

Проводимость магнитной цепи C_μ складывается из постоянной проводимости C_{μ_0} магнитопровода реле, проводимости начального воздушного зазора q_{μ_0} и переменной проводимости ΔC_μ переменного воздушного зазора:

$$C_\mu = C_{\mu_0} + \Delta C_\mu, \quad (2)$$

$$C_{\mu_0} = \frac{\mu S}{l} + \frac{\mu_0 S_0}{q_{\mu_0}}; \quad (3)$$

$$\Delta C_\mu = \frac{\mu_0 S_0}{q_M}; \quad (4)$$

μ, μ_0 - магнитные проницаемости магнитопровода и воздуха;

S, S_0 - площади сечений магнитопровода и площадь полюса сердечника;

l - средняя длина магнитной линии в магнитопроводе.

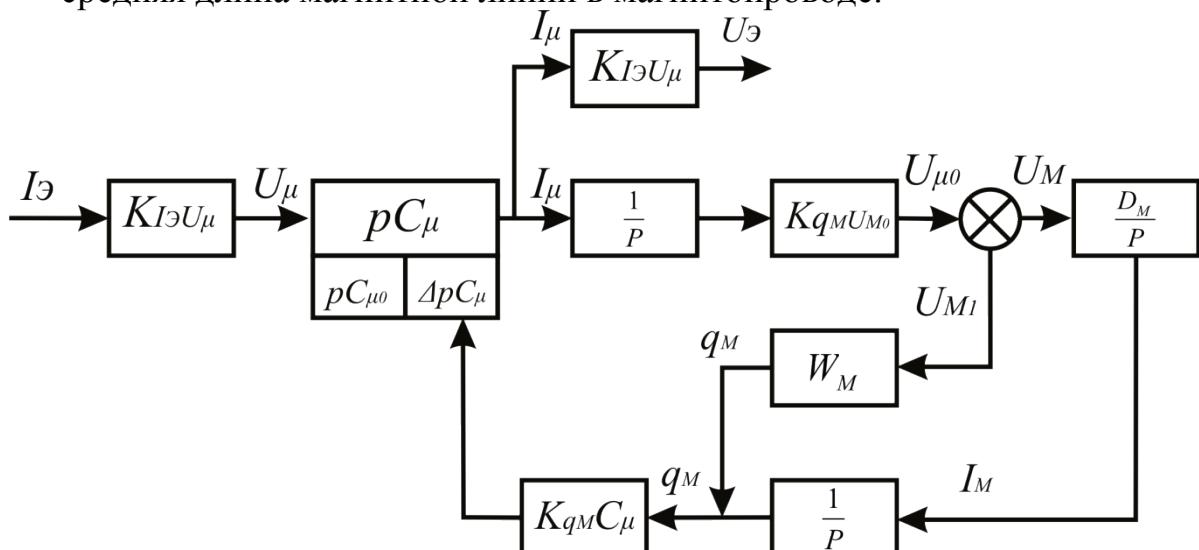


Рис. 5. Параметрическая структурная схема электромагнитного устройства

I_3 - электрический ток, поступающий в обмотку реле, А;

U_μ - магнитодвижущая сила А;

$K_{I_3 U_\mu}$ - коэффициент, равный количеству витков обмотки реле;

C_μ - проводимость магнитной цепи, Гн;

I_μ - производная магнитного потока по времени, Вб/с;

q_μ - магнитный поток, Вб;

U_{μ_0} - сила притяжения якоря, Н;

$K_{q_M U_{\mu_0}}$ - коэффициент пропорциональности между q_μ и U_{μ_0} ; D_m - масса



якоря, кг;

I_M - скорость перемещения якоря, м/с;

q_M - перемещение якоря, м;

U_{M_1} - сила натяжения возвратной пружины, Н;

W_M - жесткость пружины, Н/м;

$K_{q_M C_\mu}$ -коэффициент пропорциональности между q_M и C_μ ;

U_Θ - напряжение на обмотке реле, В;

p - оператор Лапласа.

Зависимость перемещения якоря q_M от величины ΔU_M можно выразить формулой

$$q_M = \frac{D_M}{2} \Delta U_M, \quad (5)$$

где $\Delta U_M = U_{M_0} - U_{M_1}$; U_{M_0} - сила притяжения якоря, U_{M_1} - сила натяжения возвратной пружины.

Выражения для сил U_{M_0} и U_{M_1} согласно рис. 5 можно записать в виде:

$$U_{M_0} = K_{q_M U_{M_0}} N C_\mu I_\Theta(p), \quad (6)$$

$$U_{M_1} = q_M W_M. \quad (7)$$

Подставив формулы (6), (7) в выражение (5), найдём

$$q_M = \frac{D_M K_{q_M} U_{M_0} C_\mu N I_\Theta(p)}{p + D_M W_M}. \quad (8)$$

Выражение (8) подставим в формулу (4) и решим полученное квадратное уравнение относительно ΔC_μ , получим

$$\Delta C_\mu = -\frac{1}{2} C_{\mu_0} + \frac{1}{2} \sqrt{C_{\mu_0}^2 + 4 \frac{\mu_0 S_0 (p^2 + D_M W_M)}{D_M K_{q_M} U_{M_0} N I_\Theta(p)}}. \quad (9)$$

Подставив формулы (2), (3), (9) в (1), окончательно запишем

$$U_\Theta(p) = \frac{1}{2} N^2 p \left(\frac{\mu_0 S}{l} + \frac{\mu_0 S_0}{q_{M_0}} + \sqrt{\left(\frac{\mu S}{l} + \frac{\mu_0 S}{q_{M_0}} \right)^2 + \frac{4 \mu_0 S_0 (p^2 + D_M W_M)}{D_M K_{q_M} U_{M_0} N I_\Theta(p)}} \right) I_\Theta(p). \quad (10)$$

Подставив вместо $I_\Theta(p)$ выражение для синусоидального тока в операторной форме, получим

$$U_\Theta(p) = \frac{N^2 p}{2(p^2 + 1)} \left(\frac{\mu S}{l} + \frac{\mu_0 S_0}{q_{M_0}} + \sqrt{\left(\frac{\mu S}{l} + \frac{\mu_0 S_0}{q_{M_0}} \right)^2 + \frac{4 \mu_0 S_0 (p^2 + D_M W_M)(p^2 + 1)}{D_M K_{q_M} U_{M_0} N}}} \right). \quad (11)$$

Таким образом, найдено приближённое выражение для напряжения на обмотке электромагнитного реле $U_\Theta(p)$ в зависимости от формы протекающего по обмотке тока $I_\Theta(p)$ с учётом изменения проводимости магнитной цепи в процессе срабатывания и опускания электромагнита, а также силы натяжения возвратной пружины.



Подставив определенные для каждого конкретного типа электромагнитных реле значения параметров $N, \mu, S, l, S_0, q_{M_0}, D_M, W_M$ в формулу для $U_3(p)$, получим приближенное выражение в операторной форме для идеальной характеристики срабатывания данного типа реле, которая может быть использована для прогнозирования надежности электромагнитных устройств.

1.1.7. Выбор ЭРИ для космических РЭС

При создании космических РЭС необходимо оценивать правильность применения ЭРИ.

Под оценкой правильности применения ЭРИ понимается:

– оценка перспективности выбранной элементной базы в соответствии с перечнем изделий электронной техники, электротехники, квантовой электроники и средств измерений, разрешаемых для применения при разработке и модернизации военной аппаратуры, приборов и другой военной техники;

– оценка соответствия условия работы изделий в аппаратуре (в том числе по внешним воздействующим факторам, включая специальные факторы, по времени готовности, ресурсу и сохраняемости) требованиям, указанным в ТУ на них;

–оценка электрических и температурных режимов работы изделий;

– проверка выполнения требований НТД на изделия по монтажу (применению) при изготовлении аппаратуры;

–оценка исходных данных, принятых при расчете надежности аппаратуры.

Для оценки правильности применения изделий в аппаратуре на всех стадиях ее разработки рекомендуется использовать методики, приведенные в руководстве [22].

В процессе проверки следует руководствоваться Государственными и отраслевыми стандартами, в частности, Единой Системой Конструкторской Документации (ЕСКД) и комплексом Государственных стандартов, а также следующими документами:

– ГОСТ 2.117-71 “порядок согласования покупных изделий”;

– перечнями и соответствующими положениями о перечнях;

– учтенными экземплярами НТД на изделия;

–согласованными с Министерством обороны документами по показателям эксплуатационной надежности и спецстойкости изделий;

– методиками (РТМ) по расчету надежности аппаратуры, разработанными предприятиями промышленности и согласованными с Министерством обороны;

– руководствами по применению изделий в аппаратуре.

1.2. Индивидуальное прогнозирование

1.2.1. Типы прогнозирования

Умение прогнозировать изменение параметров технического объекта позволяет предотвратить отказы и оптимально организовать техническое



обслуживание [23].

Различают два типа прогнозов [24]: поисковые и нормативные. Поисковый прогноз - определение возможных состояний явления в будущем. Нормативный прогноз - определение путей и сроков достижения возможных состояний явления, принимаемых в качестве цели.

Объекты прогнозирования по степени информационной обеспеченности принято подразделять на:

- а) объекты с полным обеспечением количественной информацией;
- б) объекты с неполным обеспечением количественной информацией;
- в) объекты с наличием качественной ретроспективной информации;
- г) объекты с полным отсутствием ретроспективной информации.

Основное требование при выборе критерия эффективности метода прогноза заключается в строгом соответствии избранного показателя той цели, которая должна быть достигнута в результате тех или иных действий. Различают два вида целей и соответствующих им критериев эффективности:

1. Качественные цели, которые могут быть либо достигнуты, либо не достигнуты.

2. Количественное определение цели заключается в стремлении увеличить (или уменьшить) значение некоторой величины, зависимость которой от переменных и составляет критерий эффективности.

Количественный критерий эффективности в наиболее общем виде можно записать так:

$$E(p,t) = E\{\mathcal{E}[\bar{p}(t)], C[\bar{p}(t)], t\},$$

где E – эффективность объекта; \mathcal{E} – эффект объекта; C – затраты на создание объекта; \bar{p} - вектор параметров объекта; t – время.

По степени формализации все методы прогнозирования делятся на интуитивные и формализованные [24]. Интуитивное прогнозирование применяется тогда, когда объект прогнозирования либо слишком прост, либо настолько сложен, что аналитически учесть влияние многих факторов практически невозможно.

В выборе методов прогнозирования, комплексируемых в систему, важным показателем является глубина упреждения прогноза. Для этого можно использовать безразмерный показатель глубины (дальности) прогнозирования (τ):

$$\tau = \frac{\Delta t}{t_x}$$

где Δt - абсолютное время упреждения; t_x - величина эволюционного цикла объекта прогнозирования.

Класс формализованных методов в зависимости от общих принципов действия можно разделить на группы экстраполяционных, системо-структурных, ассоциативных методов и методов опережающей информации.

Принцип оптимизации помогает разработать такое описание объекта в результате анализа, которое обеспечивало бы заданную достоверность и



точность прогноза при минимальных затратах на его разработку. Обобщенный принцип можно разбить на ряд конкретных, частных принципов оптимизации описания:

- а) принцип оптимальности степени формализованности описания;
- б) принцип минимизации размерности описания;
- в) принцип оптимального измерения показателей.

Методы индивидуального прогнозирования во многом определяются имеющейся исходной информацией об исследуемых изделиях.

Общим для этих видов индивидуального прогнозирования является наличие таких этапов, как обучающий эксперимент, обучение, экзамен и собственно прогнозирование [25].

Обучающий эксперимент - это испытание в заданном режиме n экземпляров исследуемых изделий в течение времени t_{np} и определение фактического состояния каждого экземпляра к моменту t_{np} . Цель обучающего эксперимента состоит в получении массива исходных данных, необходимых для обучения. Содержание массива исходных данных определяется видом индивидуального прогнозирования.

Обучение заключается в обработке результатов обучающего эксперимента по некоторому оператору прогнозирования с прогнозной модели в зависимости от выбранного метода и в определении прогнозируемого состояния каждого из n экземпляров к моменту времени t_{np} .

Экзамен состоит в оценке ошибки прогнозирования и проверке соответствия величины ошибки требованиям. Если величина ошибки согласуется с установленными требованиями, используемый оператор можно рекомендовать для прогнозирования состояния новых экземпляров, не участвовавших в обучающем эксперименте. Если же ошибки прогнозирования велики, то применяют различные способы повышения точности прогнозирования, которые зависят от используемого метода прогнозирования.

Прогнозирование заключается в оценке начального и определении по рекомендованному оператору прогнозируемого состояния экземпляра к моменту t_{np} [26].

Различия в рассматриваемых методах индивидуального прогнозирования заключаются в виде применяемого оператора, в способе оценки ошибки, в методах улучшения оператора и повышения точности прогнозирования.

1.2.2. Структурная модель ИП

Эффективность функционирования изделий ракетно – космической техники зависит от многих факторов, в том числе от качества работы бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Одним из основных показателей качества РЭА является надежность, которая уменьшается по мере увеличения сложности аппаратуры. А чем важнее функции, возложенные на РЭА, тем к большим потерям приводит ее отказ. При разработке, изготовлении и эксплуатации космической аппаратуры принимаются разнообразные меры, направленные на обеспечение ее безотказности. Однако, полностью устранить возможность появления отказов не удается. Поэтому задача поддержания работоспособного



состояния аппаратуры и изделия в целом заключается, прежде всего, в своевременном прогнозировании отказов и устраниении причин их появления.

Прогнозирование отказов и изменение свойств аппаратуры и изделия может быть проведено на различных этапах ее жизненного цикла (контроль, испытания, применение, эксплуатация). Наибольшую точность обеспечивает индивидуальное прогнозирование (ИП). Его смысл заключается в том, что по величине информативного параметра или по результатам наблюдения за каждым конкретным экземпляром с использованием оператора прогнозирования (прогнозной модели) делается вывод о потенциальной надежности этого экземпляра, т. е. о возможности его использования по назначению в течение заданного срока службы. Для построения оператора (математической модели), алгоритма, методики индивидуального прогнозирования и управления качеством аппаратуры требуется структурная модель ИП. Такая модель строится в графической форме в виде укрупненной технологической схемы с описанием функций, выполняемых составными частями.

Предложенные в структурные модели для ИП микросборок в ряде случаев не обеспечивают создания точных операторов и эффективных методик прогнозирования. Особенно это касается специализированной космической аппаратуры.

Проведенный анализ показал, что причиной этого могут быть низкая адекватность исследовательских испытаний реальным условиям эксплуатации, некорректность выбора информативных параметров, отсутствие оценки качества программного продукта и аттестации методики ИП, низкая точность оператора прогнозирования при изменении конструктивно – технологического варианта аппаратуры.

Целью данной работы является повышение точности и достоверности прогнозирования показателей качества космической радиоэлектронной аппаратуры для изделий с длительным сроком активного функционирования.

Для повышения точности и достоверности ИП была предложена новая структурная модель прогнозирования. Модель приведена на рис.6. Она включает в себя следующие взаимосвязанные этапы:

1. Анализ методов ИП – на данном этапе из множества методов выбираются несколько, наиболее полно отвечающих поставленной задаче ИП.

2. Предварительный выбор информативных параметров и выбор параметров прогнозирования – выбираются измеряемые параметры структуры микросборок, устройств, несущие необходимую информацию о качестве, из которых впоследствии будут отбираться наиболее значимые, дающие минимальную ошибку прогнозирования.

3. Разработка методики исследовательских испытаний – определяется объем выборки, составляется программа испытаний, выбираются необходимое оборудование, средства измерения и контроля, проводится метрологическое обоснование.

4. Обучающий эксперимент – проводятся испытания в заданном режиме определенного количества (выборки) исследуемых изделий в течение



требуемого времени, обычно равного времени последующего прогнозирования $t_{\text{пр.}}$, и определение фактического состояния (годен, не годен) каждого экземпляра выборки к моменту окончания испытаний.

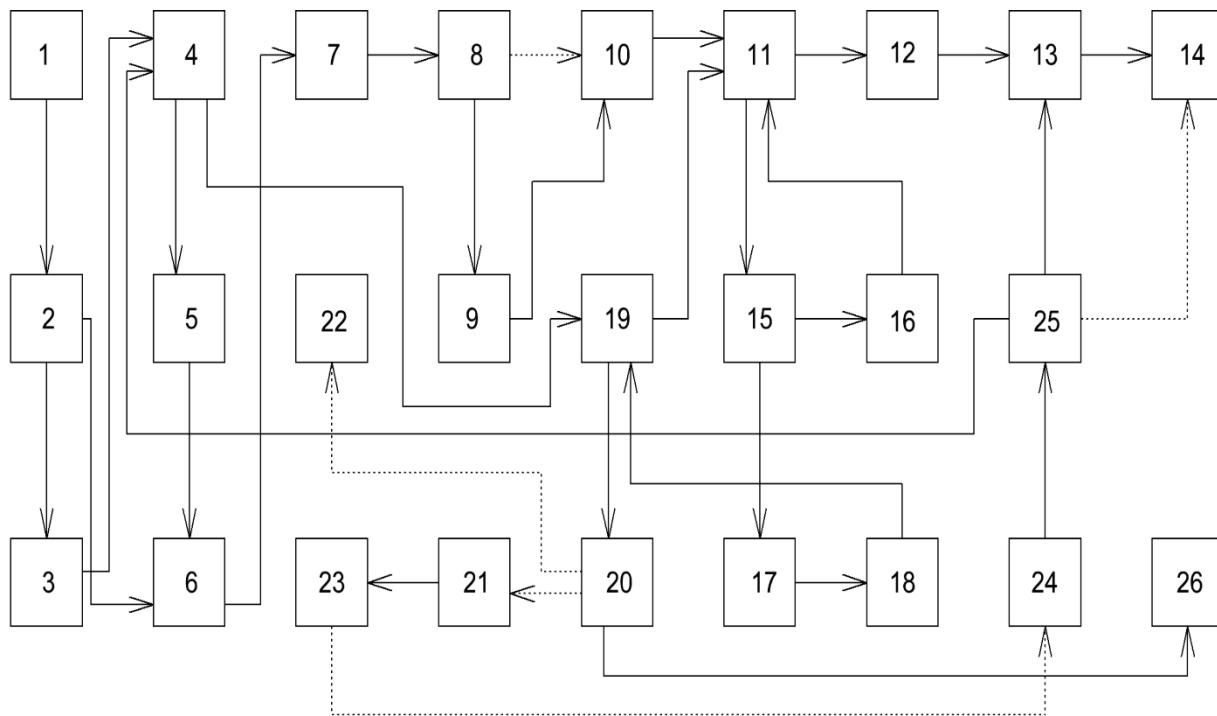


Рис.6. Структурная модель индивидуального прогнозирования показателей качества космических РЭС

Оценивается адекватность выборки по количеству годных и негодных изделий. Затем проводится физико-технический анализ отказов.

5. Выбор информативных параметров – производится окончательный выбор информативных параметров по величине коэффициента корреляции с прогнозируемым параметром.

6. Выбор метода ИП – на данном этапе окончательно выбирается один метод прогнозирования, наиболее точно отражающий поведение исследуемых параметров и имеющий минимальную ошибку прогнозирования.

7. Разработка алгоритма – этап перевода всей расчетно-математической части выбранного метода ИП на язык блок-схем алгоритмов, где четко определяется последовательность выполнения отдельных пунктов расчетов, а также условие их выполнения.

8. Разработка программы – производится выбор языка программирования высокого уровня, позволяющего производить сложные математические расчеты, разрабатываются программы ИП или выбирается специализированный пакет прикладных программ для математических расчетов; далее проводится формальное описание алгоритма выбранного метода ИП, сервисных процедур и интерфейса с использованием в соответствии с требованиями выбранной программной среды.

9. Оценка качества программного продукта – проводится статистический



анализ программ, тестирование и оценка надежности (статистические испытания, оценка надежности функционирования по результатам испытаний), экспертиза программ, оценка научно-технического уровня, анализ конфигурации программ.

10. Разработка оператора ИП – по параметрам обучающей выборки разрабатывается модель или оператор ИП, имеющий минимальную ошибку расхождения с экспериментальными данными и приемлемые показатели эффективности.

11. Оценка качества оператора ИП – этап определения выбранных показателей качества прогнозирования.

12. Разработка рабочей методики – определяется набор измеряемых параметров рабочих выборок, последовательность действий при проведении измерений выбранных параметров и в процессе ИП, пороговых значений оператора и критериев качества прогнозирования.

13. Аттестация методики – проводится оценка степени соответствия полученных показателей оптимальным нормам, установленным на стадии ее разработки из условия обеспечения минимальных значений вероятности ошибочных решений, рисков изготовителя и потребителя, максимальных показателей экономической эффективности; методике присваивается категория качества (первая, вторая или третья).

14. Рабочее прогнозирование – процесс определения потенциально ненадежных изделий с данным КТВ, не участвовавших в обучающем эксперименте, по измеренным значениям информативных параметров и выбранному оператору прогнозирования.

15. Оптимизация оператора – если качество прогнозирования не удовлетворяет определенным критериям, то проводится оптимизация оператора или модели ИП, например, методом крутого восхождения с использованием планирования эксперимента.

16. Уточнение оператора ИП – проводится корректировка оператора индивидуального прогнозирования по результатам проведенного эксперимента.

17. Уточняющий обучающий эксперимент – если полученные показатели качества оператора ИП не удовлетворяют требуемым, то проводится дополнительный уточняющий эксперимент.

18. Разработка или выбор новых информативных параметров – в случае, если добиться заданного качества прогнозирования оптимизацией не удалось, производится выбор новых информативных параметров для ИП.

19. Определение уровней – этап, позволяющий определить пороговые значения классифицирующей или разделяющей функции, оператора ИП, которые обеспечили бы максимально возможное качество прогнозирования выбранного оператора или функции.

20. Разработка рекомендаций – разрабатываются рекомендации по изменению технологического маршрута, операционных технологий, конструкции РЭС и отдельных электрорадиоизделий или введению электрофизической диагностики на определенных операциях изготовления.

21. Технологический процесс (ТП) изготовления РЭС – проводится анализ



рекомендаций с разработчиком технологического процесса производства радиоэлектронного средства.

22. Контроль параметров РЭС – проводится анализ рекомендаций по введению электрофизической диагностики с разработчиком контрольных операций.

23. Изменение КТВ – вносятся изменения в конструкцию изделия или технологию ее изготовления, направленные на устранение несоответствий и значимых дефектов, выявленных в процессе контроля параметров радиоэлектронных средств. При этом учитываются данные физико-технического анализа, полученные по результатам обучающего эксперимента и эксплуатации аппаратуры.

24. Уточнение методики – проводят уточнение и корректировку рабочей методики ИП с учетом модернизации КТВ.

25. Проверка уточненной методики – проводят проверку уточненной методики ИП на соответствие заданных требований.

26. Эвристическое прогнозирование или отбраковка – проводят выбор критерия (уровня) отбраковки потенциально ненадежных изделий; на основе данного критерия проводится отбраковка или классификация.

Особенностью данной модели является возможность учета "технологической наследственности" при выборе и оценке показателей качества, информативных параметров и свойств аппаратуры и изделия, наличие обратных информационных связей, использование корректирующих звеньев, адекватность этапа обучающего эксперимента, возможность согласованной модернизации конструктивно – технологических вариантов аппаратуры, проектирования контролепригодных конструкций и стабильных, хорошо управляемых технологических процессов [27].

Использование этой структурной модели позволяет повысить точность и достоверность операторов прогнозирования при изменении конструктивно – технологического варианта аппаратуры.

Выводы

Показано, что одними из перспективных направлений в разработке эффективных и экономически приемлемых методов оценки качества и надёжности РЭС являются диагностический контроль индивидуальное прогнозирование их будущего состояния. Проведён анализ отказов космических РЭС. Получены распределения отказов по видам ЭРИ, по времени наработки на отказ, по видам отказов. Определены критичные ЭРИ. Предложена математическая модель наиболее критичного элемента бортового радиотехнического устройства. Разработана структурная модель индивидуального прогнозирования космических РЭС.



ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ МАГНИТОШУМОВОГО КОНТРОЛЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА

Введение

В настоящее время вопрос совершенствования изделий машиностроения и поддержания их в работоспособном состоянии рассматривается только совместно с повышением требований к качеству, надежности и долговечности деталей машин. Надежность и долговечность в современных условиях развития техники и технологии требует комплексного подхода. В связи с, все более увеличивающейся, сложностью машин требования к надежности, долговечности и работоспособности постоянно возрастают. Высоконадежные машины, позволяют сократить затраты на ремонт и эксплуатацию, обеспечить безопасность обслуживающего персонала.

Сегодня стоимость ремонта и обслуживания большинства машин значительно превышает стоимость их изготовления. С точки зрения безопасности эксплуатации и сохранения человеческой жизни разговор о затратах вообще не может идти. Поэтому безопасность и длительность безотказной работы технического устройства должна быть на высочайшем уровне. Проблема обеспечения надежности должна решаться исходя из требований определения текущего технического состояния, как можно в более короткие сроки, с наименьшими затратами и с высокой достоверностью.

Эту проблему можно решить на основе применения различных методов контроля на всех этапах жизненного цикла деталей и изделий, составляющих конструкции эксплуатируемой техники.

Предметом исследования настоящей работы является - техническое состояние ферромагнитных элементов конструкций технологического оборудования различного назначения на этапе их производства.

Цель работы: совершенствование технологических процессов диагностирования текущего технического состояния существующих и новых машин и механизмов, их долговечности, надежности и технологичности за счет применения магнитошумового метода неразрушающего контроля.

2.1. Идентификация состояния ферромагнитных материалов после термической обработки

Одним из условий обеспечения качества изготавливаемой продукции является применение контрольных операций на всех этапах их жизненного цикла. Так на первом этапе производства наиболее ответственные операции – входной контроль материалов и текущий контроль изготовления деталей. В связи с этим идентификация состояния поступающих ферромагнитных материалов и качество их термической обработки является важной прикладной задачей, решение которой позволяет в конечном итоге значительно повысить надежность функционирования изготавливаемых объектов и систем [1,2].

На рис. 1 приведена схема диагностирования ферромагнитного материала.

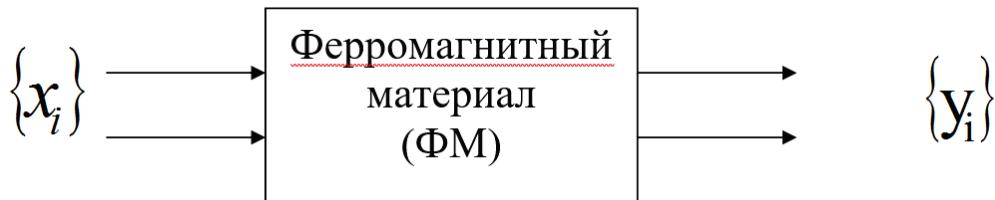


Рис. 1. Схема диагностирования ферромагнитного материала

Для решения задачи идентификации необходимо установление взаимосвязи между множеством входных параметров $\{x_i\}$ и множеством выходных параметров $\{y_i\}$. Эта задача может быть решена двумя способами. Первый – это построение математической модели на базе приведенных выше рассуждений с учетом известных структурных параметров материала и привлечением статистических данных о его металлографических характеристиках. И второй – путем математической обработки данных о состояниях материала измеренных экспериментально, для которых известны значения входных, структурных и выходных параметров. То есть с применением регрессионного анализа. Оба этих способа будут рассмотрены ниже. Перейдем к рассмотрению первого способа.

Согласно схеме диагностирования (рис.1) и схеме вычислительного эксперимента (рис.2) в качестве входных параметров использованы температуры, характеризующие виды термической обработки (отжиг, нормализация, закалка + высокий отпуск, закалка + средний отпуск, закалка + низкий отпуск, закалка) и характеристики внешнего переменного электромагнитного поля. Структурными являются: процентное содержание углерода и фазовый состав ферромагнитного материала, зависящий от вида термической обработки. В качестве выходных пар параметров использованы напряжение на выходе измерительной катушки и частота следования импульсов ЭДС магнитного шума.

Все входные и выходные параметры являются контролируемыми. Из структурных параметров – процентное содержание углерода в сертификате соответствия на контролируемую сталь, а фазовый состав материала может быть определен по результатам металлографического анализа.

Перейдем ко второму этапу условной схемы (рис.2), а именно к металлографическому анализу конструкционных сталей, подвергнутых различным видам термической обработки.

Целью металлографического анализа конструкционных материалов является статистических характеристик структурных параметров микрошлифов. Исходя из постановки вычислительного эксперимента, основным используемым параметром является математическое ожидание линейного размера зерна феррита. Известно, что под воздействием различных видов термической обработки структура ферромагнитного материала изменяется, а размер зерна структурных составляющих определяется размером зерна исходного аустенита. И именно зерно стали определяет ее конечные свойства.

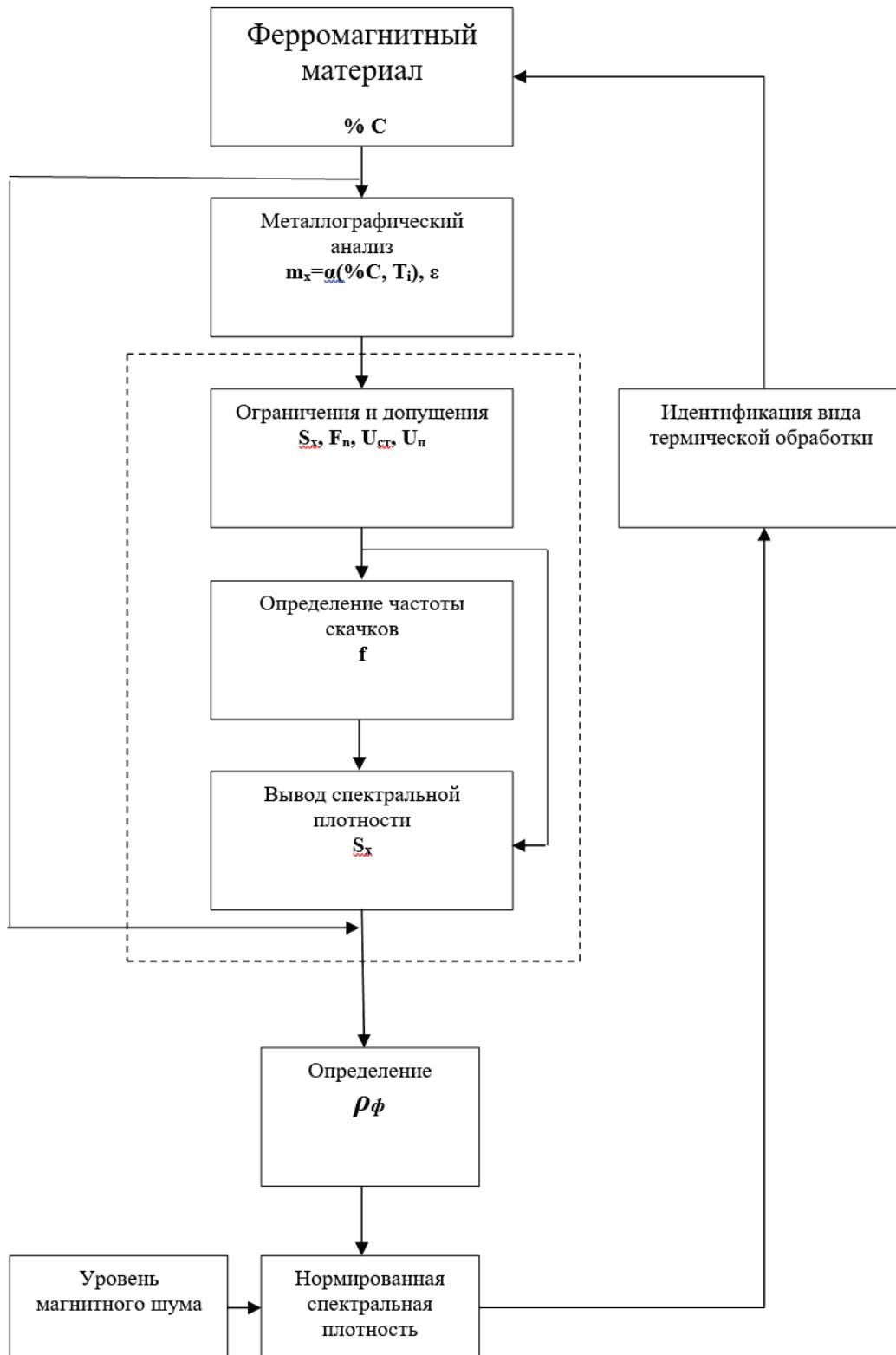


Рис.2. Условная схема, определяющая последовательность проведения отдельных этапов общей процедуры вычислительного эксперимента при идентификации термообработки

Для определения размеров действительного зерна применяется специальная методика [3]. Не вдаваясь в ее подробности, отметим, что определение величины зерна проводится под микроскопом сравнением



видимых зерен с эталонными изображениями [4].

На рис.3 построена функция зернистости стали на основе данных приведенных в [4].

В качестве допущения можно предположить, что изменение линейных размеров зерна феррита в стали под действием термической обработки будет подчинено функции аналогичной, построенной функции зернистости.

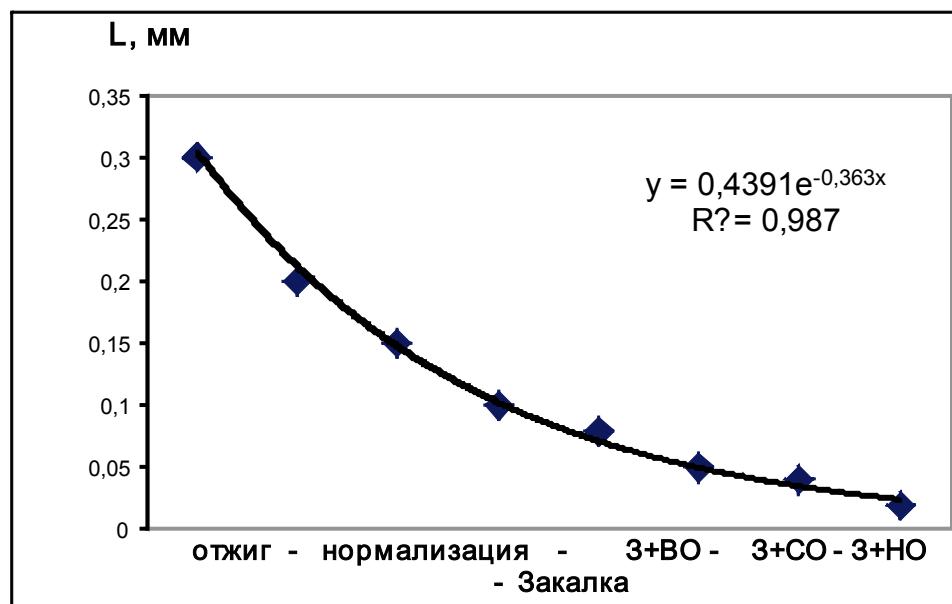


Рис.3. Функция зернистости стали

Таким образом, для введения в математическую модель статистических данных по структуре ферромагнитного материала, необходимо проведение металлографического анализа конкретных видов сталей после различных видов термической обработки.

Наиболее подробно приведем порядок и результаты анализа для первого вида термической обработки – отжига.

2.2. Статистическая оценка параметров микроструктуры конструкционных сталей

Разработка вопросов применения различных систем и средств неразрушающего контроля связана с необходимостью обладания как можно более полной информацией об объекте диагностирования. От того, каким образом и с какой точностью введены данные, в математическую модель диагностируемого объекта, зависит уровень достоверности результатов контроля. Получение такой информации в большинстве случаев связано с применением методов математической статистики [5].

В работе [6] содержатся основные положения стереометрической металлографии, представляющие собой систему методов микроскопического анализа и позволяющих по количественным измерениям на плоскостной структуре рассчитать геометрические параметры действительной пространственной микроструктуры металлов и сплавов. Особенностью



исследования является обоснование применения финитного двойного нормального распределения (ДНР), полученного профессором Котельниковым В.П. [7] для оценки статистических параметров микроструктуры конструкционных сталей.

При проведении исследований использовались сертифицированные конструкционные стали марок: Ст10, Ст22, Ст30, Ст40 и Ст55. Образцы этих сталей были нормализованы и подготовлены в виде микрошлифов (рис.4- 6).

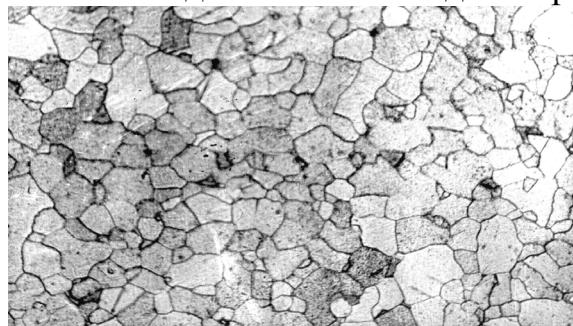


Рис.4. Техническое железо ($\times 500$) отжиг

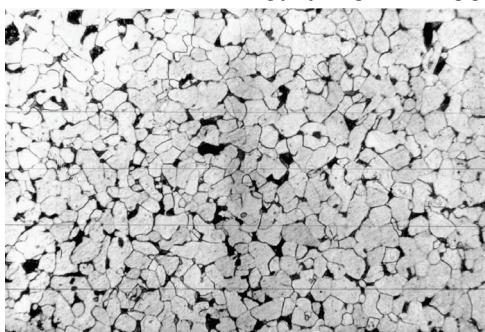


Рис.5. Сталь 20 ($\times 500$) отжиг

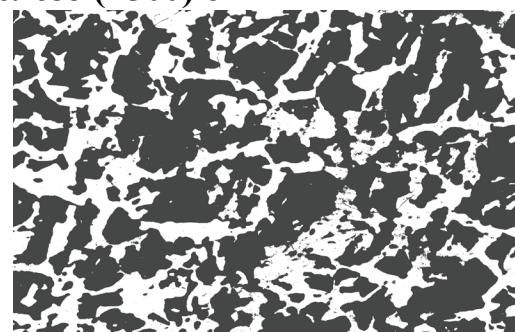


Рис.6. Сталь 45 ($\times 1000$) отжиг

Используя линейный метод определения структурного состава сплава [6], были определены линейные размеры зерен феррита. Объемы выборки для разных сталей приведены в табл.1.

В процессе обработки экспериментальных данных получены значения математических ожиданий линейных размеров зерен феррита исследуемых сталей.

Таблица 1

Объемы выборки для разных сталей

Марки сталей	Ст10	Ст22	Ст30	Ст40	Ст55
Объем выборки	1089	927	1021	713	987

Для их корректного использования в математических моделях необходим выбор аппроксимирующей зависимости изменения линейных размеров зерен от процентного содержания углерода содержащегося в стали. В результате подбора функциональных зависимостей (в качестве основных рассматривались линейная, экспоненциальная и степенная аппроксимации экспериментальных данных) установлено, что наибольшее приближение обеспечивает линейная аппроксимация (величина достоверности аппроксимации $R^2=0.9667$), которую



можно записать в виде выражения (1) для расчета линейного размера зерна феррита для сталей с различным содержанием углерода:

$$d = -0,0249 \cdot \%C + 0,0212, \quad (1)$$

где d – линейный размер зерна феррита, мм;

$\% C$ – процентное содержание углерода в стали.

При обработке статистического материала необходимо было решить задачу выравнивания статистических рядов. Как правило, в большинстве случаев в металлографии для анализа параметров микроструктуры в качестве основного используется нормальный закон распределения. Однако следует отметить, что в реальных образцах микрошлифов числовые характеристики измеряемых величин принимают конечный характер, определяемый законами материаловедения. В связи с этим более предпочтительным является использование финитных распределений. В частности, на наш взгляд, наиболее удачным для этих целей является двойное нормальное распределение (*SN*-распределение), полученное профессором Котельниковым В.П. [7]. Его несомненным преимуществом является возможность задания двух границ изменения случайной величины, что равносильно знанию еще двух моментов асимметричного распределения.

При использовании *SN*-распределения необходимо задание математического ожидания m , дисперсии D и пределов изменения случайной величины a и b .

В этом случае плотность и функция *SN*-распределения случайной величины $U (a < u < b)$ имеет вид (2):

$$f(u) = g(z(u)) \cdot \frac{d}{du} z(u),$$

$$F(u) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \left(\int_{-\infty}^{z(u)} e^{\frac{-\xi^2}{2}} d\xi \right). \quad (2)$$

Здесь

$$g(z(u)) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{\frac{-z(u)^2}{2}}, \quad z(u) = \gamma + \eta \cdot \nu.$$

Параметры формы распределения γ , η определяются выражениями (3):

$$\eta = \left[\left(\frac{1}{\sin \left(\pi \cdot \frac{D}{2 \cdot (b-m) \cdot (m-a)} \right)} \right) - 1 \right]^{0.5}, \quad \gamma = -\nu \cdot \sqrt{(\eta^2 + 1)}, \quad (3)$$

где ν – квантиль стандартного нормального распределения, вычисляемая по формуле Гастингса [8] при уровне вероятности $p = (m-a)/(b-m)$.

В результате статистической обработки результатов измерений линейных



размеров зерен феррита d рассчитаны распределения плотностей вероятности: экспериментальной, нормальной и двойной нормальной.

Для обоснования применения SN -распределения для анализа микроструктуры конструкционных сталей воспользуемся методом, предложенным в работе [9]. Здесь предлагается отказаться от традиционной проверки согласования генеральных и эмпирических распределений по критериям χ^2 , Колмогорова, ω^2 и их модификациям, а вместо этого при объемах выборок $n > 5$ гипотезу об адекватности проверять методом регрессионного анализа.

Оценки дисперсии адекватности представим в виде

$$s_a^2 = (n - m)^{-1} \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p}_i)^2, \quad (4)$$

где p_i - эмпирическая вероятность случайной величины;

\bar{p}_i - предсказанная вероятность случайной величины;

m - число параметров генерального распределения.

Дисперсия эмпирической функции

$$s^2 = (n - 1)^{-1} \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p}_i)^2, \quad (5)$$

где $\bar{p}_i = n^{-1} \sum_{i=1}^n p_i$.

Для проверки с уровнем значимости α гипотезы $H_0: \sigma^2 = \sigma_a^2$ против альтернативной гипотезы $H_1: \sigma^2 > \sigma_a^2$ используют статистику $F = \frac{s^2}{s_a^2}$, распределение которой может иметь различный вид.

Так как распределение статистики F неизвестно, то для проверки адекватности предлагается использовать коэффициент детерминации

$$d^* = \frac{s^2}{s_a^2}, \quad 0 \leq d^* \leq 1. \quad (6)$$

При этом меньший коэффициент детерминации свидетельствует о предпочтительности выбора закона распределения.

Используя для расчетов данные статистического анализа микроструктур из работы [5] по формулам (4)-(7) определим коэффициенты детерминации для сталей.

В табл. 2 представлены результаты расчетов.

Расчетные данные показали, что во всех случаях $d_{SN}^* < d_{HP}^*$. Это позволяет сделать вывод о предпочтительности применения SN -распределения для статистического анализа микроструктур конструкционных сталей по сравнению с применяемым нормальным распределением.



Таблица 2

Коэффициенты детерминации при выборе нормального закона распределения и *SN*-распределения.

	Сталь 10	Сталь 22	Сталь 30	Сталь 40
d_{HP}^*	0,186	0,267	0,323	0,177
d_{SN}^*	0,039	0,067	0,114	0,086

В табл. 3 приведены коэффициенты корреляции между экспериментальными данными и данными, рассчитанными с использованием нормального и *SN* распределений.

Таблица 3

Коэффициенты корреляции

Марки сталей	Ст10	Ст22	Ст30	Ст40	Ст55
Коэффициенты корреляции данных					
Эксперимент – <i>SN</i> - распределение	0,99342	0,997357	0,983258	0,997853	0,994782
Эксперимент – Нормальное распределение	0,959769	0,952703	0,890454	0,959847	0,987224

При использовании количественных оценок параметров микроструктуры важным вопросом является знание возможной погрешности полученной оценки.

Разница между истинной средней величиной линейного размера зерна феррита для рассматриваемых сталей и найденной из опыта средней арифметической выборки a_i ($i=1\dots 5$ по количеству сталей) составляет абсолютную статистическую ошибку ε определения (при объеме выборки, составляющем $z=10$ измерений на каждую сталь):

$$\varepsilon = \left| a - \bar{a} \right| \quad (7)$$

Поскольку истинная средняя величина размера зерна a неизвестна, определить ошибку по формуле (7) невозможно. В этом случае рассчитаем ее по формуле:

$$\varepsilon = t \cdot \sigma(\bar{a}) \quad (8)$$

где $\sigma(\bar{a})$ — среднее квадратичное отклонение средней арифметической выборки (выборочной средней); t — нормированное отклонение.

Среднее квадратичное отклонение выборочной средней $\sigma(\bar{a})$ определено экспериментально по результатам повторных выборок. Для этого на микрошлифах каждой стали в нескольких полях зрения проведены по 10 выборок и определены для каждой выборки средние арифметические величины линейные размеры зерен феррита (выборочные средние).



При этом среднее квадратичное отклонение средней арифметической выборки рассчитывается по выражению:

$$\sigma(\bar{a}) = K \sqrt{\frac{\bar{a}_1^2 + \bar{a}_2^2 + \dots + \bar{a}_{10}^2}{z} + (\bar{a}_i)^2}, \quad (9)$$

где \bar{a}_i — средняя арифметическая всех выборочных средних.

Поправочный коэффициент K зависит от объема выборки и зависит от числа выполненных независимых измерений.

$$K = \sqrt{\frac{z}{z-1}}. \quad (10)$$

Подставляя в выражение (7) число независимых измерений $z=10$ получим, что в нашем случае $K=1,054$.

Результаты расчетов средних квадратичных отклонений выборочных средних для исследуемых сталей представлены в табл.4.

Таблица 4
Результаты расчетов средних квадратичных отклонений выборочных средних для исследуемых сталей

Марки сталей	Ст10	Ст22	Ст30	Ст40	Ст55
$\sigma(\bar{a})$	5,35 %	11,28 %	6,19 %	8,94 %	5,75 %

Полученные значения средних квадратичных отклонений выборочных средних, использованы для расчета абсолютной статистической ошибки определения по (8).

Вторая входящая в выражение (8) величина — нормированное отклонение t рассчитывается для различных уровней доверительной вероятности P . В табл.5 приведены некоторые значения t в зависимости от P .

Таблица 5
Нормированное отклонение

P	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95
t	0,6745	0,8416	1,0364	1,2816	1,6449	1,9600

В металлографическом анализе [7] принято оценивать ошибку статистического определения для 50%-ной доверительной вероятности ($P=0,50$). Однако при использовании результатов исследования в технических приложениях этого не достаточно и, как правило, используется 90 % и выше доверительная вероятность.

В этом случае для $P=0,9$ нормированное отклонение $t=1,6449$.

Таким образом, абсолютная ошибка анализа ε для исследуемых сталей приведена ниже (табл.6):

В целом результаты исследований показали достаточную точность полученных экспериментальных данных, что позволяет рекомендовать их для использования при построении математических моделей.



Таблица 6

Абсолютная ошибка анализа

Марк и сталей	Ст10	Ст22	Ст30	Ст40	Ст55
ε	8,8 %	18,6 %	10,2 %	14,7 %	9,5 %

Следует отметить, что применение полученных функциональных зависимостей математических ожиданий линейных размеров зерен феррита от процентного содержания углерода в конструкционных сталях и использование двойного нормального распределения при статистическом описании результатов металлографического анализа позволяют повысить точность математических моделей, описывающих структуру диагностируемого объекта, что в свою очередь обеспечивает большую достоверность результатов контроля.

Полученные результаты оценки статистических параметров микроструктуры конструкционных сталей позволяют перейти к непосредственному моделированию взаимодействия доменных стенок с дефектами структуры ферромагнитных материалов [10].

Для определения энергии взаимодействия $U(x)$ жесткой доменной стенки и дислокационным модулем примем следующие допущения:

1. структура стенки не меняется под влиянием дислокационного модуля;
2. распределение спинов в стенке линейное;
3. анизотропия несущественна.

Силу, с которой параллельный дислокационный модуль действует на стенку, находящуюся на расстоянии x , представим в виде

$$F_n = -b \cdot \tau_{DM} \cdot \lambda_s \cdot x, \quad (11)$$

где b – вектор Бюргерса;

λ_s – константа магнитострикции;

τ_{DM} – напряжение, создаваемое дислокационным модулем.

Чаще всего напряжение, создаваемое дислокационным модулем определяется выражением

$$\tau_{DM} = \alpha \cdot M_0 \cdot G \cdot b^2 \cdot \sqrt{m \cdot \rho}, \quad (12)$$

здесь α – константа;

M_0 – ориентационный множитель для α -Fe;

G – модуль сдвига; m – число дислокаций;

ρ – плотность дислокаций.

Знак « - » в выражении (11) означает, что сила, действующая на стенку, направлена в сторону от дислокационного модуля.

Энергия, затраченная на перемещение доменной стенки равна

$$U(x) = - \int F_n dx = \frac{1}{2} \cdot b \cdot \tau_{DM} \cdot \lambda_s \cdot x^2 + C_1, \quad (13)$$

где C_1 – постоянная интегрирования. Члены энергии стенки, зависящие от смещения, могут быть записаны в виде



$$H(x) = U(x) \cdot \delta_0 \cdot s - 2 \cdot H_0 \cdot M_s \cdot \delta_0 \cdot s \cdot x, \quad (14)$$

здесь δ_0 – толщина доменной стенки; s – средняя площадь доменной стенки.

Подставив (14) в (5) с учетом (11), вычислим число стенок совершивших скачек за время Δt , если внешнее поле изменяется по закону $H_0 = \beta \cdot \sin(\omega \cdot t)$, рассматривая стенки, попавшие в интервал от θ до x_m .

После взятия интегралов в числителе и знаменателе получим

$$n = N \cdot \frac{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{2 \cdot m_x \cdot a - A \cdot \sin(\omega \cdot t)}{\sqrt{k \cdot T \cdot a}}\right)}{1 - \operatorname{erf}\left(-\frac{A \cdot \sin(\omega \cdot t)}{\sqrt{k \cdot T \cdot a}}\right)}, \quad (15)$$

где $\operatorname{erf}(z)$ – интеграл ошибок;

$$a = G \cdot b^2 \cdot \lambda_s \cdot \sqrt{\rho};$$

$$A = 2 \cdot \beta \cdot M_s \cdot \mu_0,$$

Для вычисления (15), разложим $\operatorname{erf}(z)$ в ряд, удерживая первые два члена разложения.

$$n = N \cdot \frac{1 - \frac{2 \cdot m_x \cdot a - A \cdot \sin(\omega \cdot t)}{\sqrt{k \cdot T \cdot a}}}{1 + \frac{A \cdot \sin(\omega \cdot t)}{\sqrt{k \cdot T \cdot a}}}. \quad (16)$$

Частота скачков f может быть получена дифференцированием (16) по времени.

Подставляя (16) в (3) окончательно получим выражение для спектральной плотности магнитного шума в фиксированный момент времени $t = \frac{H_c}{\beta}$ (H_c – коэрцитивная сила)

$$S_x = A \cdot \cos\left(\omega \cdot \frac{H_c}{\beta}\right) \cdot \omega \cdot N \cdot \frac{8 \cdot a \cdot m_x \cdot F^2}{\left[C + A \cdot \sin\left(\omega \cdot \frac{H_c}{\beta}\right)\right]^2}, \quad (17)$$

$$\text{здесь } C = \sqrt{k \cdot T \cdot a \cdot \pi}.$$

В случае линейного закона изменения внешнего поля $H_0 = \beta \cdot t$

$$S_x = A \cdot N \cdot \frac{4 \cdot m_x \cdot a \cdot F^2}{\left(C + A \cdot \frac{H_c}{\beta}\right)^2} \quad (18)$$

Уже в нормальном состоянии в конструкционных сталях существует



достаточно большое количество дислокаций, которые наряду с другими факторами определяют их физико-механические свойства [4]. Так плотность дислокаций в феррите составляет порядка $\rho_{\phi} \approx 10^7 \div 10^8 \text{ см}^{-2}$.

В представленных расчетных зависимостях спектральной плотности магнитного шума изменяющимся параметром является математическое ожидание линейного размера феррита m_x с учетом вида термической обработки.

$$m_x^{\text{TO}} = k_{\text{TO}} \cdot m_x \quad , \quad (19)$$

Здесь k_{TO} – коэффициент учета вида термической обработки.

С учетом зависимости, приведенной на рис.2, расчетные значения k_{TO} приведены в табл.7.

Таблица 7

Расчетные значения k_{TO}

Вид термической обработки	Отжиг	Нормализация	Закалка и высокий отпуск	Закалка и средний отпуск	Закалка и низкий отпуск	Закалка
k_{TO}	1	0,5	0,33	0,23	0,17	0,07

2.3. Экспериментальные оценки взаимосвязи структурного состояния конструкционных материалов с информативными параметрами магнитного шума

2.3.1 Экспериментальный стенд и образцы

Для выполнения задач исследований был создан экспериментальный стенд, позволяющий регистрировать магнитные шумы, возникающие при воздействии переменного электромагнитного поля на материал деталей; проводить измерение параметров внешних воздействий, действующих на деталь; обрабатывать параметры магнитных шумов с целью решения задачи определения связи параметров магнитного шума с физическими характеристиками ферромагнитных конструкционных материалов.

В состав стенд (рис.7) входят стандартные промышленные измерительные приборы: осциллограф С1-114, частотомер ЧЗ-63/1, задающий генератор ГЗ-118, и специально изготовленные усилитель мощности (УМ) с коэффициентом гармоник 0,1%, мощностью 50 Вт; блок преобразователей (БПр), представляющий из себя проходные перемагничивающую и сигнальную катушки L1 и L2 соответственно, прибора регистрации и измерения параметров магнитного шума ИТ-2 [10].

По существу ИТ-2 является усилительно-преобразующим прибором. Так как ЭДС, наводимая в сигнальной катушке составляет величину единиц микровольт, то для того, чтобы с данным сигналом можно было производить операции обработки, его надо усилить в $\approx 10^5$ раз.

Для этого используются два каскада усиления, собранные на операционных усилителях К574УД1А. С учетом того, что спектр сигнала МШ



находится в области выше 100 кГц, то для его фильтрации, т.е. устранения низкочастотной составляющей сигнала перемагничивания ($f=45$ Гц) и его гармоник применяются фильтры низкой частоты, с частотой среза порядка 80-90 кГц. Трехзвенные фильтры НЧ собраны на пассивных радиоэлементах, и обеспечивают подавление всех низкочастотных составляющих, возникающих в тракте прибора. Компоновка фильтр, усилитель, фильтр, усилитель позволяет достичь удовлетворительных результатов по усилению сигнала и подавлению помех, а также исключает возникновение ВЧ гармоник самого усилительного тракта. Фотография осциллограммы на рис.8.

Далее полученный сигнал может подаваться на стандартные измерительные приборы и проводится его дальнейшая обработка. В детекторе D выделяется огибающая сигнала, которая преобразуется выпрямителем в постоянное напряжение, уровень которого пропорционален измеряемому параметру исследуемой детали.

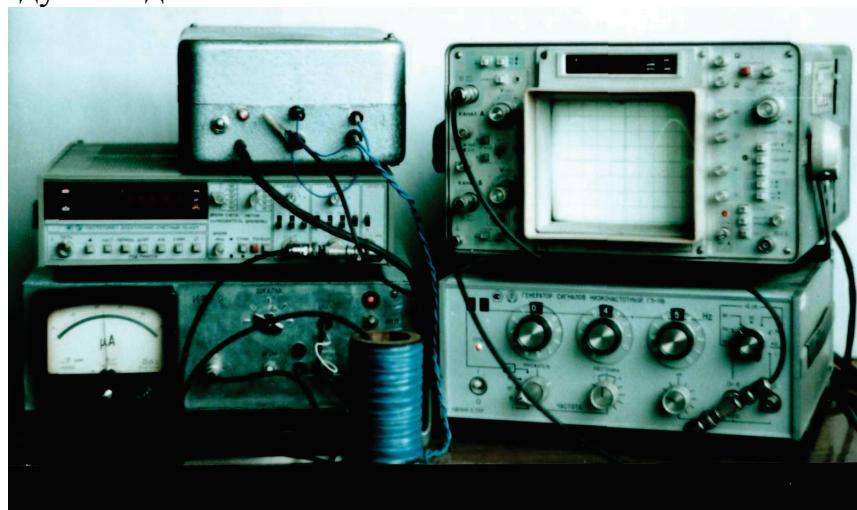


Рис.7. Экспериментальный стенд

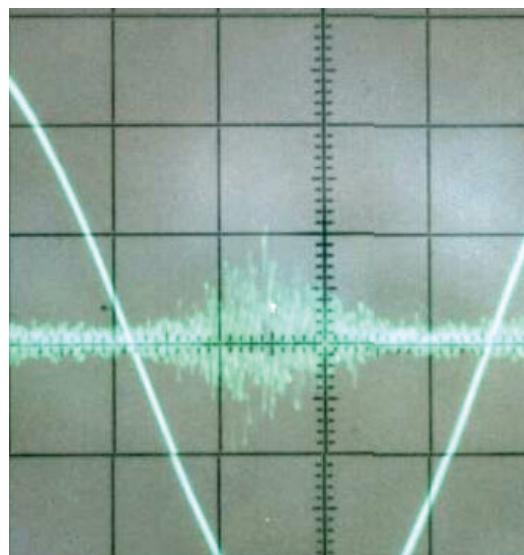


Рис.8. Осциллограмма магнитного шума

Работа стенда осуществляется следующим образом: исследуемые образцы помещаются в блок преобразователей, где они перемагничиваются с помощью



катушки L1 переменным магнитным полем заданной частоты и напряженности. Частота и уровень напряженности перемагничивающего сигнала задаются с помощью генератора Г3-118. Усиление до необходимой величины производится усилителем мощности (УМ). В сигнальной катушке L2 наводится ЭДС шумов Баркгаузена. Наведенное напряжение суммарного сигнала шумов поступает в прибор ИТ2. Здесь происходит усиление сигнала до необходимой величины ($K_u \approx 10^5$), его фильтрация, детектирование и выпрямление.

Средняя амплитуда огибающей МШ измеряется прибором ИТ-2 и отсчитывается по стрелочному прибору. Входящий в состав стенда двухканальный осциллограф позволяет визуально наблюдать усиленный сигнал магнитного шума (рисунок 8), определять его длительность, сдвиг по фазе относительно сигнала перемагничивания, крутизну фронтов огибающей, а также контролировать частоту и амплитуду сигнала задающего генератора. Частотомер ЧЗ-63/1 позволяет измерять частоту следования импульсов МШ при определенном уровне дискриминации. Уровень дискриминации задается уровнем срабатывания счетчика импульсов частотомера и регулируется рукояткой "Уровень".

Таким образом, созданный стенд позволяет измерять следующие параметры:

- среднюю амплитуду МШ при постоянном уровне напряженности перемагничивающего поля;
- длительность огибающей сигнала, крутизну фронтов;
- сдвиг фазы МШ относительно перемагничивающего сигнала;
- частоту следования импульсов МШ на определенном уровне дискриминации при постоянном и переменном уровне напряженности магнитного поля.

Все эти измерения стенд позволяет производить в двух режимах: при постоянном уровне напряженности магнитного поля и постоянном уровне выходного сигнала. Регулировка уровня напряженности электромагнитного поля производится установкой соответствующей амплитуды сигнала задающего генератора.

Кроме того, существует возможность изменения в широких пределах частоты сигнала перемагничивания. Диапазон изменения частоты определяется частотной характеристикой УМ (Рабочая частота -20 Гц...20 кГц).

В связи с тем, что задачей исследований является установление взаимосвязи параметров магнитного шума с физическими характеристиками конструкционных материалов, то в качестве исследуемых материалов взяты конструкционные стали, с разным содержанием углерода, а именно сталь 20, сталь 30, сталь 45, сталь 55 [11-14]. Для того чтобы считать напряженность поля одинаковой по всей длине исследуемого образца он должен удовлетворять требованию отношения длины к диаметру 10 к 1.

Для удобства изготовления и проведения исследований образцы изготавливались цилиндрической формы, диаметром 5,5 мм и длиной 55 мм.



2.3.2 Методика проведения экспериментальных исследований

Так как целью исследований является установление взаимосвязи параметров магнитошумового сигнала с физическим состоянием конструкционных материалов, применяемых при производстве деталей технологического оборудования, то и определение наиболее информативных параметров, и методика проведения исследований должна позволять наиболее эффективно определять эти параметры. А именно, каким образом влияет содержание углерода в стали, режимы ее термообработки на параметры магнитошумового сигнала. В качестве исследуемых материалов взяты доэвтектоидные углеродистые конструкционные стали четырех марок: сталь 20, сталь 30, сталь 45, сталь 55, равномерно распределенные в диапазоне изменения % содержания углерода, как наиболее широко применяемые в общем машиностроении, и в частности, для изготовления силовых элементов технологического оборудования различного назначения.

Чистота обработки поверхности образцов $Ra=10\text{мкм}$.

Образцы подвергались всем видам термообработки в муфельных печах МП6. Данные по режимам термообработки представлены в табл. 8.

Время выдержки образцов при заданной температуре 5 минут. Режимы охлаждения после нагрева следующие:

- после отжига - охлаждение вместе с печью;
- после закалки - охлаждение в воде;
- после всех видов отпуска и нормализации - охлаждение на воздухе.

Таблица 8
Режимы термообработки

Марка стали	Температура, С					
	отжиг	закалка	низкий отпуск	средн. отпуск	высок. отпуск	нормализация
Ст.20	890	890	200	400	600	890
Ст.30	860	860	200	400	600	860
Ст.45	840	840	200	400	600	840
Ст.55	790	790	200	400	600	790

После термообработки образцы обрабатывались наждачной бумагой №1 для снятия окалины. Исследовались следующие параметры магнитных шумов:

- средняя амплитуда ($U_{\text{ср}}$) выпрямленного сигнала магнитного шума;
- частота следования (f) импульсов в сигнале на определенном уровне дискриминации при $U_{\text{вых}} = \text{const}$ для всех режимов термообработки;
- длительность сигнала ($\tau_{\text{ш}}$);
- сдвиг фазы ($\Delta\varphi$) сигнала магнитного шума относительно перемагничивающего сигнала;
- длительность фронта спада $\tau_{\text{сп}}$.

Средняя амплитуда ($U_{\text{ср}}$) сигнала контролировалась по стрелочному индикатору прибора ИТ-2. Частота следования импульсов определялась с помощью частотометра ЧЗ-63/1. Временные параметры сигнала ($\tau_{\text{ш}}, \Delta\varphi, \tau_{\text{сп}}$)



определялись визуально на экране осциллографа С1-114.

Исследование проводилось в следующем порядке:

- частота сигнала перемагничивания выбрана 45 Гц; (из условия получения максимальной амплитуды сигнала магнитного шума для всех видов сталей)

- подготовленный образец устанавливался в блок преобразователей;

- при уровне выходного сигнала задающего генератора 0,1 В определялась $U_{ср}$, F , измерялись $\tau_{ш}$, $\Delta\varphi$, $\tau_{сп}$;

- путем изменения амплитуды выходного сигнала задающего генератора определялась минимальная частота следования импульсов составляющих магнитный шум. (Эффект наличия минимальной частоты следования импульсов заполнения магнитошумового сигнала при определенном уровне напряженности перемагничивающего поля был обнаружен в ходе проведения экспериментальных исследований.) Измерение всех параметров повторялись после соответствующей термообработки образцов. Данные измерений подробно представлены в [12, 13].

Частота следования импульсов заполнения МШ измерялась в кГц, временные параметры сигнала в миллисекундах, амплитуда выходного сигнала задающего генератора в вольтах (V). Измерение $U_{ср}$ проводилось по стрелочному индикатору прибора ИТ-2 в милливольтах.

2.3.3 Обоснование выбора информативных параметров

В результате проведения измерений параметров $U_{ср}$, F , $\tau_{ш}$, $\Delta\varphi$, $\tau_{сп}$ при всех видах термообработки выбранных марок сталей, получены данные, которые нуждаются в предварительной оценке. Еще в ходе проведения экспериментов было отмечено, что такие параметры, как $\tau_{ш}$, $\Delta\varphi$, $\tau_{сп}$ слабо связаны с физическими характеристиками сталей и не позволяют однозначно судить об изменении содержания углерода и режимах термообработки материала [14].

В ходе проведения измерений был обнаружен эффект наличия минимума частоты следования импульсов магнитного шума при определенном, зависящем от марки стали и вида термообработки, фиксированном значении напряженности перемагничивающего поля. Для простоты отсчетов в качестве этого параметра берется амплитуда входного напряжения усилителя мощности, так как коэффициент усиления УМ постоянен.

Исследования показали, что имеется частота F_{min} спектра сигнала магнитного шума для определенного значения $U_{вх}$ в зависимости от вида термообработки и содержания углерода. Следовательно эту зависимость $F_{min}(U_{вх})$ можно принять за, параметр, который отражает основные физические характеристики материала (% содержание углерода, твердость).

Объяснение этого эффекта связано с явлением кластерообразования, смысл которого заключается в том, что при увеличении напряженности перемагничивающего поля выше определенного значения отдельные импульсы магнитного шума начинают сближаться и сливаться, т.е. образуются отдельные пачки импульсов (кластеры). В результате количество импульсов в суммарном сигнале магнитного шума и, следовательно, частота их следования



уменьшается.

Кроме рассмотренных характеристик F_{min} и U_{bx} информативным параметром является средняя амплитуда МШ (U_{cp}), которая отражает твердость исследуемого материала. Но эта характеристика не является универсальной и однозначной, так как одно и то же значение U_{cp} для разных сталей и разных видов термообработки не дает одинаковое значение твердости.

2.3.4 Обработка результатов экспериментальных исследований

С целью возможного использования результатов эксперимента и установления функциональной взаимосвязи информативных параметров магнитного шума с факторами, определяющими вид термической обработки ферромагнитного материала, полученные данные обработаны методами регрессионного анализа. Подробное описание получения регрессионных моделей для отожженных и закаленных образцов представлено в работах [11, 15].

По аналогии с математической обработкой экспериментальных данных для образцов при отжиге и закалке проведена обработка результатов экспериментальных данных для образцов, подвергнутых трем видам отпуска (низкий, средний, высокий).

Модели, полученные методом полного двухфакторного эксперимента и описывающие зависимость информативных параметров магнитного шума от содержания углерода и температуры отпуска для всех видов термообработки для сталей ст.20, ст.30, ст.45, ст.55, представлены в табл. 9 и позволяют определить значения информативных параметров ($U_{вых}$, F_{min} , U_{bx}) для экспериментальной установки, имеющей коэффициент усиления К.

Следует отметить, что представленные в табл.9 модели построены только на основе экспериментальных данных и не позволяют проводить оценки состояния материала конструкции при их проектировании для прогнозирования заданных свойств.

Таблица 9

Регрессионные модели

Вид термообработки	Регрессионные модели
Отжиг	$U_{вых}=145.0-216.7\%C-0.11T_0+0.19T_0\%C$ $F_{min}=165.4+178.0\%C+0.04T_0-0.18T_0\%C$ $U_{bx}=-1.76+4.8\%C+0.001T_0-0.004T_0\%C$
Закалка	$U_{вых}=30.5-25.7\%C+0.007T_3+0.0025\%CT_3$ $F_{min}=120.45+45.5\%C+0.1T_3-0.48\%CT_3$ $U_{bx}=-0.90+7\%C+0.001T_3-0.004\%CT_3$
Низкий отпуск	$U_{вых}=252.1-424.5\%C-1.11T_H+1.97\%CT_H$ $F_{min}=108.3+568\%C+0.48T_H-2.55\%CT_H$ $U_{bx}=-1.14+5.03\%C+0.004T_H-0.02\%CT_H$
Средний отпуск	$U_{вых}=441.4-85.6\%C-1.02T_C+2.05\%CT_C$ $F_{min}=-38+1030\%C+0.6T_C-2.5\%CT_C$ $U_{bx}=-7.92+24.1\%C+0.02T_C-0.06\%CT_C$
Высокий отпуск	$U_{вых}=927.7-1597.7\%C-1.48T_B+2.6\%CT_B$ $F_{min}=-42.8+2056\%C+0.94T_B-10\%CT_B$ $U_{bx}=-64+10\%C+0.006T_B-0.02\%CT_B$



В этом случае предпочтительнее использовать комплексный подход к решению такого типа задач.

С учетом высказанных предположений и проведенных исследований выражение для расчета $U_{\text{вых}}$ выглядит следующим образом

$$U_{\text{вых}} = a_n \cdot S_x + b_n, \quad (20)$$

здесь a_n и b_n нормировочные коэффициенты.

На рис.9 представлено сравнение результатов расчетов по зависимости (20) (непрерывные линии) с обработанными данными, представленными в работах [10-15] (маркеры). Цифрами обозначены: 1- отжиг, 2- закалка и высокий отпуск, 3 - закалка и средний отпуск, 4- закалка и низкий отпуск, 5 – закалка.

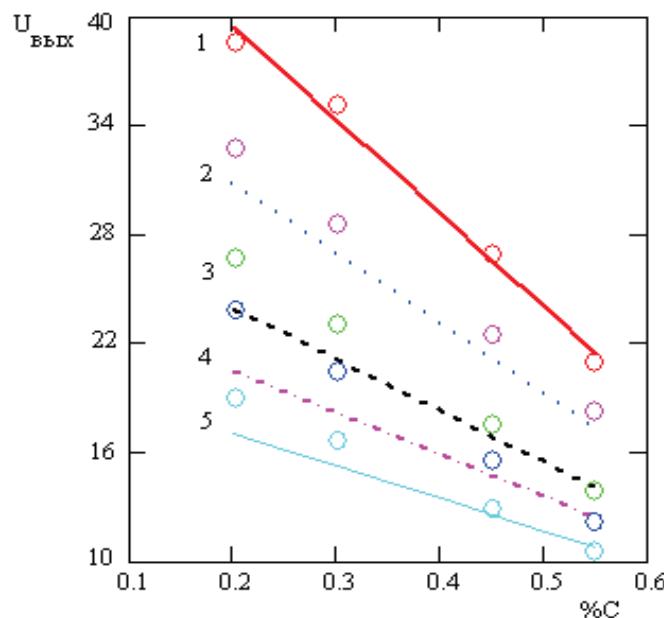


Рис.9. Сравнение результатов расчетов выходного напряжения по зависимости (20) с экспериментальными данными

2.3.5 Методика прогнозирования состояния деталей и элементов технологического оборудования различного назначения на этапе производства

Проведенные исследования показали возможность предложения методики прогнозирования состояния и свойств деталей и элементов технологического оборудования и технических систем различного назначения на этапе их производства [16].

Так последовательность операций, необходимых для прогнозирования выглядит следующим образом:

1. Подготовка измерительного стенда к работе.

При подготовке стенда к работе учитываются конструктивные особенности контролируемой детали и ее заявленные физико-механические свойства, обуславливающие конструкцию измерительного преобразователя и режим измерений (параметры переменного электромагнитного поля).

2. Снятие показаний.



Регистрируются в журнале информативные параметры магнитного шума ($U_{\text{вых}}$, F_{min} , $U_{\text{вх}}$).

3. Расчет значений информативных параметров по зависимостям, приведенным в табл.9.

По данным нормативно-технической документации и с учетом зависимостей табл.9 производится расчет (при необходимости строятся тарировочные графики) информативных параметров магнитного шума $U_{\text{вых}}$, F_{min} , $U_{\text{вх}}$.

4. Анализ измеренных и расчетных значений.

Сравнение результатов измерений и расчета может быть осуществлено по справочным таблицам (заранее подготовленным для конкретных деталей или материалов) или при помощи ЭВМ методами наименьших квадратов и максимального правдоподобия.

5. Принятие решения о дальнейшем производстве или корректировке технологического процесса.

Принятие решения о корректировке технологического процесса может быть принято вследствие некоторых причин субъективного и объективного характера. Так в процессе производства возможны отклонения выходных параметров используемого оборудования, несоответствия заявленным в сертификате данным поставляемых материалов, человеческий фактор и т.п. В этом случае существует необходимость срочного принятия мер организационного или технического характера для предотвращения появления бракованных изделий.

Выводы

Идентификация состояния поступающих ферромагнитных материалов и качества их термической обработки важная прикладная задача, решение которой позволяет в конечном итоге значительно повысить надежность и безопасность функционирования изготавливаемых объектов и систем.

В соответствии с предлагаемой условной схемой определены внешние, структурные и выходные параметры модели. Особенностью анализа явилось применение финитного двойного нормального распределения, сформулированного профессором Котельниковым В.П., для оценки статистических параметров микроструктуры конструкционных сталей, что позволило увеличить точность оценки фазовых составляющих материала. Расчет погрешности металлографического анализа показал достаточную точность полученных данных, что позволило рекомендовать их при построении математических моделей.

Металлографический анализ функциональной зависимости математического ожидания линейного размера зерна феррита от процентного содержания углерода в стали получить выражение для расчета спектральной плотности магнитного шума, нормирование значений которой к выходным параметрам диагностического прибора позволяет установить вид термической обработки материала детали и оценить степень ее соответствия требованиям нормативных документов.



С помощью созданного экспериментального стенда получены новые данные по взаимосвязи информативных параметров магнитного шума с физическим состоянием материала. Исследования выявили новый параметр – минимум частоты следования импульсов магнитного шума, который был использован для решения задачи входного контроля конструкционных сталей, т.е. разбраковки материала по маркам.

Предложенная методика прогнозирования состояния деталей на этапе производства позволит оперативно вносить корректизы в технологические процессы их изготовления по результатам проведения контрольных операций магнитошумовым методом неразрушающего контроля.



ГЛАВА 3. УПРАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА АВТОМОБИЛЕСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Введение

В условиях жесткой конкуренции автомобилестроительные предприятия вынуждены искать способы совершенствования процессов и повышения качества продукции. Для сохранения своей конкурентоспособности предприятия должны быстро реагировать на изменения требований рынка, повышать гибкость и прозрачность производства, оптимизировать процессы планирования, снижать время простоя оборудования, повышать качество продукции. Данная ситуация вынуждает производителей в качестве основополагающих принципов развития использовать принципы системного подхода к управлению, при котором процессы во всех подсистемах (в частности, в подсистеме внутрипроизводственного транспорта и производственной подсистеме) оптимизируются в соответствии и с учетом общей цели — повышения эффективности производства и качества выпускаемой продукции. Это обусловлено тем, что объектом управления в производственном цикле является материальный поток, который, в свою очередь, участвует в двух процессах — производственном и транспортном [2].

Кроме всего прочего стоит отметить, что большое количество производственных линий современных предприятий роботизированы полностью или частично. Это требует иного подхода к управлению, поскольку эффективность работы такого оборудования в значительной степени зависит от качества его обслуживания, которое влияет на показатели доступности, производительности и качества конечного продукта.

Исходя из вышесказанного, повышение эффективности работы производственных систем требуют комплексного подхода, что в свою очередь вызывает необходимость в интеллектуализации процессов управления. Для этих целей часто создают СППР - системы поддержки принятия решений (Decision Support System – DSS). Такие системы содержат модули сбора, хранения и анализа информации. Поиск оптимальных решений в СППР основан на анализе поведения модельных систем. В СППР модель системы реализуется в виде имитационной модели и выступает в роли интеллектуального ядра [12]. Интеграция таких систем позволяет снизить не только издержки основного производства, но и общие логистические затраты.

3.1. Методы и модели управления процессами поточного производства

3.1.1. Методы и модели совершенствования поточного производства

В процессе производства крупногабаритных изделий больших объемов, таких как грузовые автомобили, может возникнуть ряд проблем: ограничение площади складирования межоперационных запасов, ограничение зонирования, создание сбалансированного потока, минимизация времени поставки комплектующих на позиции конвейера и т.п. Авторы многочисленных исследований предлагают использование моделей для снижения издержек, возникающих на разных этапах производственно-технологического процесса.



Так, одна из важнейших задач организации поточного производства – задача балансировки линии.

Авторами статьи [11] для балансировки односторонних и двусторонних поточных линий предложена модель, в которой учитываются ограничения зонирования и очередности, синхронные и позиционные ограничения, буфер времени. Целевая функция модели максимизирует эффективность линии, минимизирует индекс гладкости и общие затраты на единицу продукции. В качестве примера авторы приводят моделирование балансировки двусторонней линии сборки шасси автомобильной техники, итогом расчетов является снижение на 42% общих затрат на единицу шасси.

В условиях жесткой конкуренции на рынке автокомпонентов конкурентоспособность обеспечивается за счет высокого качества продукции при низкой ее себестоимости. Это требует от производителей поиска методов минимизации издержек на всех этапах производства. Для решения задач балансировки сборочных линий с учетом затрат применяются точные методы, эвристические и метаэвристические подходы [3, 6, 13]. Разработанные подходы сочетают в себе эвристические модели и точные алгоритмы, основанные на поиске «табу» с целью минимизации краткосрочных эксплуатационных расходов, капитальных вложений, затрат труда и незавершенного производства.

Неэффективная организация производства и неоптимальная внутрипроизводственная логистика вносят существенный вклад в ухудшение экологической обстановки, поэтому ряд исследований направлены на оптимизацию планирования работы технологического транспорта с учетом его негативного воздействия на окружающую среду. Так, авторы исследования [7] разработали концепцию оптимизации поставок комплектующих на завод по производству автомобильной техники. Снижение объема выбросов CO₂ на 3% было достигнуто путем сокращения числа погрузчиков за счет увеличения скорости движения технологического транспорта и размера партии. В работе [14] исследуется влияние типа двигателя погрузчиков (дизельный, газовый, электрический) на характер воздействия на окружающую среду. Авторы делают вывод, что электрические погрузчики являются более эффективными с экологической точки зрения, однако, при этом не учитывают экономические и технологические факторы (стоимость погрузчиков, простой погрузчиков для зарядки аккумуляторов и т.п.).

Анализ исследований показывает, что задача должна решаться комплексно, т.е. учитывать как логистическую, так и производственную системы. Это тем более актуально, поскольку комплексные решения позволяют повысить эффективность не только каждой из подсистем производственной системы, но и в большинстве случаев дадут положительный синергетический эффект.

3.1.2. Показатели оценки эффективности оборудования

Для количественной оценки эффективности технологического процесса используют показатель общей эффективности оборудования (англ. Overall Equipment Effectiveness – OEE) [13, 16, 17]. Это распространённая система



анализа общей эффективности работы оборудования, предназначенная для контроля и повышения эффективности производства и основанная на измерении и обработке конкретных производственных показателей. Инструментарий ОЕЕ широко используется в качестве ключевых показателей эффективности (KPI), что в сочетании с технологиями бережливого производства позволяет предприятию быстрее добиться успеха. Хотя метод ОЕЕ-анализа применяется уже давно, однако многочисленные исследования в данной области посвящены оценке адекватности применения стандартной его модификации.

ОЕЕ отдельной единицы производственного оборудования при многопродуктовом выпуске определяется по формуле:

$$OEE = K_{вр} \times K_{пр} \times K_{кач} = \frac{\Phi_{вр} - Пр}{\Phi_{вр}} \times \frac{\sum_i [T_i \times Выр_i]}{\Phi_{вр} - Пр} \times \frac{\sum_i [T_i \times (Выр_i - Б_i)]}{\sum_i [T_i \times Выр_i]},$$

где: $K_{вр}$ – коэффициент времени (готовности, доступности);

$K_{пр}$ – коэффициент производительности;

$K_{кач}$ – коэффициент качества;

$\Phi_{вр}$ – фонд времени работы оборудования (длительность смены, иногда принимают 24 часа в сутки);

Пр – простои, в том числе и плановые (обеды, регламентированные перерывы, планово-предупредительные ремонты, наладка и т.д.);

i – количество продуктов, производимых на данной единице оборудования;

T_i – Тakt выпуска i -го продукта;

$Выр_i$ – всего изготовлено i -го продукта в течение $\Phi_{вр}$;

$Б_i$ – количество брака i -го продукта, изготовленного в течение $\Phi_{вр}$;

($\Phi_{вр} - Пр$) – время, имеющееся для выпуска продукции на данной единице оборудования;

$\sum_i [T_i \times Выр_i]$ – время, потраченное на производство продукции;

$\sum_i [T_i \times (Выр_i - Б_i)]$ – время, потраченное на производство годной продукции.

Этот показатель максимально полно отражает состояние оборудования и дает представление не только о темпе выпуска продукции, но и о потерях вызванными неполадками в работе оборудования или низким уровнем качества продукции, поскольку факторы ОЕЕ включают в себя три критерия эффективности: доступность (Availability, A), производительность (Performance, P), качество (Quality, Q).

Разница между общим временем работы предприятия (Plant Operating Time, POT) и временем плановых остановок (Planned Shut Down, PSD) – планируемое производственное время (Planned Production Time, PPT): $PPT = POT - PSD$

С помощью ОЕЕ анализируются потери времени с целью их уменьшения или устранения. При этом учитывают три основные категории потерь: потери на остановки (Down Time Loss, DTL), потери в скорости (Speed Loss, SL) и потери в качестве (Quality Loss, QL). С помощью *критерия доступности* анализируется потери на остановки (DTL), включающие в себя любые внеплановые остановки, в том числе, вследствие поломок и отказов



оборудования, из-за дефицита сырья или отсутствия места для складирования. Время переходов также входит в ОЕЕ-анализ, поскольку оно является одной из форм простоев, которые невозможно устраниить, но, в большинстве случаев, можно сократить. Для учета потерь в скорости (SL) применяют *критерий производительности*. При этом учитывают все факторы, вызывающие снижение рабочей скорости оборудования по сравнению с максимально возможной, такие как износ машин, использование некачественных материалов, неправильная подача, неэффективные действия оператора. *Критерий качества* учитывает потери в качестве (QL), которые включают в себя производство несоответствующей стандартам продукции. При этом рабочее время, оставшееся после учёта потерь в качестве, называется чистым производительным временем.

В случае роботизированных производств эффективность работы оборудования в значительной степени зависит от качества его обслуживания, которое влияет на показатели доступности, производительности и качества конечного продукта. Как правило, для обеспечения эффективности использования оборудования разрабатывают систему поддержки его работоспособности (обслуживания и ремонта). Периодичность обслуживания определяется в зависимости от характеристик самого оборудования и назначается производителем. Для исключения внезапных отказов существуют методы прогнозирования и повышения надежности.

Поскольку существуют разные категории потерь, то для контроля состояния оборудования необходимо предусмотреть методы их контроля. Корректировка системы обслуживания оборудования должна выполняться в соответствии с критериями эффективности его работы. При этом метод комплексной многомерной оценки показателей эффективности позволит повысить эффективность управления производственной системой, повысить ее устойчивость, снизить внеплановые простои.

Специфика роботизированных производств заключается в том, что ошибки и сбои в технологических процессах происходят не по вине оператора. Контроль качества работы оборудования в этом случае может осуществляться путем сопоставления с модельной производственной системой (т.е. системой виртуального производства). Имитируя процессы реальной системы, мы можем определить причины ошибок. Кроме того, имитационные модели позволяют протестировать новые концепции производства и согласовать друг с другом все подсистемы на этапе проектирования производства. Можно также виртуально оптимизировать и модернизировать существующие сложные производства, например, чтобы проверить переход к новому продукту. Такие системы позволяют оптимизировать процесс обслуживания оборудования, учитывая состояние и особенности реальной системы.

3.2. Применение моделирования в совершенствовании технологических процессов управления автомобилестроительного предприятия

3.2.1. Методы и результаты исследования



Поскольку процессы в больших системах характеризуются значительным числом стохастических параметров, необходимо решать вопрос об адекватности исходной информации, а также о методах ее учета и анализа. В этом случае наиболее эффективным на сегодняшний день является применение СППР (рис. 1).

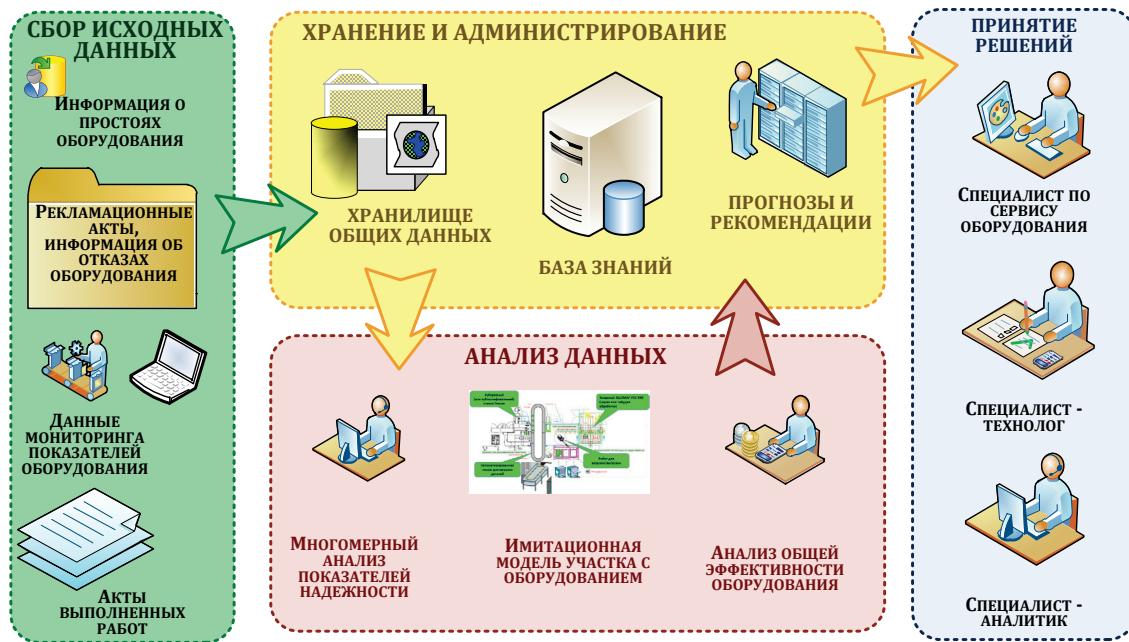


Рис. 1. Концептуальная схема СППР

Однако, при этом необходимо учитывать, что Гибкое автоматизированное производство (ГАП) функционирует на основе безлюдной технологии, поэтому работа всех производственных компонентов координируется как единое целое многоуровневой системой управления.

Для обеспечения эффективности производства, процессы должны быть скоординированы и синхронизированы друг с другом. Именно для этих целей создаются системы управления производственными процессами (Manufacturing Execution Systems, MES). Связь с MES позволяет выполнять сбор актуальных производственных данных и возвращать их в PDM-систему Teamcenter.

Учитывая то, что грузовое автомобилестроение имеет ряд особенностей, обусловленных как конструктивными свойствами изделия, так и масштабностью производства, а также тот факт, что на исследуемом предприятии уже используется программное обеспечение Siemens (Teamcenter, NX), для проверки гипотезы об эффективности системных решений для повышения качества продукции и устойчивости предприятия, нами был выбран Tecnomatix Plant Simulation.

При разработке модели управления мы учитывали тот факт, что для анализа эффективности работы оборудования необходим постоянный мониторинг показателей его производительности и качества изделий. Как правило, для сбора информации о работе производственного оборудования применяют модули мониторинга технологических процессов, которые включают в себя пакет сбора, оценки и визуализации данных, относящихся к



конкретному станку [1].

Имитационная модель используется в качестве интеллектуального ядра СППР. Для построения имитационной модели использовалась среда моделирования Plant Simulation, в которой предусмотрена возможность применения визуального проектирования. Преимуществом построения модели в Plant Simulation является возможность использования стандартной или расширенной библиотеки объектов, каждый из которых уже обладает встроенной логикой, набором параметров и диалоговым интерфейсом, что позволяет для некоторых типов систем максимально упростить процесс построения моделей, исключив необходимость какого-либо программирования. Plant Simulation дает возможность проектировщику создать пользовательский обработчик на встроенным языке программирования SimTalk, который реализует более сложную логику поведения для каждого нестандартного объекта и события в модели (начало операции, конец операции, подход к датчику на конвейере и др.) [14].

Реализация предлагаемой методики выполнялась в процессе разработки СППР для автомобилестроительного предприятия КАМАЗ. Для оптимизации производственных процессов разрабатывается различная документация, которая затем интегрируется для совместного использования в производственной системе (рис.2).

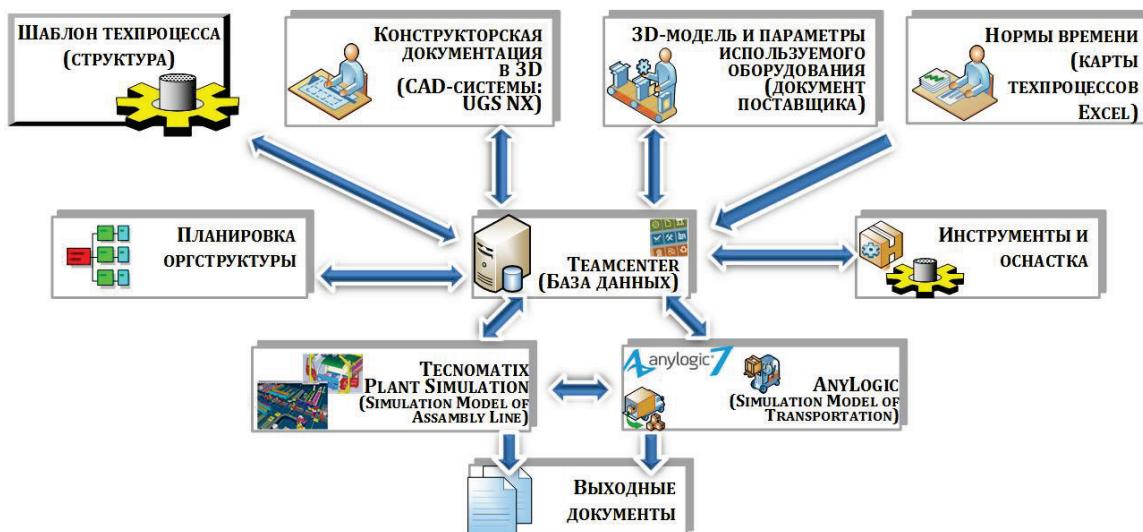


Рис.2. Схема взаимодействия модулей

Поскольку моделирование процессов выполняется параллельно, но сами процессы взаимозависимы, предусмотрен обмен информацией для оперативной их корректировки. Оптимизация работы конвейера с целью сокращения задержек выполняется по двум направлениям:

1. выравнивание операций на позициях конвейера
2. оперативное управление поставками комплектующих на позиции.

Оптимизация работы технологического транспорта заключается в обеспечении необходимыми комплектующими позиции конвейера при минимальных затратах (числе погрузчиков и времени работы).



3.2.1.1. Оптимизация технологических процессов на конвейере

Все позиции моделируемого сборочного конвейера автомобиля являются последовательными и поэтому зависят друг от друга. Все позиции расположены слева и справа по отношению к конвейеру. В соответствии с технологическим процессом, для каждой позиции определен состав операций. Для выполнения операций к позициям поставляют нужные комплектующие. Помимо этого, для позиций существуют свои подсборки - участки, на которых собирают нужные детали. Поскольку движение конвейера осуществляется с определенной скоростью (время такта), то в идеале время выполнения операций, предусмотренных для каждой из позиций должно быть одинаковым.

С помощью имитационной модели можно найти такой вариант организации технологического процесса, при котором неравномерность загрузки позиций будет минимальной. Моделирование выполнялось с помощью программы Tecnomatix Plant Simulation. В результате анализа операций на позициях было установлено, что шестая позиция более загружена по сравнению с остальными.

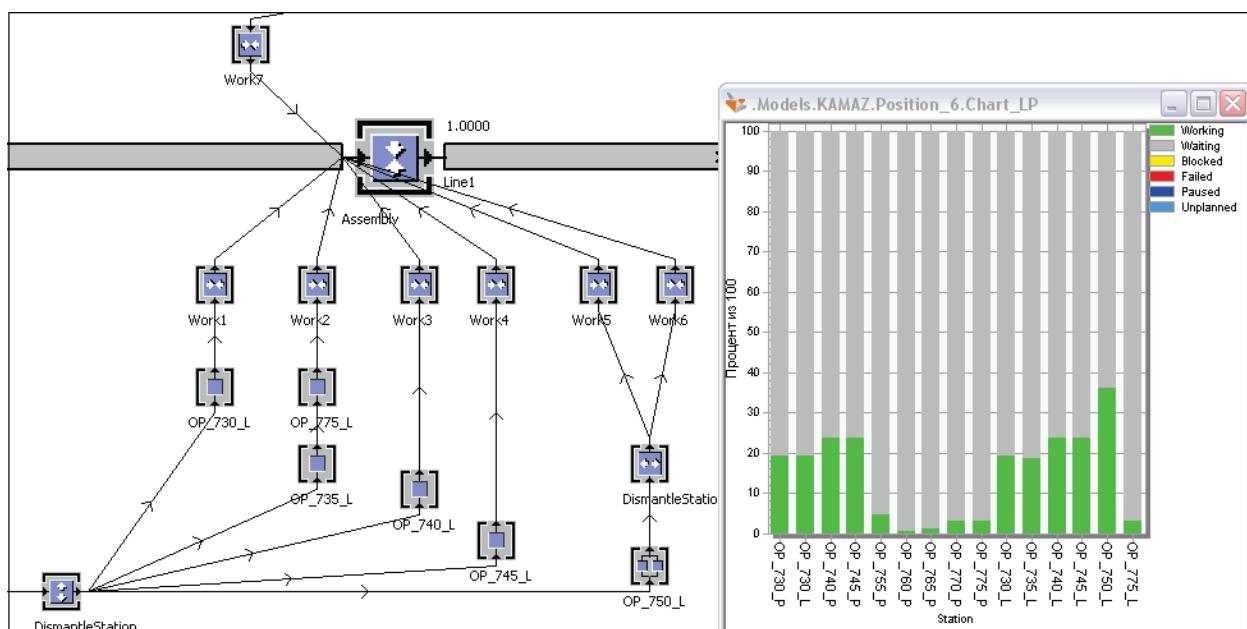


Рис. 3. Производительность 6 позиции

Для оптимизации шестой позиции необходима детализация причин простоев. Фактически необходимо найти промежутки времени, когда оборудование не работало или работало с пониженной скоростью или качеством, а затем их классифицировать в соответствии с моделью времени (рис.4) и деревом причин. После классификации промежутки времени агрегируются для каждой категории. В результате получаются статистические показатели, которые используются при расчете KPI.

Дерево причин (Reason Tree) является детализацией конкретной категории модели времени. В SIMATIC IT OEE/DTM дерево причин может иметь до четырех уровней иерархии, представленных в таблице 1.

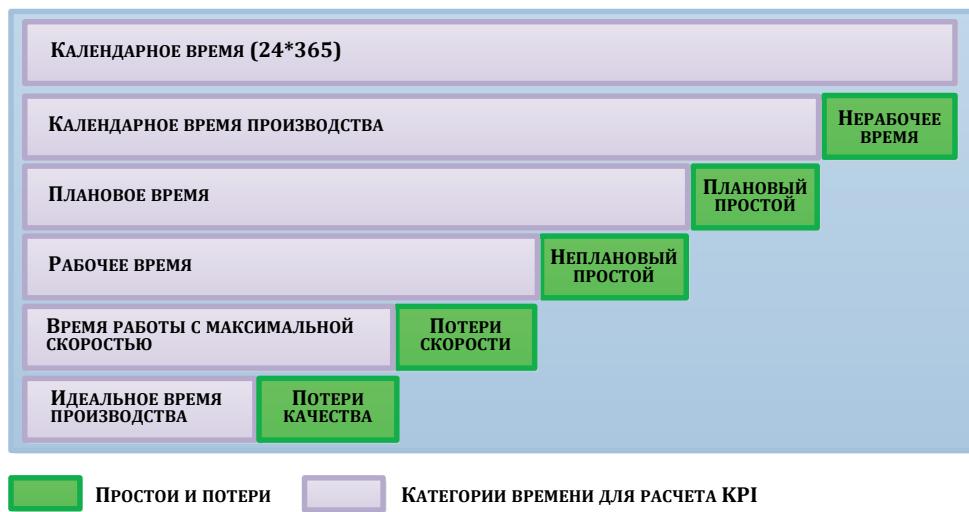


Рис.4. Модель времени

Таблица 1.

Уровни дерева причин

Уровень	Название	Примеры
Уровень1	Состояние(State)	Работа, простой
Уровень2	Основание(Cause)	Поломка, настройка
Уровень3	Причина(Reason)	Механическая часть
Уровень4	Детализация причины (Detailed Reason)	Двигатель, ремень

Дерево причин можно создать для каждой единицы оборудования, однако в больших проектах деревья причин создаются для типов оборудования. Таблицы состояний STT (State Translation Table) предназначены для автоматической классификации состояния оборудования на основе оперативных данных (по значениям PPA тега).

В SIMATIC IT OEE/DTM для каждой единицы оборудования должна быть определена одна таблица состояний. Вместе с тем одна и та же таблица состояний может быть использована для разных единиц оборудования.

После настройки таблиц состояний возможен мониторинг работы оборудования. Для этого в редакторе конфигурации PPA необходимо связать анализируемое оборудование и тег (сигнал), на основании значений которого будет производиться анализ. В дальнейшем по изменению значения тега будет происходить сканирование таблицы состояний, и в базу данных будет сохраняться строка (запись DTM), в которой фиксируется время начала события, время конца события и значения четырех уровней дерева причин (полученных на основе таблицы состояний для соответствующего оборудования). Так как первый уровень дерева причин является детализацией категории времени, следовательно, каждая такая строка может быть отнесена к определенной временной категории.

Анализ эффективности работы оборудования в SIMATIC IT OEE/DTM выполняется на основе количественных показателей. Такими показателями являются счетчики и алгоритмы. Счетчики представляют собой переменные, вычисляемые накопительным итогом (количество произведенных единиц



продукции, количество остановок оборудования и т.п.). В дальнейшем на основании счетчиков вычисляются показатели эффективности, качества и т.д.

Интересующие пользователя показатели в SIMATIC IT OEE/DTM рассчитываются по алгоритмам, которые различаются по типам (Algorithm Family). Каждый тип алгоритма определяет правила вычисления конкретного алгоритма (формулу алгоритма): Это могут быть алгоритмы состояний, надежности, производительности, качества. Кроме того, можно разрабатывать свои алгоритмы (рис.5).

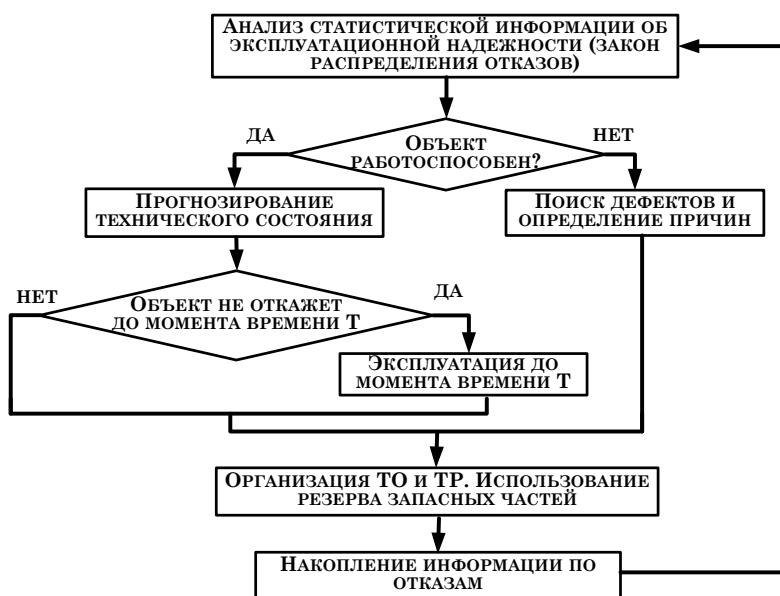


Рис.5. Алгоритм поддержания работоспособности оборудования

Мы предлагаем совершенствовать производство за счет сокращения простоев. Поскольку простои могут быть плановыми и неплановыми, то их причины будут различными. Плановые простои сокращаются за счет совершенствования технологических процессов. Этот случай рассмотрен в таблице 1. Неплановые простои возникают в случае внезапных отказов оборудования. Поэтому их сокращение связано с планированием сервиса оборудования «по надежности», т.е. по техническому состоянию. Этот метод приведен в алгоритме (рис.5). Анализ статистики отказов оборудования позволяет составлять график обслуживания и состав операций, а также планировать регламентные работы. Эффективность такого подхода вычисляется исходя из стоимости продукции, которая не была выпущена ввиду отказа оборудования. Эксперименты показали, что эффективность может достигать 10% в зависимости от типа оборудования и вида продукции.

Для проверки адекватности предложенного решения была разработана модель симуляции процесса обработки спирально-конических и гипоидных шестерён. Модель имитирует технологический процесс изготовления ведомой (ведущей) шестерни на роботизированном производственном участке. Роботизированный комплект состоит из:

- Одношпиндельного обрабатывающего центра VSC 500;
- Станка с ЧПУ для нарезания методом зуботочения Gleason 300PS;



- Автоматической системы «ПРОМОТ» загрузки/разгрузки заготовок деталей;
- Работа для загрузки/выгрузки.

Заготовки поступают на автоматическую систему "ПРОМОТ", откуда помошью робота передаются на токарный станок ЕМАГ VSC 500. После обработки робот переносит деталь на зуборезный станок Gleason 300PS, где по завершении цикла обработки робот транспортирует уже готовую деталь на систему "ПРОМОТ" для выгрузки (Рис.1).

Для выбора наиболее эффективного варианта производственной системы были разработаны 2 варианта компоновки роботизированных участков (рис. 6 а,б). Основным отличием этих двух моделей является наличие дополнительной транспортной линии, которая позволяет последовательно загружать до 10 деталей. После превышения лимита загрузки эти детали складируются в дополнительный отсек, который находится в автоматической системе "ПРОМОТ". При разнице в скорости обработки станка VSC400 около трех деталей в минуту и Gleason300PS, 3.42 детали в минуту, происходит постепенное накопление деталей. Поэтому модель с транспортной системой может иметь запас деталей для обработки, что позволяет снизить простои и увеличивая производительность.

Таблица 2.
Сравнительный анализ производительности станков

Наименование оборудования	Ведущие шестерни			Ведомые шестерни		
	Производительность, шт			Производительность, шт		
	в час	2 смены	3 смены	в час	2 смены	3 смены
Зуборезный С50	11	41 800	60 500	14	53 200	77 000
Зубошлифовальный G60	10	38 000	55 000	11	41 800	60 500

Сравнительный анализ этих моделей показал, что благодаря транспортной системе повышается производительность (рис.3). Кроме того, за счет дополнительного отсека создается небольшой запас, который при переналадке токарного станка VSC400 позволяет продолжать работу станка Gleason 300PS.

Детальный анализ позволил выявить причины неравномерности загрузки участка, а последующая оптимизация позволила снизить не только продолжительность процесса, но и равномерно распределить нагрузку на оборудование (Рисунок 7).

Таким образом, применение имитационных моделей на этапе планирования производства позволяет найти наиболее рациональные варианты организации технологических процессов.

В системе предусмотрено расширение функционала по запросам пользователя, что позволяет в будущем совершенствовать систему в соответствии с меняющимися параметрами.

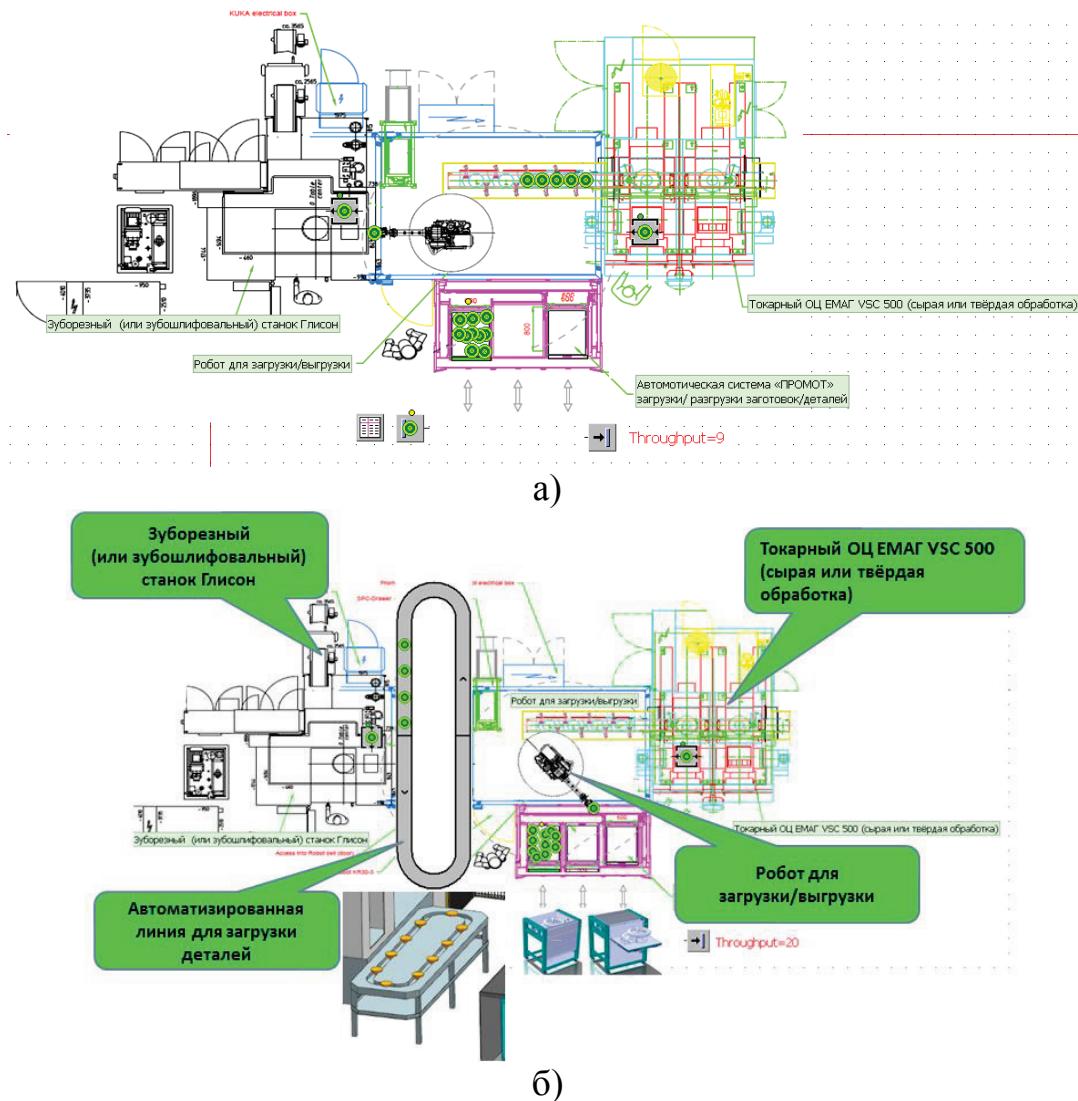


Рис.6. а) Имитационная модель без транспортной системы;
б) Имитационная модель с транспортной системой.

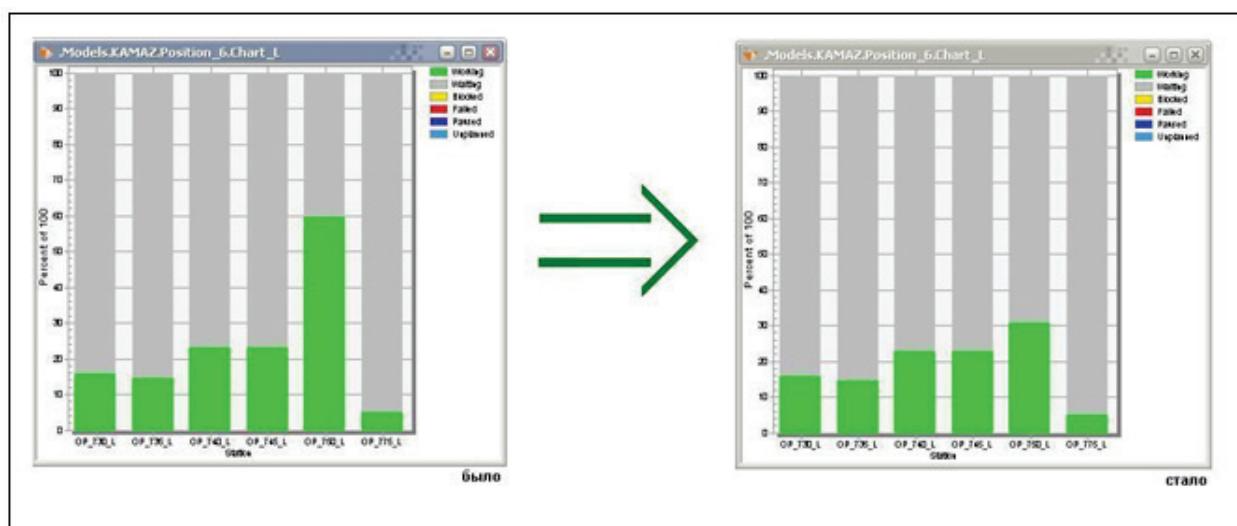


Рис. 7. Оптимизация позиции

Еще одной из причин простоев является отсутствие необходимых комплектующих на позициях конвейера. Динамическая модель



производственного процесса позволяет отслеживать наличие страхового запаса комплектующих на позициях и своевременно выявлять критические ситуации.

Для хранения информации о комплектующих в имитационной модели предусмотрены специальные объекты, позволяющие отслеживать движение материальных потоков от склада до мест хранения на позициях конвейера.

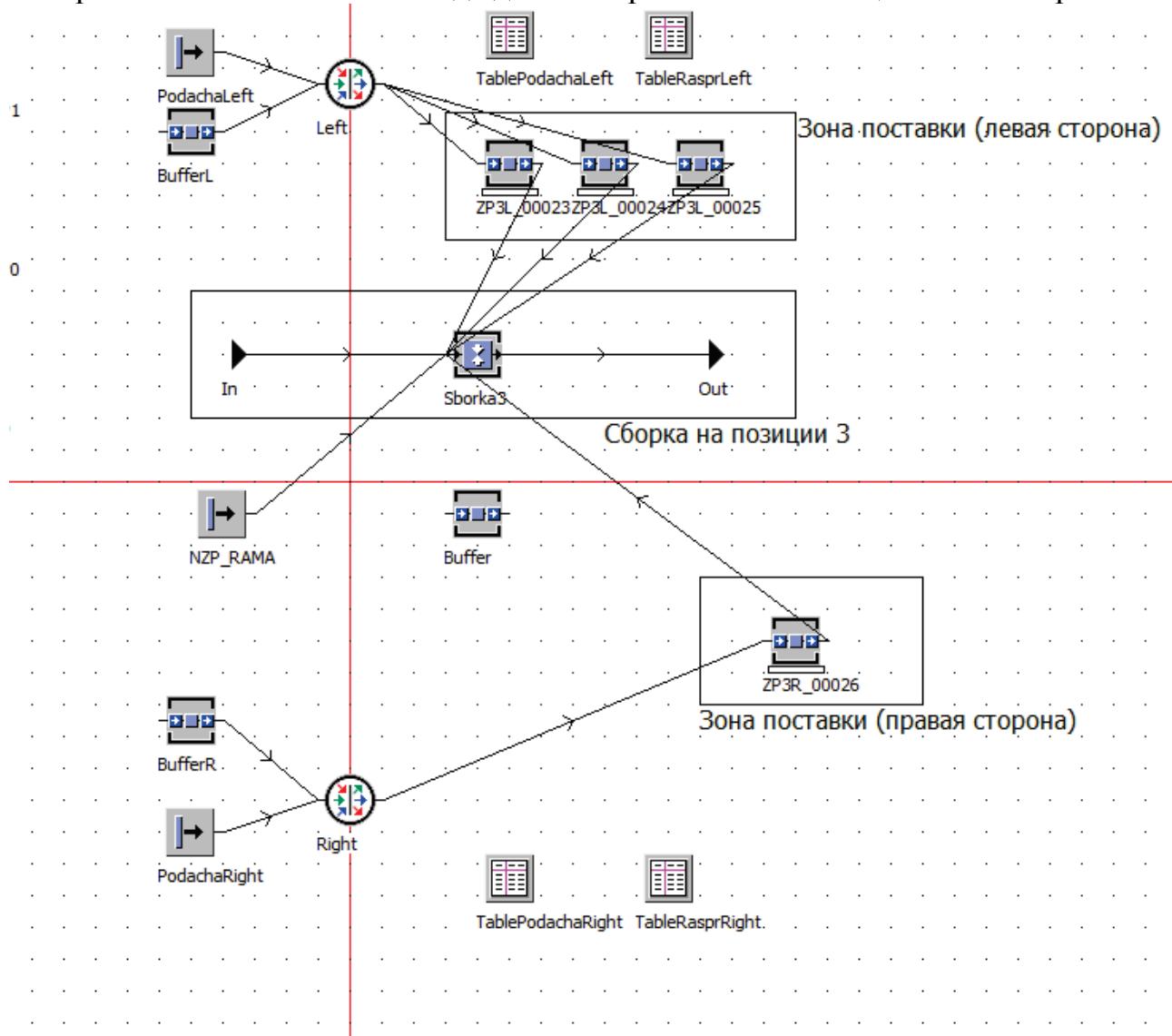


Рис. 8. Пример моделирования поставок на одну из позиций конвейера

Оптимизационный эксперимент показал, что при совершенствовании технологии сборки только на одной из позиций конвейера приведет к сокращению времени сборки на 7%, при этом производительность конвейера увеличится на 5 единиц в день.

3.2.1.2. Совершенствование процессов транспортировки комплектующих

Решение задачи оптимизации работы технологического транспорта на автомобилестроительном предприятии в общем случае является многокритериальной. Входные данные, необходимые для планирования работы транспорта, имеют разную природу, собираются и обрабатываются специалистами разных служб. Это существенно усложняет процесс принятия



обоснованного решения специалистом транспортной службы, который планирует и организует поставки комплектующих. В общем случае процесс принятия решения соответствует схеме, приведенной на рис.9.

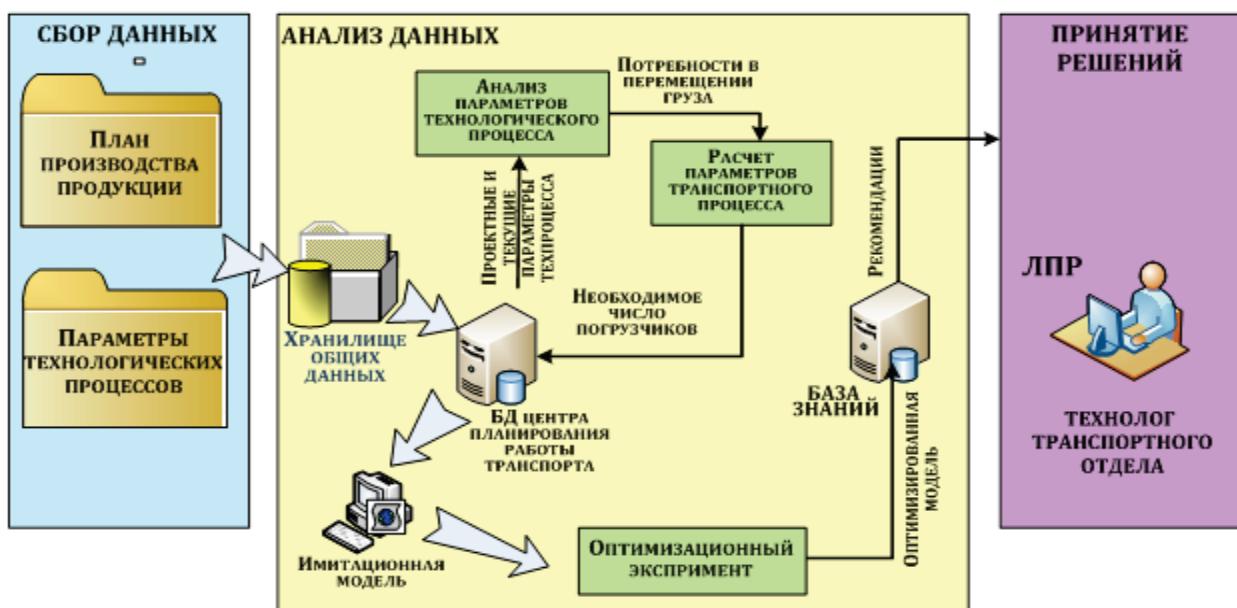


Рис. 9. Модель системы поддержки принятия решений

Входные данные для последующего анализа можно условно разделить на две группы:

1. величина планового задания на производство,
2. технологические процессы производства, содержащие сведения о:
 - применяемом оборудовании;
 - продолжительности операций (основных и вспомогательных);
 - месте производства (участок, цех).

Указанная информация собирается в общей базе данных, доступной специалистам как технологической, так и плановой служб с целью своевременного ее пополнения и корректировки в случае необходимости. На основании этих данных специалистом транспортного отдела производится расчет параметров транспортного процесса, таких как число перевозимых грузовых единиц за выбранный промежуток времени, величина транспортной партии, определение необходимого вида транспорта, определение оптимальных маршрутов. Эти параметры необходимы для построения модели и проведения оптимизационного эксперимента. Применение имитационного моделирования для проектирования логистических систем приводит к наилучшему результату, поскольку в этом случае появляется возможность оперативно пересматривать структуру материального потока, и с учетом его новых параметров реорганизовывать работу транспорта.

Принимая в качестве целевой функции количество изготовленных изделий (сборочных единиц, отдельных комплектующих), можно сократить издержки производства, связанные с неэффективным использованием оборудования, сократить время нахождения полуфабриката в системе за счет своевременного



его перемещения по операциям технологического цикла.

Упрощенно процесс производства по этапам технологического цикла можно представить, как цепочку последовательных стадий «склад-агрегат-склад-агрегат»:

$$C_1 - A_1 - \dots - C_{n-1} - A_{n-1} - C_n - A_n, \quad (1)$$

где n – номер склада или агрегата в последовательности основных технологических операций.

Поэтому в качестве лимитирующего времени для осуществления транспортных работ оптимальным будет принять время работы основного оборудования, т.е.:

$$t_{\text{осн}n} = t_{\text{тр}n-1}, \quad (2)$$

где $t_{\text{осн}n}$ – время работы основного оборудования, мин; $t_{\text{тр}n}$ – время выполнения транспортных работ по доставке груза от предыдущего «агрегата» к следующему.

Таким образом, определение количества единиц наземного безрельсового транспорта целесообразно начинать с анализа исходных данных, включающих время работы основного оборудования для изготовления партии деталей (заполнения одной тары) и времени, необходимого для транспортирования тары к следующему «агрегату». На основании этого анализа делается заключение о возможности закрепления нужного количества единиц транспорта за определенным производственным участком. Для оценки возможности обслуживания участка одной единицей транспорта используется зависимость:

$$X \leq (t_{\text{оп}})_{\text{max}} / (t_{\text{тр}})_{\text{ср}}, \quad (3)$$

где X – число одновременно обслуживаемых «агрегатов»; $(t_{\text{оп}})_{\text{max}}$ – максимальное время, необходимое для заполнения одной тары, определяется исходя из трудоемкости изготовления и числа деталей в таре; $(t_{\text{тр}})_{\text{ср}}$ – среднее время занятости единицы транспорта при транспортировании тары от предыдущего «агрегата» к следующему, определяется как время ездки с грузом и время маневровых операций.

Планирование процесса доставки осуществляется следующим образом:

1. На основании технологического процесса сборки устанавливается номенклатура сборочных единиц, доставляемых на заданную позицию конвейера.

2. Для каждой позиции рассчитывается требуемое для сборки суточного плана количество комплектующих всех видов.

3. Для каждой позиции определяется способ хранения и доставки (тара) каждого вида сборочных единиц в соответствии с их конструкцией и габаритами [5].

4. Определяется вместимость тары для заданной сборочной единицы N :



$$\begin{cases} N = V_{\text{марш}} \div V_{\text{дем}}, \\ Q_{\text{марш}} \geq m \cdot N. \end{cases} \quad (4)$$

5. Количество транспортных партий, необходимых для обеспечения выполнения суточного плана ($N_{\text{сут}}$) по сборке определяется как отношение:

$$N_{\text{тп.партий}} = \frac{N_{\text{сум}}}{N}. \quad (5)$$

6. Время на доставку транспортной партии сборочных единиц определенной номенклатуры для заданной позиции определяется на основании заданного маршрута, времени транспортирования при заданной скорости и времени маневровых операций.

7. Оценка возможности доставки всех транспортных партий для заданной позиции одной единицей транспорта производится сравнением такта и суммарным временем, необходимым для доставки всех требуемых на данной позиции сборочных единиц:

$$X = \frac{\tau}{\sum_{i=1}^n t_{\text{дост}}} \rightarrow 1, \quad (6)$$

где n -порядковый номер устанавливаемой на данной позиции сборочной единицы.

$\Sigma t_{\text{дост}}$ определяется для сборочных единиц двух соседних позиций. Если $X > 1$, значит загрузка транспортного средства недостаточна, и оно может обслуживать две соседние позиции линии.

Если $X < 1$, то транспортная единица перегружена, доставка сборочных единиц не может быть полностью осуществлена, необходимо привлечение дополнительной единицы транспорта. Тогда X определяется как:

$$X = \frac{\tau}{2 \cdot \sum_{i=1}^n t_{\text{дост}}} \rightarrow 1. \quad (7)$$

Дополнительная единица транспорта может быть привлечена как со стороны, так и с соседней позиции при ее недостаточной загруженности.

Движение материального потока по операциям технологического цикла будет эффективным при соблюдении следующих условий:

1. Объем хранимых рядом с «агрегатом» запасов (количество грузов) N эквивалентен мощности «агрегата» M :

$$N \rightarrow M,$$

$M \rightarrow \text{max}$, при условии, что в текущий момент времени $M = n \cdot \Pi \cdot \Phi_{\text{д}} = n \cdot \Phi_{\text{д}} / t_n$,

Для группы однородного оборудования:

$$M = n \cdot N_{\text{дет}} / t_n,$$

где $N_{\text{дет}}$ – количество деталей, требуемое для полного заполнения одной тары, шт;

t_n - трудоемкость изготовления (обработки) одного изделия на данном «агрегате» (операции), мин;

n – количество единиц оборудования на участке.



2. Занятость площадей, отведенных на участке для временного хранения грузов должна быть минимальна:

$$q \rightarrow \min,$$

при условии, что количество хранимых грузов определяется как отношение

$$q = S/N,$$

где S – площадь мест временного хранения грузов на участке, m^2 ;

N – площадь, занимаемая одним грузовым местом (тарой), m^2 .

3. Количество единиц транспорта, необходимое для обеспечения выполнения условий 1 и 2 для каждого текущего момента времени определится как:

$$A = \frac{Q \cdot t}{q},$$

где Q – количество одновременно хранимых на участке грузов (грузооборот);

t – время транспортных операций, мин;

q – грузоподъемность транспортного средства/количество перевозимых транспортным средством единиц груза.

Соблюдение всех обозначенных условий способствует рациональному распределению транспортной работы между производственными участками и цехами при одновременном соблюдении требований техники безопасности и повышении общей культуры производства.

Организация доставки комплектующих от мест складирования комплектующих до позиций сборки деталей на конвейере описывается алгоритмом, представленным на рисунке 10.

В качестве инструмента для реализации модели был выбран прикладной пакет AnyLogic. Преимущество данного пакета состоит в том, что использующийся в нем объектно-ориентированный подход позволяет простым и естественным образом организовать и представить структуру сложной системы [9].

Модель работы технологического транспорта была реализована с помощью AnyLogic. Для примера моделировался процесс сборки рам грузовых автомобилей. При этом использовался дискретно-событийный подход. Событие – сборка рамы, установка отдельных сборочных единиц – происходит в определенный момент времени и влечет за собой изменение состояния логистической системы – запрос на доставку недостающих комплектующих. В свою очередь поведение погрузчиков, осуществляющих доставку комплектующих, определяет поведение всей системы доставки в целом, обеспечивая достижение целевой функции, т.к. в разработанной модели движение подсобранной рамы по позициям конвейера осуществляется только в том случае, если все комплектующие установлены в соответствии с технологическим процессом, в противном случае происходит простой конвейера до устранения неполадок. Условие обеспечения процесса сборки будет обеспечено только в случае своевременной доставки сборочных единиц на позиции.

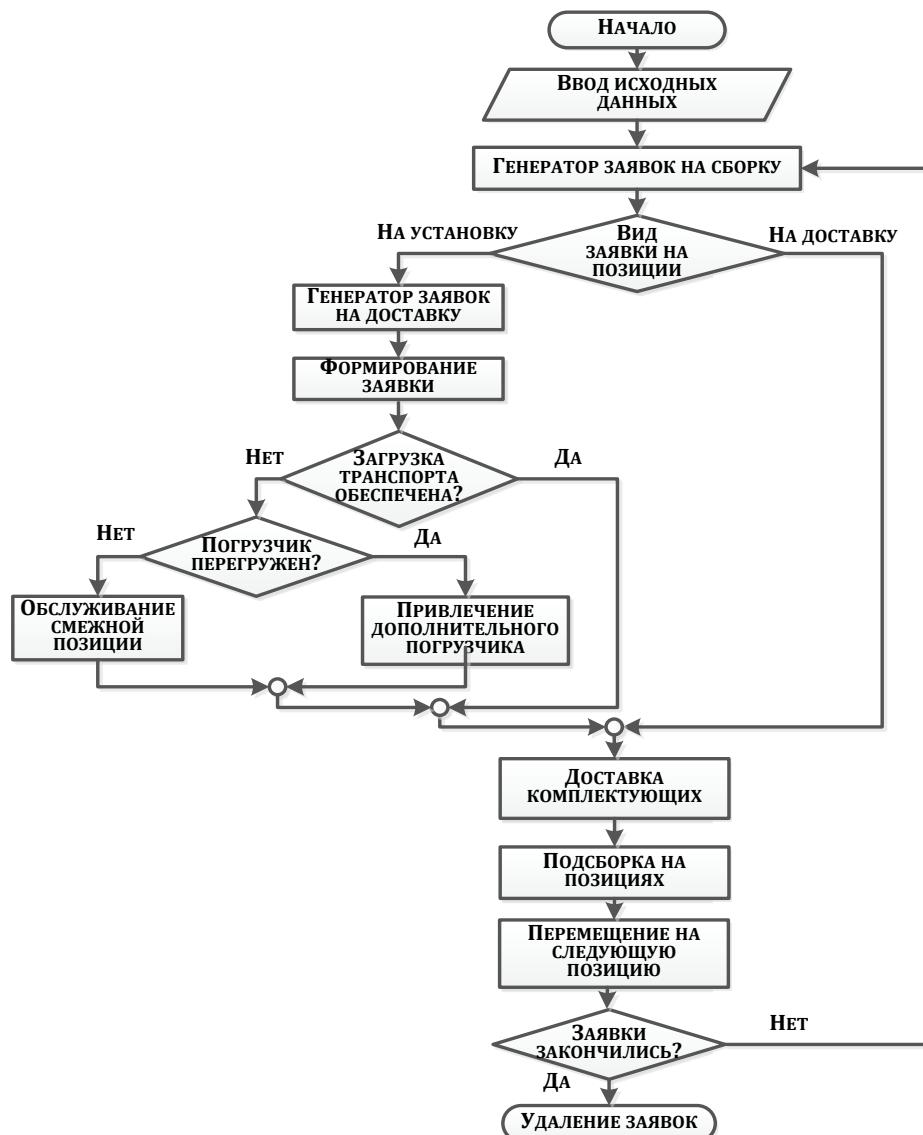


Рис. 10. Алгоритм поставок комплектующих на сборочный конвейер

Структура модели процесса доставки представлена на рисунке 11. Доставка комплектующих производится в момент, когда комплектующие i -того наименования из j -той тары полностью израсходованы.

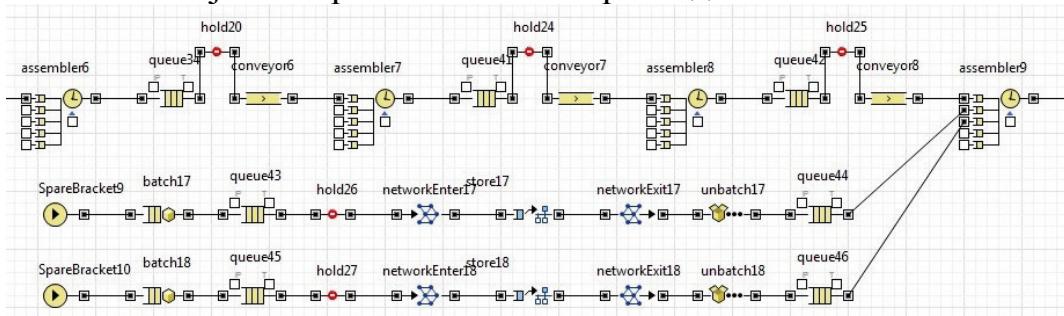


Рис. 11. Структура модели процесса доставки комплектующих на позиции конвейера

На планировку участка были наложены возможные маршруты движения погрузчиков. Аналогичные построения производим для всех позиций конвейера.



Суть оптимизационного эксперимента сводилась к нахождению такого числа погрузчиков, при котором конвейер не будет простоявать, при этом количество комплектующих на позициях всегда будет достаточным. Для проведения оптимизационного эксперимента использовался встроенный в AnyLogic оптимизатор OptQuest, разработанный на основе метаэвристик рассеянного поиска и поиска «табу» [8]. Оптимизационный эксперимент показал, что наилучшим вариантом, при котором целевая функция достигнет максимума, будет использование двух погрузчиков, дальнейшее увеличение их количества не приведет к улучшению показателей сборочного производства.

Выводы

Таким образом, использование комплексных решений при проектировании, модернизации и управлении производственными системами позволит повысить их эффективность, устойчивость и обеспечит качество и конкурентоспособность выпускаемой продукции. Единая платформа для реализации таких решений позволит повысить качество как оперативного, так и стратегического управления. Кроме того, интеллектуализация процессов на всех этапах жизненного цикла позволит повысить гибкость производственных систем и способность их адаптации под меняющиеся потребности рынка.



ГЛАВА 4. КИБЕРНЕТИЧЕСКИЕ И ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНЫЕ ОСНОВАНИЯ ДИНАМИКИ РОССИИ

Введение.

Изменения, происходившие в России последние несколько веков, были предметом внимания многих образованных людей, особенно людей, проживающих в ней. Общие гуманитарные и, тем более, политические подходы к этой теме могут быть оставлены за пределами текущего рассмотрения, как чрезвычайно субъективные и не основанные по существу на естественно научных основаниях.

С точки зрения процессов в реальном мире очевидна объективная особенность России как некоторого социума, в простейшем видении – государства, которое от небольшой территории в конце IX века превратилось в почти одну шестую суши и продолжает, несмотря на внутренние проблемы последние четверть века, оставаться огромным и территориально устойчивым государством. Феномены в реальном мире, как обычно называют необычные явления в нем, легко трактуются в гуманитарных науках как самобытное творчество, но относить необычность любого государства только на творческую самостоятельность отдельных правителей легко только с художественно описательной точки зрения. Сложившиеся уже к XX веку научные представления заставляют видеть или, по крайней мере, искать естественные и объективные причины подобных явлений. Для научной теории такие причины целесообразно искать в совокупности физических, природных и тому подобных факторов в реальном мире, а не просто относить на творчество отдельных разумов.

Действие множества факторов в естественных системах сколько-нибудь объективно удается описать только через понятия изменяемых во времени объективных связей, называемых *управляющими связями* по аналогии с техническими системами. Внесубъектные управляющие связи в обществе впервые, хотя в свое время и отвлеченно, стал рассматривать А. Ампер. Декларируя науку, которую он описал как самую общую науку об управлении в своей системе классификации человеческого знания, Ампер писал: «Итак, только после всех наук, занимающихся этими различными объектами, надо поставить эту, о которой сейчас идёт речь и которую я называю *кибернетикой*, от слова др.-греч. κυβερνητική; это слово, принятое в начале в узком смысле для обозначения искусства кораблевождения, получило употребление у самих греков в несравненно более широком значении *искусства управления вообще*» (цитируется по [1, с. 152]). Следует уточнить, что современное использование термина кибернетика связано с именем Н. Винера, который декларировал ее в своей работе [2] и описал как науку об управлении и связи в машинах и живых механизмах. Такое понимание отражено в самом названии книги: «Cybernetic: Control or Communication in the Animal and Machine». Подробней в самой работе кибернетика определена как «наука об общих закономерностях процессов управления и передачи информации в машинах, живых организмах и обществе». Полезно отметить, что сам Н. Винер аргументировал отсутствие



ссылок на начальное использование термина кибернетики тем, что он «позднее узнал, что еще в начале XIX века это слово использовал во Франции физик Ампер, правда, в социологическом смысле, но в то время мне это было неизвестно» [3, с. 308].

4.1. Постановка задачи об естественнонаучных основаниях

Если обратиться к природным геофизическим основаниям человеческого существования на территории современной России, соотнося их с аналогичными основаниями других социумов в состояниях развитых государств, то нетрудно заметить, что действительную природную самобытность России составляет принципиальная трудность организованного человеческого хозяйствования на подавляющей части ее территории. Пригодных для земледелия площадей относительно всей территории в России меньше, чем у большинства других социумов. За исключением северной Канады, Россия единственная страна, на территории которой огромные площади охвачены вечной мерзлотой, а период с устойчивой температурой ниже нуля длится несколько месяцев почти на всей территории.

Геоклиматические особенности России очевидны и принимаются во внимание, но естественен вопрос, как это повлияло и влияет на собственно человеческую сторону социума. Чтобы на него ответить, недостаточно констатации указанных фактов, нужно найти явные естественно научные связи влияния условий на социум. В качестве таких оснований вынуждено следует рассматривать управляющие связи в сложных системах.

4.2. Теоретические основания применения кибернетического подхода

Из-за указанной общности кибернетики ее применение к естественным системам часто оказывается неконкретным, а служит описательной декларацией множества управляющих связей в сложной системе. Но существует два связанных с кибернетикой принципа, которые хорошо применимы в рассматриваемом случае. Сложные естественные системы, как показывает тщательный анализ, существуют только до тех пор, пока встроенные в них системы управления поддерживают гомеостазис этих систем [4]. Иначе говоря, встроенные системы, реализующие управление состояниями таких систем и, возможно, управление состоянием ближайшего окружения их, обеспечивают своим функционированием сохранение требуемых для их существования локальных состояний и условий устойчивости этих состояний. В очень частном случае – температурный баланс для необходимого диапазона биохимических реакций или поддержание условий питания биологической или социальной системы. Нарушение гомеостазиса в обмене с внешней средой (получение пищи, воды, кислорода, возможность выделения в окружающую среду выводимых материалов – тепла, углекислого газа, отходов жизнедеятельности) неизбежно приводит к быстрому нарушению функционирования сложной системы и ее вырождение или гибель.

Второй важнейший принцип сформулирован У.Р. Эшби и принят в качестве главного закона кибернетики. Он гласит, что разнообразие внутренних



состояний системы управления для выполнения системой заданных функций управления должно быть не меньше чем разнообразие действующих на систему извне возмущающих внешних воздействий [5].

В применении к системе человеческого социума из первого принципа получаем, что социум может существовать как устойчивая система только до тех пор, пока его внутренние подсистемы управления устойчивостью (чаще всего субъективно не ощущаемые или явно невидимые) поддерживают его существование путем регулирования внутренних состояний и состояний непосредственно воздействующей среды. Из закона Эшби дополнительно к этому следует, что существование социума прямо зависит от разнообразия его внутренних состояний. Если это разнообразие велико и увеличивается, то практическая возможность продолжения социума и его расширение также увеличивается. Существование социума в более сложной по множеству действующих факторов окружающей среде объективно требует и более сложного многообразия составляющих его внутренних подсистем, в частности тех, которые обобщенно называются человеческими культурами или народами. Для более простых внешних условий существования социума требуется более простой набор внутреннего разнообразия, который все же обеспечивает продолжительное существование в этих условиях.

Используя сложившийся в XIX веке гуманитарный подход, многие ученые и их последователи ставят в основу описания социумов так называемый национальный вопрос. При этом следует заметить, что понятие *национальности* и *нации* сложилось только к началу XX века. Этот факт хорошо виден из сравнения материалов энциклопедических словарей этого периода. В частности, очень широко охватывающий базовые знания своего времени Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефона, изданный в 1890 – 1907 и частично основанный на материалах тех же издателей, которые вначале формировали и издавали его для Германии, ничего не приводят по этому вопросу. Только в следующем Малом энциклопедическом словаре Брокгауза и Ефона, второе издание которого датируется 1907 – 1909 годами, дается понятие нации, но ничего не говорится о национальности. Естественно, что в обоих источниках приводится понятие народа, но в плане исторической культурной общности, а не политическом назначении этого понятия. (Нация определяется здесь как «совокупность индивидов, связанных сознанием своего единства, общности происхождения, языка, верований, быта, нравов, обычаяев, исторического прошлого и солидарностью социальных и политических интересов настоящего» [6, С. 693].) Следует признать, что понятие нации стало широко применяться в политических процессах на территории Германии и Италии ближе к середине XIX века с политической целью «восстановления их исторического единства», но к России, да и многим другим странам подобная политическая программа и ее основа не имели никакого, или хотя бы прямого отношения.

Проблема нации как идеологический, а, следовательно, информационный источник определенного направления политической динамики, очень широка и интересна, но сколько-нибудь полноценное изучение ее требует охвата очень



обширного накопленного материала, а поэтому возникает огромная сложность на таком обширном и в значительной степени зыбком материале строить убедительные и обоснованные выводы. Учет указанного выше факта, заключающегося в очень позднем появлении этого понятия и вытекающих из него процессов, позволяет отойти в сторону от попыток использования такого понятия и сосредоточиться на постоянно действующих объективных факторах.

Но прежде чем осуществить такой отход, нужно отметить, что в России явно имеется множество различных народов (в новых терминах – национальностей), причем эта особенность существовала не только последнюю сотню или около того лет, но, как легко видеть из реальной истории, тесно связана с многовековой историей России.

Если к этому факту подойти со стороны указанных выше главных моментов исследования, то легко заключить следующее. Многообразие составляющих Россию народов в соответствии с законом кибернетики о разнообразии, дает вне субъектной «управляющей системе России» принципиальную возможность противостояния широкому множеству внешних возмущающих факторов, которые без этого разнообразия могли бы привести к ее распаду как динамической естественной системы.

4.3. Уникальная специфика природных оснований

Остановимся подробней на климатических и природных особенностях объективного существования России как материального объекта. Практически никакой другой пространный регион земного шара, где в настоящее время возможно хозяйствование с внутренним обеспечением основными материальными объектами, совершенно необходимыми для человеческой жизни, принципиально не сопоставим с тем, что мы называем Россией. Не существует отличного от России государства и социального образования (группы поселений, кочующих групп людей и т.п.), которые бы обеспечивали устойчивое существование людей с поддержанием внутренних структур и хозяйствования в условиях длительной холодной зимы и близких к ней по суровости природных условий. Такими условиями являются холодные леса, широкие пространства тундры, холодные степи, разнообразия горные системы в холодном климате.

Обратим внимание, что поддержание устойчивого существования на указанной российской территории обеспечивается не только так называемым «русским населением», а во многих местах взаимодействием немногочисленной части такого русского населения с более ранним коренным населением множества включаемых территорий. Культурных и хозяйственных навыков указанного «русского населения» оказывается недостаточным для вынужденно специфического использования природных условий (хозяйствование с опорой на северных оленей, основной рыбный рацион питания, сезонных отгон скота и т.п.).

Может возникнуть вопрос, почему следует рассматривать необходимость существования сложной естественной системы, частным случаем которой является Россия, а не допустить, как возможную естественную альтернативу,



устойчивое существование множества различных независимых друг от друга систем на той же территории «с различными условиями жизни». Заметим, что в широкой исторической ретроспективе так оно и было. На территории современной России проживало более тысячи лет назад множество разнообразных племен и народов, многие из которых заметно отличались друг от друга разными средствами, видами и навыками хозяйствования. Если подходить к изучению этого вопроса объективно, а не по интерпретации или фиксации факта «такое то племя (народ) завоевало соседей и создало государство», то следует рассмотреть, что же дает создание и поддержание государства, а именно, что дает с этой точки зрения *устойчивое существование естественной системы на основе множества людей*.

Как ни странно, эту проблему исследовал еще в начале 2-го века римский мыслитель Корнелий Тацит. Рассматривая особенности существования множества независимых от Рима племен и сравнивая совокупность их существования с внутренними управляющими структурами Рима, он получил ряд очень интересных и важных до сих пор выводов. По его заключениям, римский мир (Pax Romana) представляет единственную альтернативу «варварской свободе» (barbarum libertas) — догосударственной вольнице, игре местнических и эгоистических интересов, дикости и войне всех против всех [7, С.86]. Противоположностью имперского мира (Pax) для Тацита была не просто война, а война всех против всех, постоянные междоусобицы, ссоры и беспорядки. Политическая свобода вне имперских порядков неотделима от распрай, распущенности, легкомыслия, эгоизма и поэтому губит человека, поставившего ей на службу свою сконцентрированную энергию, целенаправленную волю и силу духа.

В современном мире имеется интересный и для многих убедительный пример естественной социальной системы с высокой степенью внутренних политических свобод и отсутствием, как явного имперского мира, так и войны всех против всех. Этот пример дают США. Для объективного исследования нужно разобраться, в чем особенность и фундаментальная основательность указанного системного варианта.

Для существования любой социальной системы требуются в качестве материального основания постоянные биологические источники существования людей, составляющих такую систему. Эта фундаментальная сторона динамики биологических систем в экологии называется экологической нишой. Для человеческих систем – социумов предложено более детализированное понятие питающих геопотоков [8], но в упрощенном описании совокупность геопотоков, используемых социумом, можно считать и называть также экологической нишой социума. Экологическая ниша социума, как и любой материальный объект или материальная система, принципиально *ограничены*. Поэтому при полном заполнении такой ниши неизбежно действует динамика конкуренции и борьбы за ограниченные ресурсы существования. В географическом регионе длительного проживания технологически равных по способности социумов такая борьба и конкуренция всегда имеет место. Отклонение от этого фундаментального правила возникает только в том случае, когда



технологические новации позволяют использовать непосредственно окружающую среду для проживания большего, чем ранее населения или при прорыве социума в новый географический регион, где для него нет практических конкурентов. Последнее имеет место при освоении ранее не используемой экологической ниши. Порядка 8 – 10 тыс. лет назад такой нишой оказалась Великая евразийская степь для технологии скотоводства (где скотоводство ранее не использовалось хозяйственном более примитивными человеческими социумами). В результате Великих географических путешествий европейским социумам стали доступны территории в Западном и Южном полушарии, населенные в то время хозяйственном более примитивными племенами, которые не знали ни скотоводства, ни даже металлургии. Технологии колонистов и поселенцев из Европы позволяли на той территории Америки, которые для более примитивных технологий обеспечивали проживание только нескольких миллионов человек, обеспечивать полноценное и устойчивое питание многих сотен миллионов, а по потенциальному даже миллиардов постоянного населения. Поэтому до сих пор (и на некоторое время в ближайшей перспективе) экологическая ниша Северной Америки ни только не переполнена, но и до сих пор используется только частично. Как следствие, для проживающих на ее территории хозяйствующих людей не действует краеугольный принцип «функционального влияния ограниченности ресурсов» (называемый также принципом неомальтизианства).

У потенциальной борьбы всех против всех нет здесь основного материального фактора – вынужденности борьбы за ограниченные ресурсы пропитания (проживания). Естественно, что эта особенность временная, но эта временность не устраняет ее действенности в настоящее время. Как следствие, в Северной Америке отсутствует в текущее время объективное основание постоянной борьбы за материальные природные ресурсы существования. Именно поэтому здесь не действует необходимость принципиального выбора внутри социума между организующей и стабилизирующей центральной властью и междуусобицей.

Почему в древние эпохи множества населяющих современную Россию народов объективно не были заинтересованы в интегрирующем государстве? Причина достаточно очевидна. Технологический уровень хозяйствования, в котором преобладали собирательство и охота (рыбная ловля, бортничество, примитивный выпас скота), а растениеводство функционировало только в качестве подсечного земледелия (корчевка и пожог леса для примитивного удобрения лесных малопродуктивных почв, которого хватало всего на несколько лет), могли обеспечить только очень небольшую плотность населения. Естественным регулятором численности населения при этом служил периодически возникающий голод, результатом которого было либо частичное вымирание людской популяции, либо ее миграция в более теплые и продуктивные регионы.

Войны как средство сохранения небольших социумов и племен возникали не в форме «всех со всеми» по причине указанной выше специфики, а как нашествия северных и восточных племен, пытающихся спастись от голодной



смерти, грозившей им на покидаемых малопродуктивных территориях. (История сохранила множество данных о таких систематических нашествиях — гуннов, авар, антов, печенегов, половцев, булгар, монголов и т.д.) Только позже, в связи с освоением более эффективного земледелия, в частности в лесостепной полосе с более продуктивными почвами, складываются объективные условия борьбы с ближайшими соседями за продуктивные пастбища и пашни, что являлось единственной объективной альтернативой функционированию регулирующего социальные отношения государства.

Государства на Ближнем Востоке и в Южной Европе естественно возникали как продукт интеграции нескольких близких племен, поскольку эти территории с одной стороны природой заметно сегментированы, а с другой эти территориальные сегменты пространственно небольшие.

Обратим особое внимание, что согласно последним исследованиям [9], *национальность есть результат адаптации части человеческого общества к условиям обитания, выражаящийся внешне для его людей (и людей вне этой части) как наличие устойчивых элементов культуры, характерных для этой части, и традиций, поддерживающих эту культуру в многообразии человеческого общежития*. Таким образом, традиционно понимаемый народ (как исторически более ранняя форма национальности) есть результат объективно произошедшей системной адаптации части человечества к конкретным условиям обитания, иначе говоря, к устойчивым региональным особенностям существования.

4.4. Естественнонаучные основания многонациональности России

На огромной территории Северной Евразии с суровым, но локально разнообразным климатом и биологически различными условиями для проживания людей, принципиально не мог сформироваться один специфический тип социально-биологической адаптации к условиям существования. В то же время, оптимальная с точки зрения научного описания, конструкция человеческих отношений требовала складывающихся и в дальнейшем сложившихся и действующих механизмов поддержания климатически сложного хозяйствования и устойчивых отношений без кровопролитных конфликтов.

Иначе говоря, пространность территории с суровым климатом, но разнообразием конкретных условий принципиально не перекрывалось одним социально-биологическим типом адаптации — биологически эффективно использующей условия народности (народа, национальности). Но потенциальное разнообразие формируемых этими условиями многих народностей объективно требовало сложения специальных социальных форм организации устойчивых отношений и мирного хозяйствования.

От потенциальных критиков можно ожидать возражений, что излагаемая здесь концепция может переоценивать различия в условиях формирования различных социумов и недооценивать «общих путей развития человечества». Декларируемые общие пути развития человечества являются лишь пожеланием, приятным, но никаким реальным основанием явно не обусловлены. В то время



как объективный (не зависящий от авторитетов в конкретной области, общепринятого или привычного общего мнения) анализ должен указывать, как говорили ранее, «материальные основания» реальных процессов.

Объективная специфика России – как территории формирования отличного от других социумов – состоит в том, что эта область планеты с устойчиво продолжительным циклическим периодом *полной агрегатной физической перестройки окружающей среды*. (Очевидное нередко не замечается просто как привычный факт, не вызывающий в большинстве людей попыток анализа и изучения.) Климат России не просто суровый (такая оценка в значительной степени эмоциональная, а не физическая). Климат России имеет ту принципиальную особенность, что значительную часть земного года, длительностью нескольких месяцев, вода в окружающей человека природной среде переходит в твердое агрегатное состояния, пребывая в нем в виде льда или снега. Поскольку вода важнейший физический фактор для обмена веществ в биологических системах, эта особенность формирует многоплановый ряд следствий для существования биологических организмов, в том числе человека. Для живущих в этом регионе большинства живых существ это приводит либо к длительным периодам спячки, либо к сохранению живых организмов только в виде семян, либо к поеданию других организмов на той же территории при отсутствии их естественного воспроизведения от базового источника производства биомассы – фотосинтеза в растительных организмах. Первый и третий из перечисленных вариантов характерен и для людей в указанный период прекращения нормального воспроизведения биомассы.

Но для социумов, как высшей формы естественной организации человеческих коллективов, он влечет еще одно важнейшее в рассматриваемой теме следствие. Выше указывалось, что отдельные народы (народности) объективно формируются как результат биолого-социальной и технико-социальной адаптации и оптимизации к региональным условиям окружающей людей среды. Но агрегатное состояние «твёрдой формы воды» в природе, окружающей социумы, ведет к глубокому выравниванию условий этой среды на очень больших пространствах. На Ближнем Востоке, в Южной и Западной Европе, да практически и во всем остальном кроме России мире, реки оказываются естественными рубежами формируемых людьми региональных социумов. Дополнительно к этому горы той высоты, что их верхний ярус выходит в гольцовую или снеговую зону (а тем более в область ледников) оказываются для большинства социумов естественной физической границей их деятельности, в том числе военной. Поэтому многие хребты оказываются наилучшей природной границей для попыток расширения или активных массовых действий.

В то время как горы на территории России практически оказывались столь же легко проходимыми для хозяйственной, военной и политической деятельности, как и вся остальная территория. (Просто для «русских» горы – это там, где зима дольше или «не совсем в срок», а так «ничего особенного»). Получается, что действительно Россия – это особенный на Земле мир, другого подобного которому на Земле нет!



Чтобы ярче и понятней представить эту физическую по существу особенность реальной России, полезно посмотреть на нее с позиций научно-фантастического моделирования, представленного в романе Хола Клемента «Огненный цикл» [10]. В этом произведении автор описывает планету, вращающуюся в системе двух звезд – красного карлика и голубого гиганта, где орбита планеты имеют сложную конфигурацию и периодически при приближении к гиганту и отделении от него резко меняется климат и газовый состав атмосферы (добавляются или связываются и выпадают окислы азота). При скачке климата происходит полная перестройка биосферы, в частности одна из биологически различных рас полностью умирает, а из спор, находящихся в их тела, формируются особи альтернативной биологической расы, приспособленные к своему варианту температурного и атмосферного газового состава.

Хотя Земле далеко от таких крайностей, беспристрастный анализ показывает, что реальные условия существования людей на основной территории России и практически почти всех остальных регионов планеты качественно отличаются. (Иное агрегатное состояние воды в окружающем мире оказывается принципиальным фактором.)

Возвращаясь не к детальным особенностям продолжения существования живых организмов в гляциальной зоне, а к последствиям для существования разнообразных по особенностям культуры небольших социумов, следует заключить, что общая для зимы гляциальная зона Северной Евразии не дает регионам проживания людей природных границ, характерных для большинства территорий Земли. Наоборот, эта особенность приводит к стиранию таких естественных границ составляющих ее природных регионов, которые отличны друг от друга по существу только в теплый период. В теплый период такие различия могут быть здесь сколь угодно велики и даже значительней чем для хорошо изученных и освоенных современными социумами территорий вне российской Европы и традиционного Востока.

Получается, что не просто русская зима – национальная особенность России. Продолжительная зима с замерзанием рек, промерзанием земли и длительной остановкой жизнедеятельности большинства организмов – это естественнонаучное основание пространной человеческой общности, которая принципиально не может быть сведена к одной «национальности». Эта общность не может быть, как это ни странно для большинства гуманитариев, построена на преимуществе одной национальности (какой бы она не была или кому-то не хотелось быть – одной из славянских, скандинавской, монгольской или какой-то другой, кем-то считающейся «наилучшей или наиболее совершенной»). Разнообразие условий существования в теплый период и, как следствие, варианты культурной адаптации на этой огромной территории требуют, а практически формируют на протяжении веков свои региональные варианты народов. Но зимняя интеграция условий ведет к отсутствию хоть сколько-нибудь существенных региональных границ и теоретические попытки сформировать отдельные национальные государства, поэтому обречены на провал. Либо происходит фактическая борьба всех против всех с физической



ликвидацией наиболее активных участников и временных элит, либо - поиск и нахождение интегрирующей формы межнациональной организации для множества оптимизированных под отдельные местности (для теплого периода) национальностей и народов. В динамике реальных процессов, локальная человеческая и социальная деятельность должны вынужденно рано или поздно выработать такую форму организации, которая с внешней стороны подобна идеи античной Римской империи. Тем более что память о последней и некоторый опыт ее организации можно было использовать и творчески развить.

Можно заметить, что реальные факты, а, тем более, исторические факты, чаще всего анализируются как очевидно «существующие». Одним из таких привычных, но не удостаивавшихся объяснению фактов является странное на территории России отсутствие регионального стремления к автономизации. Если оглянуться в прошлое России, то за исключением княжеских междуусобиц Древней Руси, не заметны явные процессы внутреннего разделения России. Даже в так называемое Смутное время, территории, отдаленные от региональных конфликтов с Польшей и Швецией, не претендовали и не проводили заметных действий на утверждение самостоятельности. Более того, региональные ополчения в это время добивались установления твердой власти центра, а не распада прежней общности (нередко это за неимением лучших объяснений относят на «русский характер» или свойства «русской души»). Что замечательно, большая часть людей собственной территории России (вне Польши, Финляндии и прибалтийских территорий) в Гражданскую войну XX века не пыталась создать собственные государства, хотя отдельные такие попытки инспирировались оккупационными силами на периферии (в Архангельске, Владивостоке и т.д.)

Даже в эпоху уничтожения Советского Союза усилиями верхушки его элиты, большинство населения голосовало за сохранение этой интегральной формы государства, несмотря на все недовольства текущей политикой и экономическими аспектами ситуации. Что, по существу, совсем странно с учетом местных национальных стремлений и особенно усилий региональных элит. Решение этой парадоксальной проблемы очевидно с изложенных позиций, поскольку большинство населения реально заинтересовано, прежде всего, в мире, а не войне всех со всеми и переделе собственности в интересах тех или иных элит.

4.5. Последствия объективной обусловленности многонациональности

С учетом развернутой схемой естественных оснований и их следствий интересно рассмотреть, к чему в реальной политической истории приводили попытки тех или иных частей российской элиты провести политические преобразования, опирающиеся на понятие нации, проведение политики установления монополии в обществе одной отдельной национальности.

До середины XIX века такие попытки практически не наблюдаются, что объясняется в первую очередь сложившейся многонациональностью элиты и отсутствием до этого времени в политическом мышлении самого понятия национальности. Кроме того, ясно и явно используются понятия «единства



веры» (немцев упрекали в первую очередь за то, что они лютеране, а поляков – за то, что они латиняне). По исследованию В.О. Ключевского [11], во время правления Софии: «Фамилий русских, т.е. великорусских, оказывается 33%, происхождения польско-литовского, т.е. в значительной степени западнорусского – 24%, происхождения немецкого, западноевропейского – 25%, происхождения татарского и вообще восточного – 17% и 1% остается неопределенным» [11].

Заметим, что в политике Европы XIX века понятие нации служило не для государственной дифференциализации, а идеологическим инструментом интеграции. Так понятие германской и итальянско-римской нации послужило средством объединения множества мелких государств, сложившихся в ходе предыдущих многих столетий на месте бывшей империи Карла Великого и Римской истории.

В России XIX века национальная идея славянофильства (как дальнее отражение европейской идеи германофильства) была использована для внутриполитической борьбы с целью оттеснения от управления государством часто лучше управлявшихся с этой функцией потомков западноевропейского происхождения, в первую очередь «немцев». Эта деятельность была ярко представлена публицистикой славянофилов И.С. Аксакова, Ю.Ф. Самарина, М.Н. Каткова, М.П. Погодина. Результатом этой деятельности была в первую очередь так называемая русификация Остзейского (Прибалтийского) края, а затем переориентация активности внешней политики с Азии на Южную Европу. В конечном счете, усилиями сторонников этого направления был подготовлен антагонизм России с Центральной Европой (Австро-Венгрией и Германской империей). Что, в конечном счете вылилось в войну с Тройственным Союзом, процессами частичного саморазрушения России во время Первой мировой войны и, как более отдаленные и неожиданные последствия, в потерю, как это ни странно, политической гегемонии славянского элемента в политических структурах России, преобразовавшейся в Советский Союз.

4.6. Кибернетические механизмы регулирования

Таким образом, в реальных политических процессах России явно наблюдаются (хотя в большинстве случаев не сознаются, не анализируются и не учитываются) системные «внечеловеческие кибернетические механизмы» регулирования. Эти системные механизмы, вне зависимости от желания и устремления даже значительной части элиты, выполняют перерегулирование человеческих организационных структур и распределение человеческой власти, перераспределяют человеческие усилия отдельных групп населения. Но время выполнения такого перерегулирования «не по человечески» продолжительно и составляет многие десятки лет. С теоретической точки зрения при этом выполняется оптимизация по критерию наилучшего приспособления к реальным условиям окружающей среды. Большинство людей не замечают такие внешние для них процессы социального регулирования, так как не могут взглянуть на них со стороны с учетом разных временных масштабов



индивидуальных и социально-системных процессов. Но такая нечувствительность к происходящему никак не изменяет и, тем более, не устраняет указанных процессов.

Из проведенного исследования можно сделать вывод, что попытки части социальной элиты того системного образования, которое в настоящее время называется Россией, полностью перестроить внутреннюю организацию этой системы на фактическую гегемонию одной такой части по национальному или какому-то другому подобному признаку принципиально обречены на провал. Более того, неосознанные кибернетические механизмы такой системы будут выполнять не просто регулирование, но и, что характерно для большинства теоретических и реальных систем автоматического регулирования, «перерегулирование». Перерегулирование, с точки зрения теории, заключается в уходе параметра управления от текущего состояния отклонения в другую сторону от оптимального значения. Для человеческих социальных систем это перерегулирование выражается в последующей за попыткой гегемонии не только потере ведущей роли, но и отодвигании на второстепенные роли, длительном для человеческого масштаба индивидуальной жизни.

Самонадеянно рассчитывать перехитрить «нечеловеческую систему» межчеловеческих связей на основе индивидуального или группового человеческого разума. Дело в том, что указанная система в любом случае представляет собой масштабное множество взаимодействующих разумов, а промоделировать динамическое поведение множества разумов с помощью одного или значительно меньшего их подмножества теоретически невозможно. Этот вывод о невозможности легко следует из простейших соотношений теории множеств, при ее применении к конечным множествам. Дело в том, что с естественнонаучной точки зрения возможности моделирования отдельным человеком принципиально конечны (если, отойдя от этой точки зрения, не постулировать бесконечной и бессмертной души).

Эта конечность вытекает не только из конечности биологических элементов обработки информации (нейронов), но и (для мечтающих энтузиастов квантовой обработки информации) из конечной временной последовательности элементарных информационных актов отдельного человека. В жизни отдельного человека всего около 2 млрд. сек, за одну секунду он может воспринять, выполнить ограниченное число действий с информацией – практически всего несколько, но не более того. Отобразить произвольную динамику конечного множества (общества) через множество возможных состояний множества значительно меньшей мощности (числа состояний) принципиально невозможно, если оставаться в пределах конечных множеств. Этот вывод непосредственно следует из элементарной теоремы теории множеств, согласно которой мощность (число элементов для конечных множеств) образа отображения при однозначном отображении равен мощности прообраза отображения.

Чтобы яснее представить себе рассматриваемую проблему, можно более детально оценить указанные конкретные множества. Пусть количество состояний, представимых с помощью отдельного разума равно числу N .



(Принципиально неважно, какова в действительности эта величина, главное, что это некоторое конечное число.) Тогда число возможных состояний группы из двух разумов будет равно N^2 . Более того, эта величина N^2 дает только статическое описание состояний, без учета последовательности их возникновения и времени пребывания этой группы в конкретной паре состояний. Даже в этом, более чем упрощенном статическом описании, совершенно невозможно множество с числом элементов N^2 отобразить во множество состояний индивидуального разума, учитывая, что $N > 1$. В среднем порядка N принципиально различных состояний этой пары будет при этом отображаться всего в один элемент состояния отдельного разума. Практически в самых заниженных оценках N не меньше миллиарда, а отображение такого большего числа состояний в один не только «частично теряет информацию», но эта потеря катастрофически велика. Еще больше подобный разрыв возможностей получается при рассмотрении группы из m разумов. Потеря информации при подобных попытках «отобразить в основном» будет даваться в самых заниженных оценках величиной произведения из $(m-1)$ сомножителя, каждый со значением N .

Заметим, что социально и опорно-значимая информация о состоянии, отношении, намерении, интересах и т.п. как отдельных членов воспринимаемой группы равносильных разумов, так и отдельных возможных комбинациях связей и действий некоторых из них, оказывается еще более чем значительно большей. Упрощенно и схематически описывая, нужно учитывать, кто, когда и что сказал, для чего (в возможных допущениях), до кого и когда эта социальная информация дошла и т.п. Поэтому все надежды (совершенно по существу легкомысленные) на умозрительную возможность отдельного разума узнать, учесть, скомбинировать, оценить и использовать динамику поведения множества других людей, выполняемые в собственном социальном моделировании, ни на чем не основаны. Кроме относительной теоретико-множественной малограмотности и иллюзорных надежд, что поскольку очень хочется, то как-то это можно и сделать.

В качестве дополнительного анализа можно заметить, что даже уже не совсем естественнонаучное предположение о возможности оперирования бесконечными множествами значений (не целиком, а именно бесконечным множеством их значений) тоже не снимает указанного ограничения. Даже допустив метафизически существование некоторой бесконечной человеческой души, придется учесть уже совершенно очевидное ограничение на длительность элементарного акта получения информации из внешнего мира с помощью органов чувств. Применим рассуждения, подобные изложенным выше, но уже для числа элементарных актов получения информации о взаимодействии людей в группе из более одного человека. Из них получаем аналогичные оценки качественно и количественного «разрыва» между возможностями отдельного человека и аналогичными возможностями суммарных взаимных актов обмена информацией (в общем случае – любых форм взаимного взаимодействия) для группы людей.

И все это даже не учитывая, что группы, реально действующие и значимые



для социальных действий в обществе, составляют многие тысячи, а в современных обществах (в отличие от первобытных племен) даже миллионы людей.

О принципиальной ограниченности возможностей отображения окружающего мира для отдельного индивидуума или конечной группы таких индивидуумов не принято задумываться, хотя это свойство очевидно для естественнонаучного подхода, отрицающего всякие потенциальные духовные бесконечности в составе человеческой личности. Иначе говоря, все надежды перехитрить более сложную внешнюю систему, в частности динамику человеческого социума, с помощью отдельного разума, основаны, на самом деле, на религиозном мышлении и доктринах вне материальных сущностей в реальном мире.

Выводы.

Рассмотрены принципиальные проблемы устойчивого существования естественной социальной системы, объективно формируемой из людей на территории современной России. Использован строго кибернетический подход к динамике устойчивого существования такой сложной естественной системы. Показано, что действие основных двух законов кибернетики для этой системы с учетом материальных условий существования, безусловно, влечет множественный национальный состав такой естественной системы и ее управляющей элиты. Показано, что особенностью материальных условий существования рассматриваемой системы служит циклическая *полная агрегатная физическая перестройка окружающей среды*, следствие чего является отсутствие физических границ регионов в зимнее время, и наличие широкого спектра различных условий хозяйствования в теплое время. Выявленные объективные основания ведут к необходимости устойчивой социально-государственной системы поддержки мирного существования множества различных народов на территории России, которые как естественные подсистемы оптимизированы для специфического хозяйствования в отдельных регионах. Наличие общей интегрирующей государственной системы является следствием естественно динамической оптимизации межнациональных связей на указанной территории, альтернатива которой устойчива только на очень примитивном уровне первобытно-общинного хозяйствования. Математическими оценками обоснована принципиальная невозможность индивидуального моделирования разумом детальной перспективной динамики в социуме, выполняемого с целью обойти объективно действующие управляющие связи уровня охватывающей системы. Показана системная неизбежность многонационального состава элиты России и проявление эффекта перерегулирования при локально-временных попытках выделения и временного установления одной правящей национальной элиты для России.



ГЛАВА 5. АКУСТИЧЕСКИЙ СТРУКТУРНЫЙ МОНИТОРИНГ ВОДОПРОВОДОВ

Введение

Современное состояние водопроводов в России – результат сотен лет развития и больших материальных затрат. Размер, стоимость и сложность водопроводов накладывают определенные ограничения на их быструю замену. Многофазные процессы, вызванные статическими факторами (транспортируемой водой по водопроводу, видом прокладки водопровода и др.) и динамическими факторами (климатические условия, зоны повышенного давления и т.п.) приводят к ухудшению структуры водопроводных сетей и возрастающим количеством отказов [1].

Поэтому мониторинг водопроводов сетей и связанных с ними объектов, представляющих собой потенциальные экологические риски, является актуальной задачей многих областей науки и техники.

Повреждения водопроводов зависят от условий и формы эксплуатации, материала, качества изоляционных материалов и других не маловажных причин. Часто не соблюдение технологии приводит к разрушению водопровода еще не отслужившему свой срок эксплуатации (разрыву труб, ускорению коррозионных и эрозионных процессов и др.). Аварии на водопроводах обусловлены причинами как зависящими, так и не зависящими от предприятий. Зависящие причины связаны с воздействием таких факторов, как несвоевременное проведение планово-предупредительных ремонтов и модернизации, неоптимальными режимами эксплуатации, применением некондиционных материалов, а также с неправильными действиями персонала. Независящие причины связаны с ухудшением качества воды, неправильными действиями абонентов (превышение количества забираемой воды и т.п.), прекращением и ухудшением условий энергоснабжения, последствиями некачественного выполнения строительно-монтажных работ, скрытыми дефектами оборудования и стихийными явлениями [1].

В современной практике, состояние водопроводов оценивается методом проведения проверок. Тем не менее, процессы, события или условия, приводящие к катастрофическим отказам водопровода, часто происходят в период между двумя плановыми проверками, поэтому необходимо постоянное наблюдение и мониторинг участков водопровода.

Применительно к водопроводам, системы структурного мониторинга применяют различные методы при контроле дефектов, накопления веществ, коррозии, нарушения герметичности, протечек и других параметров, ответственных за эксплуатационную надежность водопровода:

- магнитные (магнитной анизотропии, магнитной памяти металла, магнитной проницаемости и др.);
- акустические (ультразвуковые импульсные, волны Лэмба, фазовые, акустоэмиссионные, шумодиагностические и др.);
- электрические (воздействие электрическим возмущением или возмущением неэлектрической природы);



— оптические (телевизионные, лазерные, оптоволоконные, голограммические и т.п.) и др.

Для водопроводов, изготовленных из пластмасс и композитов, также актуальна проблема контроля и мониторинга по причине высокой неоднородности физико-механических свойств и дефектов типа расслоений и т.п.

В работе рассмотрим акустические методы, которые позволяют: измерять толщину стенки трубы (по затуханию и скорости звука продольной звуковой волны, распространяющейся в водопроводе); выявлять глубинные дефекты по степени их опасности, коррозию и расслоения, а также проводить дистанционный мониторинг появления трещин в труbe [2,3].

Для контроля герметичности водопровода наибольшее распространение получил метод акустической эмиссии (АЭ). Метод позволяет дистанционно обнаруживать малые утечки, определять их местоположение и судить о характере повреждения, в том числе под зданиями и сооружениями. Высокая помехозащищенность амплитудных алгоритмов обработки сигналов АЭ предопределила разработку на их основе систем непрерывного мониторинга герметичности водопровода, для которых наиболее важным является быстрое и достоверное определение наличия течи, при минимальном значении вероятности ложного срабатывания [4].

Водопроводы, проложенные под дорогами, зданиями, различными коммунальными сооружениями, накладывают определенные ограничения на применение внешней системы дистанционного мониторинга (наличия точек доступа с достаточным местом для установки датчиков). При этом внутреннюю систему акустического структурного мониторинга можно устанавливать в любых местах, где необходимо, независимо от рассмотренных ограничений.

На основании вышеизложенного, применение акустических методов применительно для внутренней системы дистанционного мониторинга ВРС будет способствовать не только улучшению технико-экономических показателей объектов водоснабжения, условий труда и ресурсосбережения, но и приведёт к снижению затрат на эксплуатацию объектов, позволит сократить численность их персонала при одновременном существенном улучшении качества обслуживания [1]. В частности, получение объективной информации позволит реально оценить истинное состояние объектов водоснабжения и их оборудования, и обеспечит принятие обоснованных решений при планировании организационно-технических мероприятий.

При разработках измерительной аппаратуры для систем акустического структурного мониторинга одной из важных задач, является обеспечение оптимальных значений чувствительности акустического датчика и отношения сигнал/шум с целью обеспечения максимальной точности измерения.

Следует заметить, что на практике не всегда удается оснастить точку доступа датчиком и устройством передачи телеметрической информации. Это в большей степени касается зондирующих датчиков, так как существуют сложности в организации электропитания, а место установки датчиков не позволяет эффективно применять проводной или радиоканалы, а также PLC-



технологии.

В связи с тем, что электромагнитные волны не распространяются в воде (вследствие электропроводности), то звук является единственным возможным средством передачи данных в водопроводной трубе.

Для организации акустического зондирования водопроводной трубы непосредственный интерес представляет диапазон частот от 1 кГц до 1 МГц.

На выбранный диапазон частот накладываются следующие ограничения:

- слуховой диапазон домашних животных от 16 Гц до 45 кГц и выше;
- эмпирическое правило, которое определяет верхний предел частоты сигнала относительно расстояния передачи (при расстоянии 500 м максимальная частота передатчика 90 кГц [4,5]), при этом изменения экологических переменных, являющихся важными в открытой водной среде, имеют минимальные значения в водопроводной сети.

Акустическая волна в водопроводной трубе, подвергается значительным искажениям, изменяющим её форму, амплитуду, частотные и фазовые характеристики. При этом основными механизмами искажения акустического сигнала являются фоновый шум и дисперсия. Высокий уровень дисперсии и затухания волн в замкнутом объёме трубы вызван, главным образом тем, что сигналы высокой частоты образуют множество мод колебаний, которые последовательно распространяются в водопроводе на различных скоростях.

Определенные трудности при организации акустического зондирования вызывают следующие параметры, характеризующие водопровод: давление; температура; вязкость; удельная проводимость воды; механические примеси; воздушные пузырьки в воде; материал, диаметр водопроводной трубы и др.

Вместе с тем, имеются нерешенные задачи, обусловленные недостаточным исследованием закономерностей распространения акустических сигналов внутри водопровода:

- теоретически не объяснена зависимость коэффициента поглощения акустического сигнала от расстояния;
- не достаточно исследовано влияние грунта на характер распространения акустического сигнала в подземных водопроводах;
- не изучена пространственная структура акустического поля в водопроводе и возможность фильтрации отдельных мод акустического поля;
- не исследованы нелинейные эффекты, распространения акустических сигналов;
- не установлено влияние на погрешность локализации датчика, многомодового характера распространения акустического сигнала и дисперсии фазовой скорости.

На основании вышеизложенного система акустического структурного мониторинга водопровода должна содержать элементы дисперсионной компенсации и алгоритмы коррекции ошибок, а также работать в условиях ограничения мощности источника питания.

5.1. Распространение акустической волны внутри водопровода

5.1.1. Зондирующий датчик внутри трубы



Рассмотрим зондирующий датчик с координатами (r_0, θ_0, x_0) и приёмник с координатами (r, θ, x_1) , расположенные внутри упругой цилиндрической трубы, полностью заполненной водой (рис. 1).

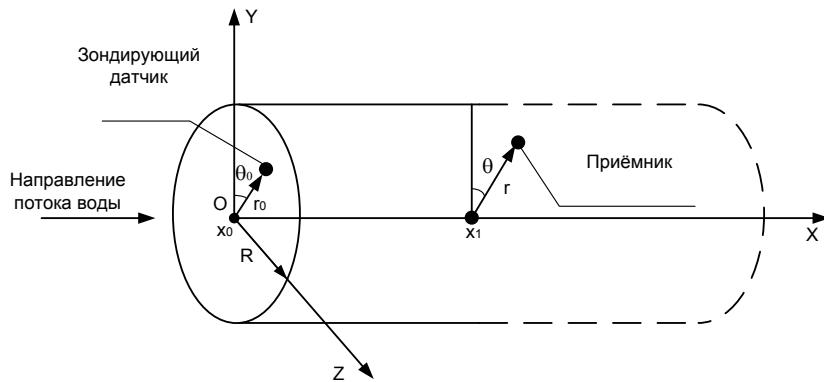


Рис. 1. Расположения зондирующего датчика и приёмника внутри трубы

Для определения уравнения акустического давления внутри водопроводной трубы применяем уравнение Гельмгольца в цилиндрических координатах [8]: $\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\phi}{dr} \right) + \left(\frac{1}{r^2} \right) \frac{d^2\phi}{d\theta^2} + \frac{d^2\phi}{dx^2} + k^2 \phi = \frac{\delta(r - r_0) \delta(\theta - \theta_0) \delta(x_1 - x_0)}{2\pi r}$, где $k = \frac{2\pi f}{c}$ – волновое число; c – скорость звука в воде.

Применяем метод разделения переменных: $\phi(r, \theta, x_1) = R(r)\Theta(\theta)X(x_1)$.

Решение для радиуса R является уравнением Бесселя [4,6]:

$$\frac{1}{R} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dR}{dr} \right) + \left(k_r^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) = 0,$$

где n и k_r – константы.

Вводим граничные условия, исключаем из рассмотрения радиальные волны, и применяем только функции Бесселя первого рода, порядка n . Принимаем во внимание что $R(r) = J_n(\eta r)$, $\Theta_n(\theta) = \begin{cases} \sin \theta, \\ \cos \theta, \end{cases}$ и акустическая волна распространяется по оси OX в направлении приёмника ($X(x_1) = e^{i\gamma x_1}$):

$$p(r, \theta, x_1) = \sum_{n=0}^N A_n B_n e^{i\gamma(x_1 - x_0)},$$

где $p(r, \theta, x_1)$ – акустическое давление на выходе приёмника; $A_n = J_n(\eta r_0) \Theta_n(\theta_0)$; $B_n = J_n(\eta r) \Theta_n(\theta)$. Используем ортогональность J_n и Θ_n :

$$p(r, \theta, x_1) = \sum_{n=0}^N (J_n(\eta r_0) \Theta_n(\theta_0)) J_n(\eta r) \Theta_n(\theta) e^{i\gamma(x_1 - x_0)}.$$

В работе рассматриваем только решения, которые удовлетворяют граничным условиям на стенках трубы: $J'_n(\eta r) = \frac{d}{dr} J_n(\eta r) \Big|_{r=R} = 0$, и моды радиального волнового числа η_{nm} , удовлетворяющие условию: $\gamma_{nm} = \sqrt{k^2 - \eta_{nm}^2}$.

На рис. 2 приведены осевые моды (n), соответствующие изменениям фазы вдоль окружности ($n = 1$, разделение на полуокружности; $n = 2$, разделение на



сектора и т.д.) и радиальные (m) моды, соответствующие изменениям фазы вдоль радиуса трубы ($m=1$, одно изменение фазы и т.д.). Мода $(0,0)$ является фундаментальной (плоская волна).

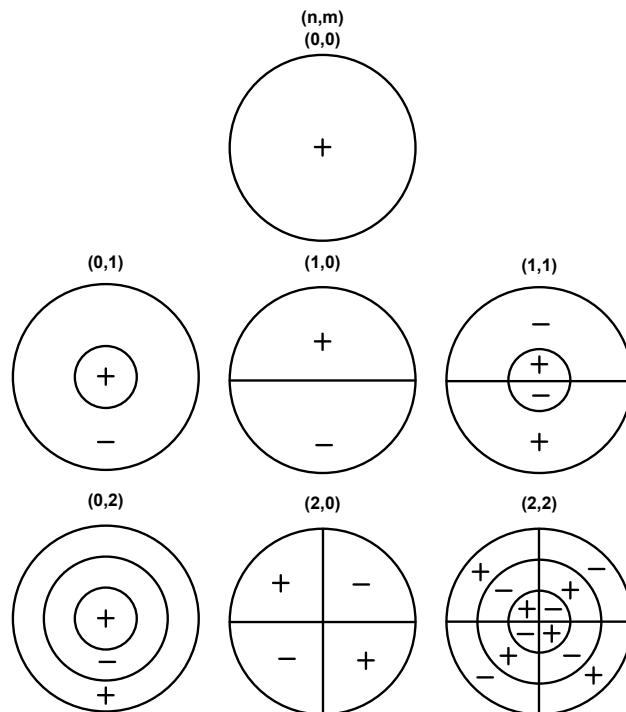


Рис. 2. Режимы распространения акустической волны по сечению трубы

Таким образом, если источник расположен внутри упругой цилиндрической трубы, то акустическое давление на входе приёмника акустической волны:

$$p(r, \theta, x_1, \omega) = \frac{\rho}{cR^2} f(\omega) \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_n(\eta_{nm} r_0) \cos(n\theta_0) J_n(\eta_{nm} r) \cos(n\theta)}{\left(1 - \left(\frac{n}{\eta_{nm}}\right)^2 J_n(\eta_{nm})\right)^2} e^{i\gamma_{nm} x_1},$$

где R – радиус трубы; γ_{nm} – осевое волновое число; $f(\omega)$ – функция сигнала, выраженная в частотной области; ρ – плотность воды.

Фазовая скорость моды: $v_{\omega} = \frac{\omega}{\gamma_{nm}} = \frac{c}{\sqrt{1 - (\eta_{nm}/k)^2}}$, и соответственно групповая скорость: $v_g = c\sqrt{1 - (\eta_{nm}/k)^2} = c\sqrt{1 - (\omega_{nm}/\omega)^2}$.

Проведем расчет акустического давления, распространяемого внутри магистральной водопроводной напорной трубы из полиэтилена (ГОСТ 18599-2001, ТУ 2248-016-40270293-2002, рабочее давление 1,00МПа, диаметр 200,00мм, толщина 14,70мм), с помощью интерактивной системы MatLab. Координаты источника акустического сигнала ($r_0 = 0,50R$, $\theta_0 = 5^0$, $x_0 = 0,00$ м); координаты приёмника акустической волны ($r_0 = 0,50R$, $\theta_0 = 5^0$, $x_0 = 50,00...800,00$ м); плотность воды 1000,00кг/м³; скорость звука в воде 1500,00м/с. На рис. 3 приведен излучаемый акустический сигнал, длительностью 200,00мс, $F_c = \sin(\omega_c + \varphi_0)$, где $\omega_c = 2\pi f_c$, $f_c = 55,00$ кГц. Временные



области распространения акустического давления, приведены на рис. 4-7.

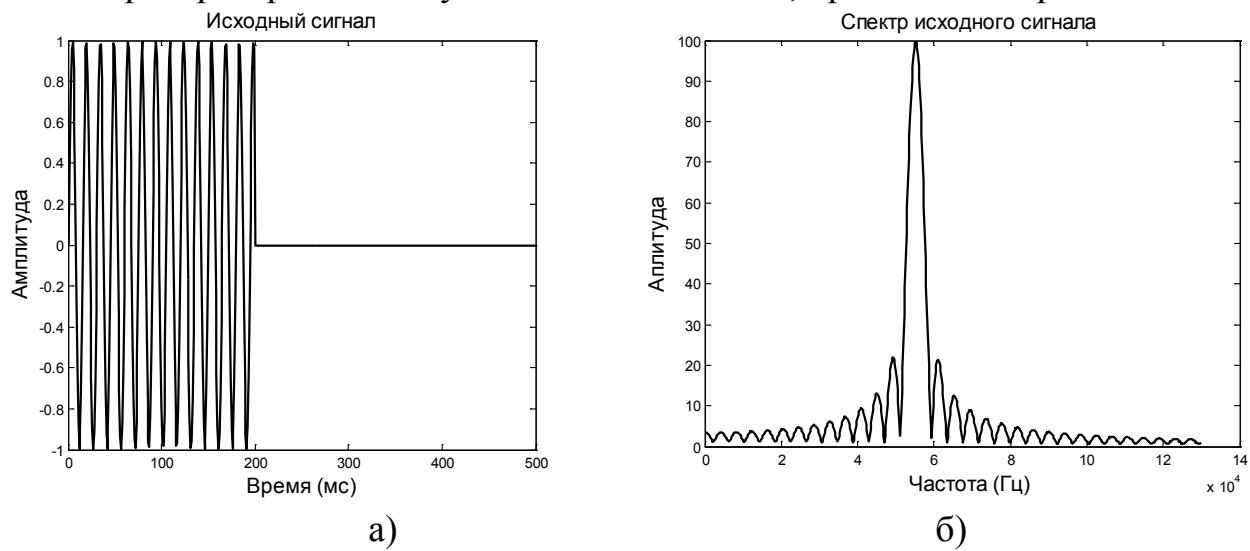


Рис. 3. Излучаемый акустический сигнал

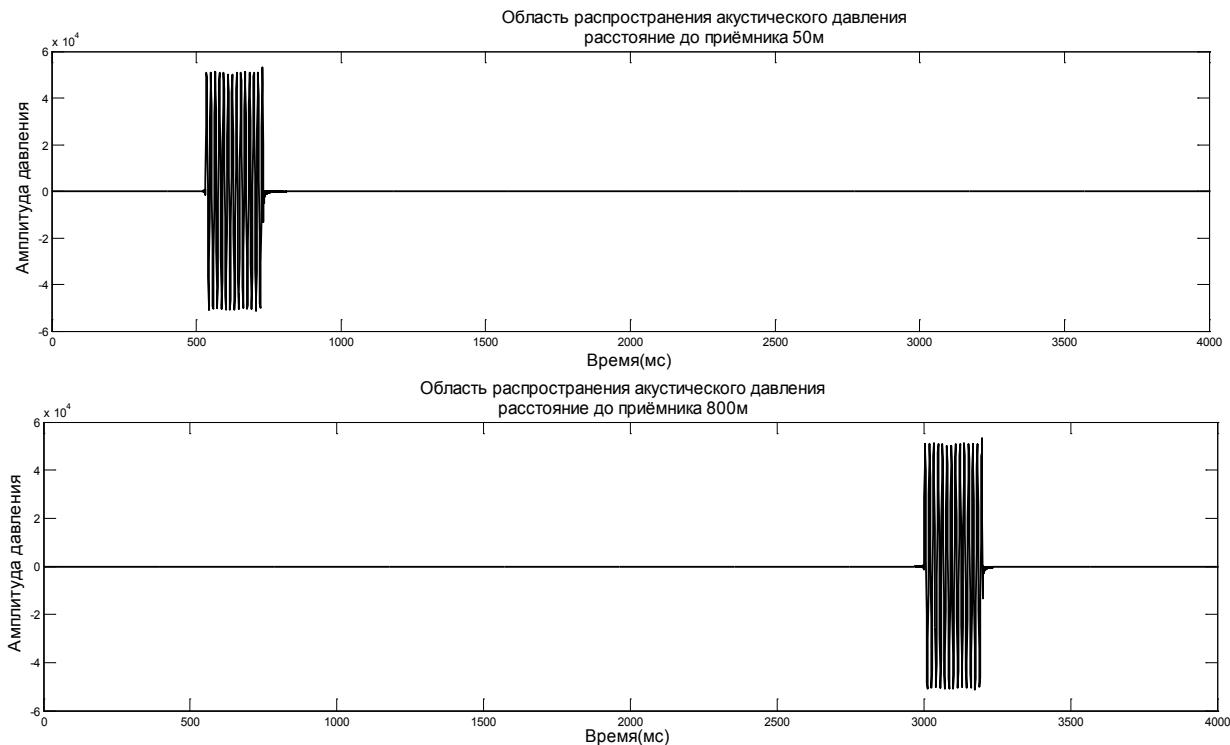


Рис. 4. Области распространения акустического давления: мода (0,0)

На рис. 4 приведена «плоская» волна (мода (0,0)) при распространении в водопроводной трубе. На рис. 5 приведена сумма плоской волны и более медленных высоких мод. При увеличении диаметра трубы (рис. 6) наблюдается затухание и искажение формы «плоской» волны по сравнению с модами высоких порядков, из-за многолучевого распространения волн и ревербераций сигнала, при этом большая часть энергии сигнала приходится на моды высоких порядков, значительно ослабляя «плоскую» волну.

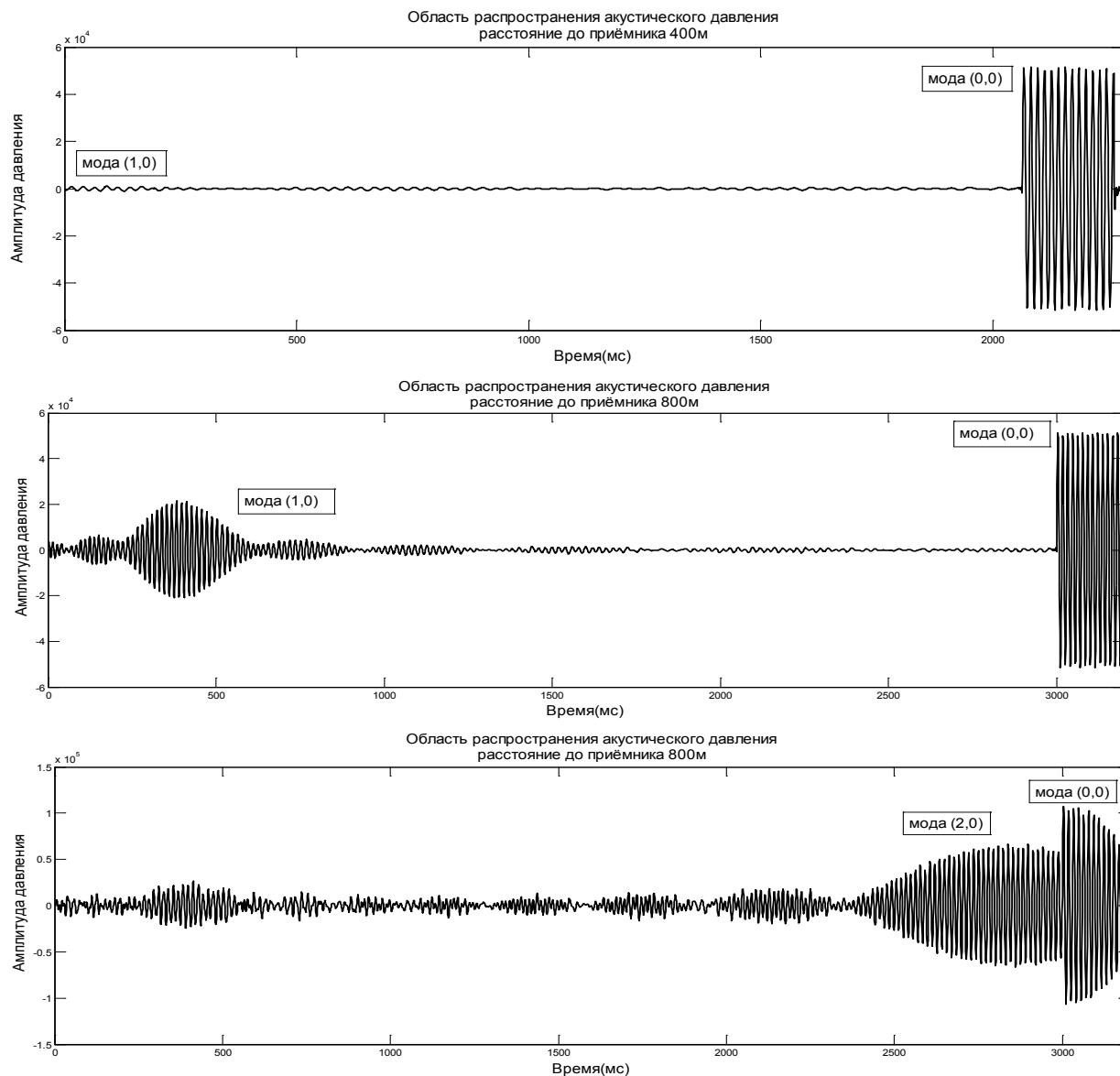
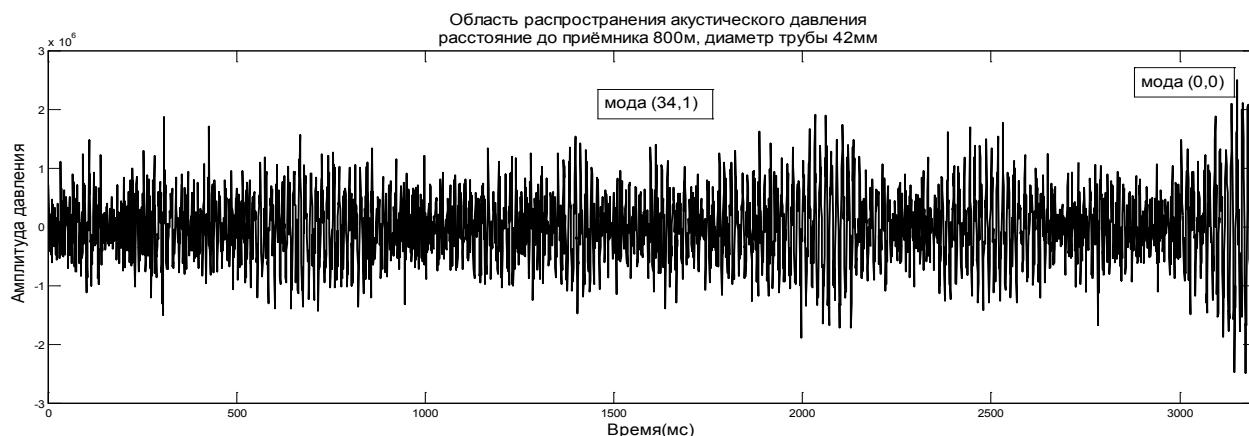


Рис. 5. Области распространения акустического давления

Признак многолучевых траекторий распространения волн и ревербераций сигнала можно также наблюдать:

- при увеличении частоты исходного импульса (рис. 7);
- при увеличении диаметра трубы.



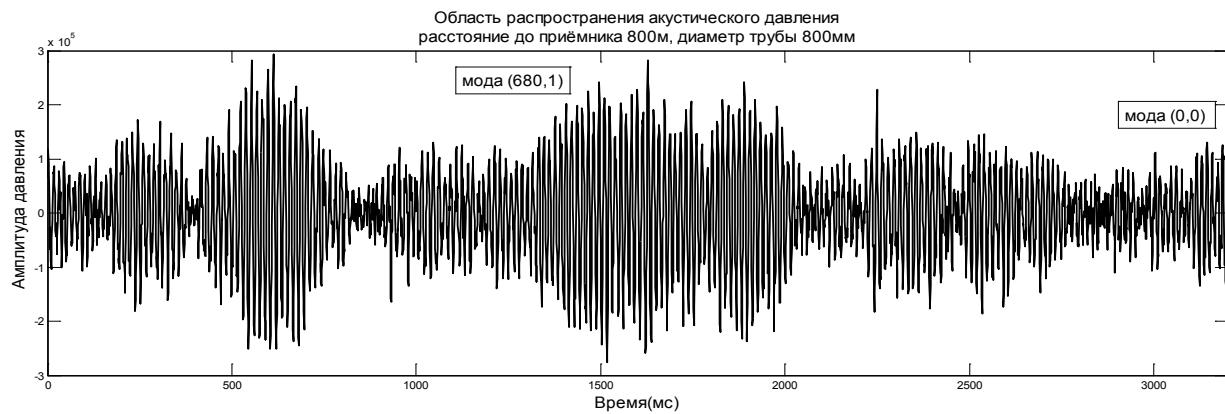


Рис. 6. Области распространения акустического давления

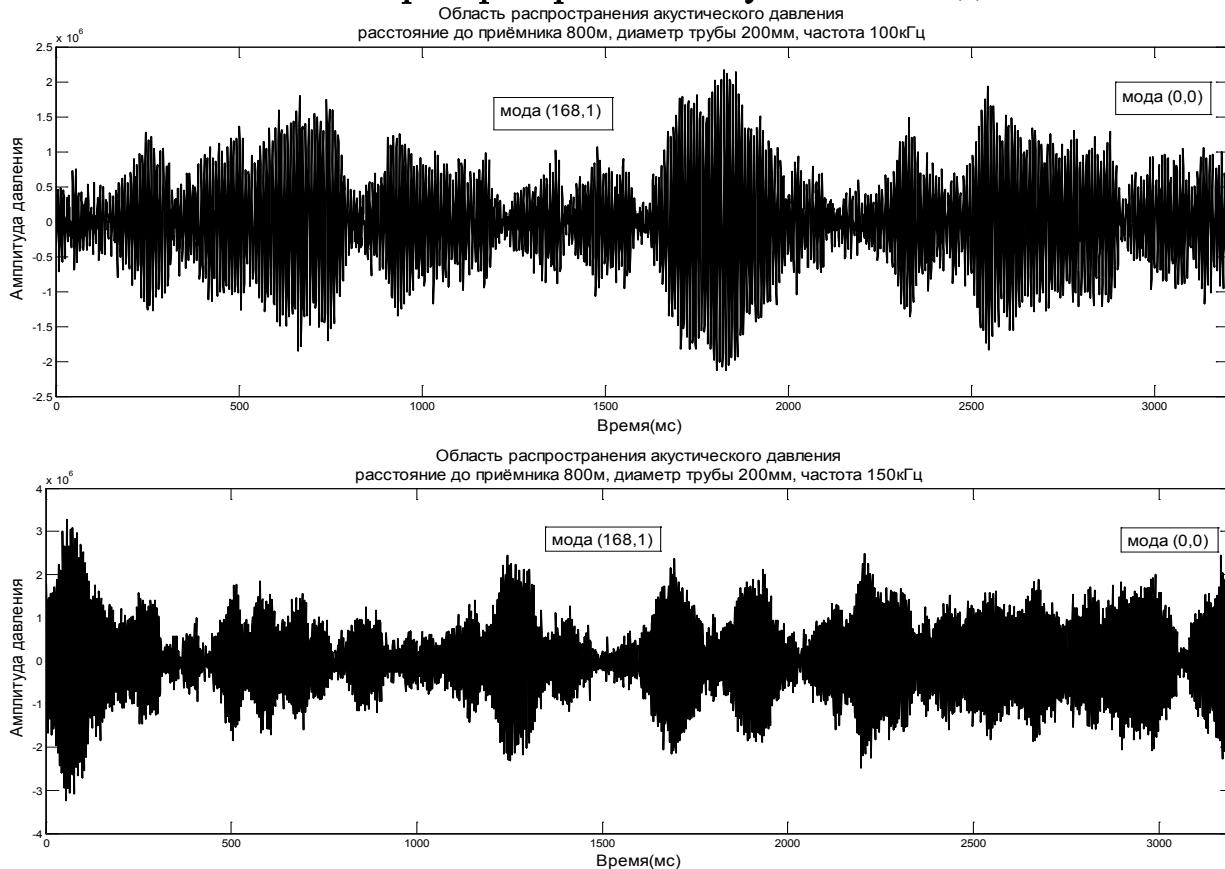


Рис. 7. Области распространения акустического давления

Так как водопроводная труба влияет на исходный сигнал, как фильтр низких частот (ФНЧ), то более высокие моды при распространении подвержены большему затуханию, чем низкочастотные.

5.1.2. Зондирующий датчик в подземной трубе

Водопроводные трубы подвержены нагрузкам, вызванных комбинацией действующих внешних и внутренних сил. Внутренние силы обусловлены действием давления воды, а внешние силы непосредственно воздействием грунта. Подземная водопроводная труба подвержена действию радиальных нагрузок сжатия и круговых нагрузок сдвига, также вызываемых окружающим грунтом. Радиальные нагрузки вызывают деформацию трубы и кратковременное уменьшение диаметра. Обычно радиальные нагрузки не



однородны и за счет этого подземная труба подвержена кольцевому прогибу. Если труба закопана в слабом, вязком грунте с небольшой жесткостью по сравнению с жесткостью трубы, то кольцевой прогиб зависит непосредственно от характеристик трубы. Если труба проложена в уплотненном (гранулированном) грунте, то кольцевой (боковой) прогиб будет зависеть от взаимодействия трубы и грунта [7,8,9].

Рассмотрим случай, когда подземная труба не является упругой (внутренний и внешний радиусы трубы r_1 и r_2) [10]. Будем считать, что труба не подвержена внешним воздействиям, а акустическая волна распространяется внутри трубы и через стенки трубы в грунт (рис. 8). Скорость распространения акустической волны в грунте изменяется в пределах от 600,00 м/с до 1000,00 м/с (для твердых грунтов до 1500,00 м/с), плотность грунта изменяется от 1600,00 кг/м³ до 1900,00 кг/м³.

Рассмотрим передаточную функцию, связывающую параметры акустического давления в радиальном направлении p_r и радиальной скорости v_r во внутренних и внешних границах трубы ($r = r_1$ и $r = r_2$):

$$\begin{bmatrix} p_{r_2} \\ v_{r_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 \\ L_3 & L_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{r_1} \\ v_{r_1} \end{bmatrix},$$

где $L_1 = \frac{p_{r_2}}{p_{r_1}} \Big|_{v_{r_1}=0}$, $L_2 = \frac{p_{r_2}}{v_{r_1}} \Big|_{p_{r_1}=0}$, $L_3 = \frac{v_{r_2}}{p_{r_1}} \Big|_{v_{r_1}=0}$, $L_4 = \frac{v_{r_2}}{v_{r_1}} \Big|_{p_{r_1}=0}$.

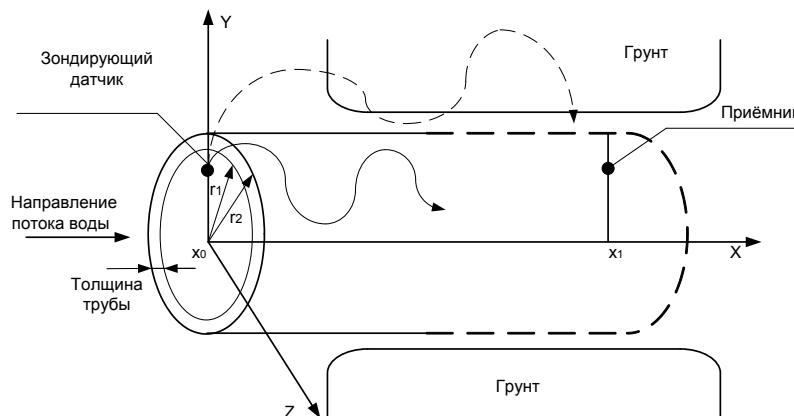


Рис. 8. Распространение акустической волны в подземной трубе

Запишем выражения для акустического давления в радиальном направлении и радиальную волновую скорость в виде [11]:

$$p_r(\eta, \omega, r) = -i\omega\rho [aH_0^1(\eta r) + bH_0^2(\eta r)];$$

$$v_r(\eta, \omega, r) = \frac{i\eta}{\omega\rho} [aH_0^1(\eta r) + bH_0^2(\eta r)],$$

где $H_0^1(\eta r)$ – функция Ханкеля первого рода, для волн, распространяющихся в направлении грунта; $H_0^2(\eta r)$ – функция Ханкеля второго рода, для отраженных волн, распространяющихся во внутреннюю область трубы; a, b – константы.

Тогда в матричной форме $\begin{bmatrix} p_{r_1} \\ v_{r_1} \end{bmatrix} = [M_{\eta}] \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} p_{r_2} \\ v_{r_2} \end{bmatrix} = [M_{\eta}] \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$,



$$\text{где } [M_{r_1}] = \begin{bmatrix} -i\omega\rho H_0^1(\eta r_1) & -i\omega\rho H_0^2(\eta r_1) \\ \frac{i\eta}{\omega\rho} H_1^1(\eta r_1) & \frac{i\eta}{\omega\rho} H_1^2(\eta r_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{13} & r_{14} \end{bmatrix};$$

$$[M_{r_2}] = \begin{bmatrix} -i\omega\rho H_0^1(\eta r_2) & -i\omega\rho H_0^2(\eta r_2) \\ \frac{i\eta}{\omega\rho} H_1^1(\eta r_2) & \frac{i\eta}{\omega\rho} H_1^2(\eta r_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{21} & r_{22} \\ r_{23} & r_{24} \end{bmatrix}.$$

Значения констант $\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = [M_{r_2}]^{-1} \begin{bmatrix} p_{r_2} \\ v_{r_2} \end{bmatrix} = [M_{r_1}]^{-1} \begin{bmatrix} p_{r_1} \\ v_{r_1} \end{bmatrix}$. Умножаем части полученного выражения на матрицу $[M_{r_2}]$ и $[M_{r_1}]$:

$$\begin{bmatrix} p_{r_2} \\ v_{r_2} \end{bmatrix} = [M_{r_2}] [M_{r_1}]^{-1} \begin{bmatrix} p_{r_1} \\ v_{r_1} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} p_{r_1} \\ v_{r_1} \end{bmatrix} = [M_{r_1}] [M_{r_2}]^{-1} \begin{bmatrix} p_{r_2} \\ v_{r_2} \end{bmatrix}.$$

Произведение $[M_{r_2}] [M_{r_1}]^{-1}$ – матрица передачи от внутренней области во внешнюю область и соответственно $[M_{r_1}] [M_{r_2}]^{-1}$ – матрица передачи от внешней области во внутреннюю область.

$$\text{Проведем замены в матрицах: } [M_{r_1r_2}] = \frac{\begin{bmatrix} (r_{21}r_{14} - r_{22}r_{13}) & (-r_{21}r_{12} + r_{22}r_{11}) \\ (r_{23}r_{14} - r_{24}r_{13}) & (-r_{23}r_{12} + r_{24}r_{11}) \end{bmatrix}}{\Delta r_1}, \text{ где } [M_{r_1r_2}]$$

– матрица передачи в направлении от радиуса r_1 до r_2 ; $\Delta r_1 = r_{11}r_{14} - r_{12}r_{13}$.

Тогда коэффициенты матрицы $\begin{bmatrix} L_1 & L_2 \\ L_3 & L_4 \end{bmatrix}$:

$$L_1 = -i \frac{\pi}{4} \eta r_1 [H_0^1(\eta r_2) H_1^2(\eta r_1) - H_0^2(\eta r_2) H_1^1(\eta r_1)];$$

$$L_2 = \frac{\pi}{4} \eta r_1 \rho \omega [H_0^1(\eta r_2) H_0^2(\eta r_1) - H_0^2(\eta r_2) H_0^1(\eta r_1)];$$

$$L_3 = \frac{\pi}{4} \frac{\eta r_1}{\rho \omega} [H_1^1(\eta r_2) H_1^2(\eta r_1) - H_1^2(\eta r_2) H_1^1(\eta r_1)];$$

$$L_4 = -i \frac{\pi}{4} \eta r_1 [H_1^2(\eta r_2) H_0^1(\eta r_1) - H_1^1(\eta r_2) H_0^2(\eta r_1)].$$

Полученные расчетным путём коэффициенты $L_1 - L_4$, и далее через матрицу передачи, позволяют определить величину акустического давления в радиальном направлении через область стенок трубы и грунта в направлении приёмника акустической волны.

Проведем расчет акустического давления, распространяемого внутри магистральной водопроводной напорной трубы из полиэтилена (ГОСТ 18599-2001, ТУ 2248-016-40270293-2002, рабочее давление 1,00МПа, диаметр 200,00мм, толщина 14,70мм), и стальной водопроводной трубы бесшовной горячедеформированной (ГОСТ Р53383-2002, диаметр 199,00мм, толщина 2,00мм). Частота исходного импульса 55,00кГц; расстояние до приёмника акустического сигнала 400,00м; плотность стали 7700,00...7900,00кг/м³; скорость звука в стальной трубе 5740,00м/с; плотность полиэтилена 950,00...960,00кг/м³; скорость продольных волн звука в полиэтиленовой трубе



2000,00 м/с; постоянная затухания для продольных волн в полиэтилене 0,23 непер/см [7]. Временные области распространения акустического давления, приведены на рис. 9-11.

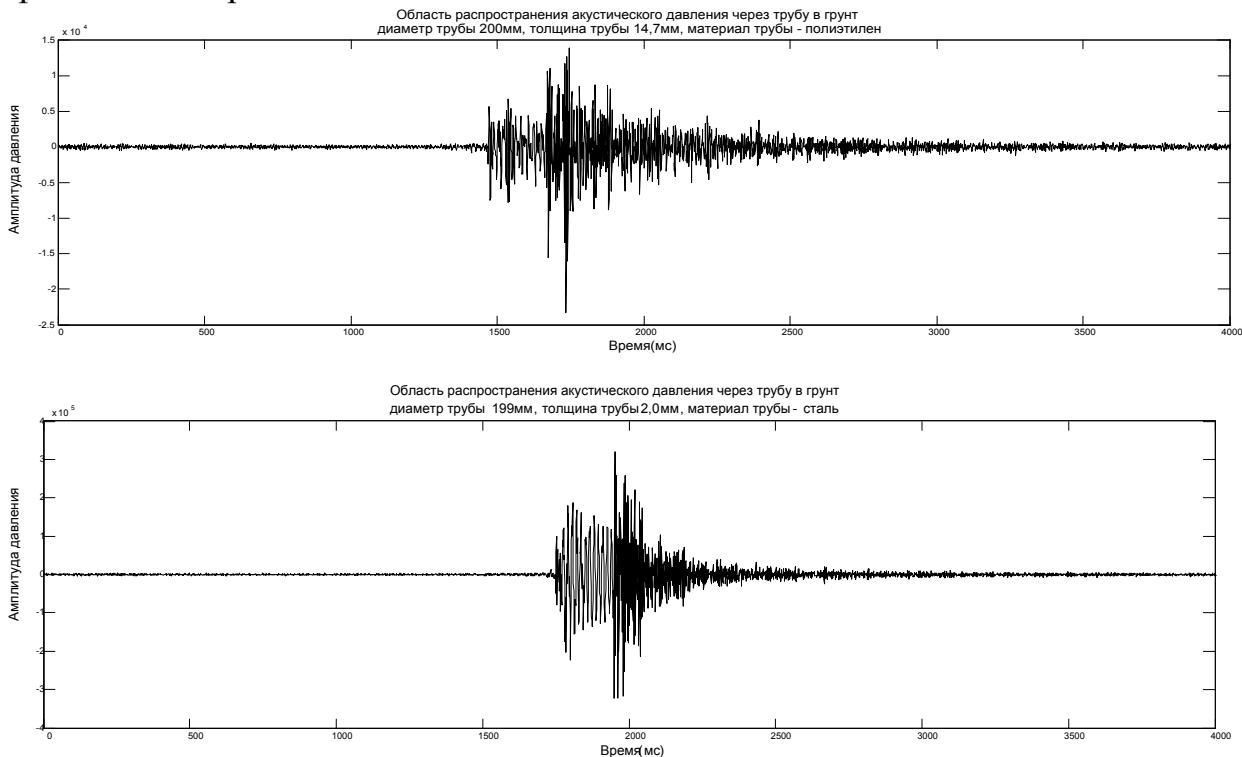


Рис. 9. Области распространения акустического давления

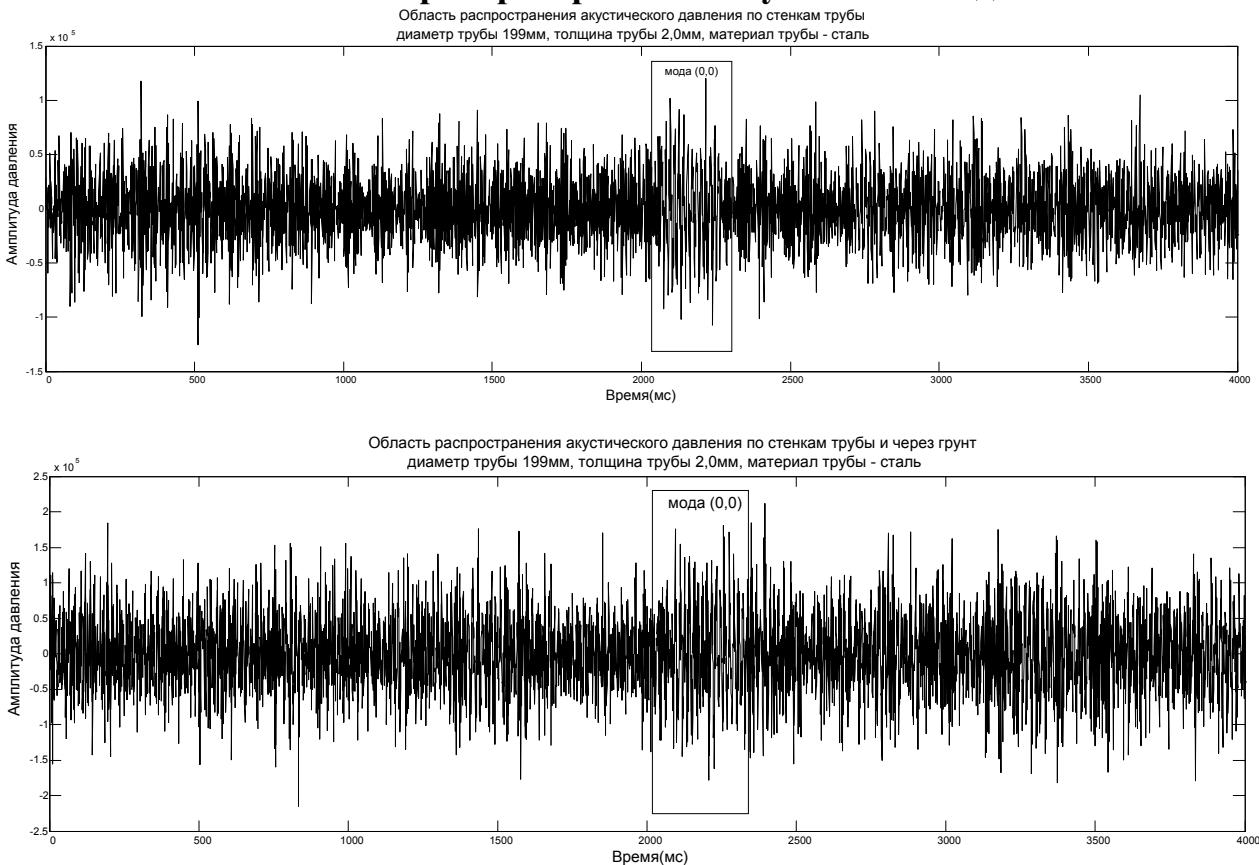


Рис. 10 Области распространения акустического давления

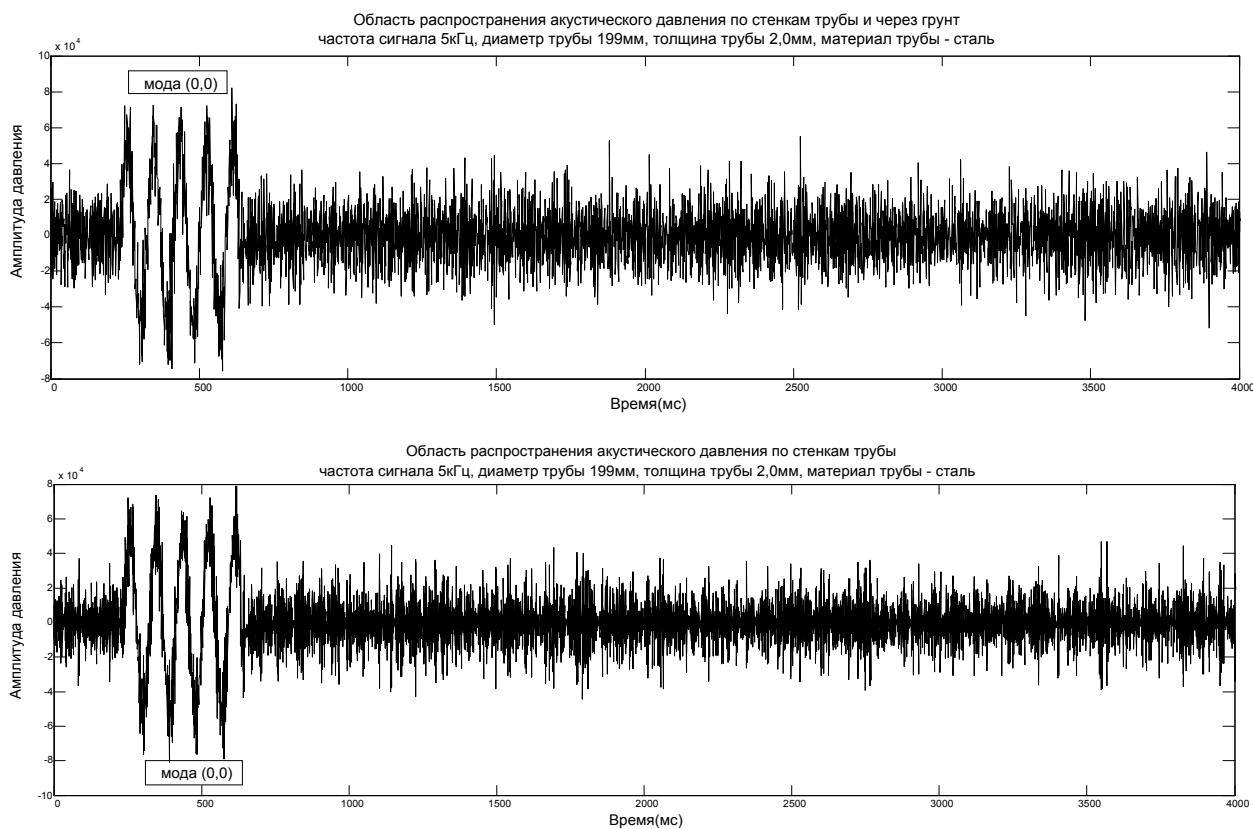


Рис. 11 Области распространения акустического давления

Акустическая скорость распространения волны зависит от сопротивлений материалов (вода, полиэтилен, сталь, грунт и т.д.), которые распределяют энергию волны. На рис. 9, приведены формы сигналов, прошедшие в грунт через различные материалы труб. Сигнал, прошедший в грунт через трубу из полиэтилена ослаблен на 28,50дБ по сравнению с сигналом прошедшим в грунт через стальную трубу. По форме сигнала видно, что в грунте не распространяется «плоская» волна, поэтому можно предположить, что сигнал в виде шума будет накладываться на «плоскую» волну, распространяемую внутри трубы.

На рис. 10-11 видно, что на вход приёмника поступают более быстрые моды, чем «плоская» волна, прибывшие по стенкам стальной трубы. Наблюдаются и другие моды, распространяющиеся через более длинные пути распространения, включая возможные отражения от стенок стальной трубы и прошедшие через грунт различной плотности. При уменьшении частоты исходного сигнала до 5,00кГц не изменяя диаметр трубы, наблюдаем затухания отраженных сигналов, прошедших через стенки стальной трубы и области грунта на 14,00дБ (рис. 11). Импульс с частотой 55,00кГц возбуждает большее количество мод, что приводит к серьёзной реверберации сигнала (рис. 10), при этом, высокочастотные режимы затухают быстрее, чем низкочастотные.

Таким образом, отражения акустической волны на границе раздела нескольких сред, имеющих разную плотность, будет уменьшать энергию распространяемой акустической волны внутри трубы и увеличивать многолучевое распространение волн.



5.2. Зондирующие датчики

Для акустического структурного мониторинга водопровода в трубе можно установить обратимые пьезокерамические датчики (ПКД) по всей длине водопроводной сети, связанные с удаленной информационной системой [12,13,14]. С помощью ПКД регистрируют акустические сигналы продольной звуковой волны. Математической обработкой сигналов определяют их временные задержки и амплитуды, по которым вычисляют затухание и скорость звука на участках трубы между смежными парами ПКД, а затем по затуханию и скорости звука рассчитывают усредненную по длине толщину слоя коррозии.

Однако оценка степени коррозии трубы только по величине затухания звука недостаточна, поскольку затухание обусловлено не только коррозией, но и другими факторами, в частности изменчивостью акустического контакта трубы с грунтом, характеристиками ПКД и т.п.

Поэтому рассмотрим особенности выбора ПКД для устройства акустического структурного мониторинга водопровода и проведем расчёт основных характеристик датчика, применяя программу PiezoCad.

Пьезокерамические датчики в водной среде применяют с типовыми колебательными системами: цилиндрические силовые и комбинированные, стержневые, изгибные пластинчатые, трубчатые, дисковые, сферические и др., которые состоят из элементов преобразования энергии, электроизоляции, герметизации, экранирования и крепления [14,15,16]. Эффективность работы ПКД оценивается, коэффициентом взаимного преобразования акустической W_{AK} и электрической W_e энергии в (дБ): $K = \frac{W_{AK}}{W_e}$.

В диапазоне частот 0,05...50,00 МГц [16], который чаще всего используется при акустическом структурном мониторинге водопроводных труб, величина K для разного вида ПКЭ меняется от единиц до нескольких десятков дБ.

Наиболее часто применяется конструкция ПКД (рис. 12). Активным элементом ПКД является пьезокерамический диск, который находится между протектором (материал эколайт) и компаундом (материал пенополиуретан).

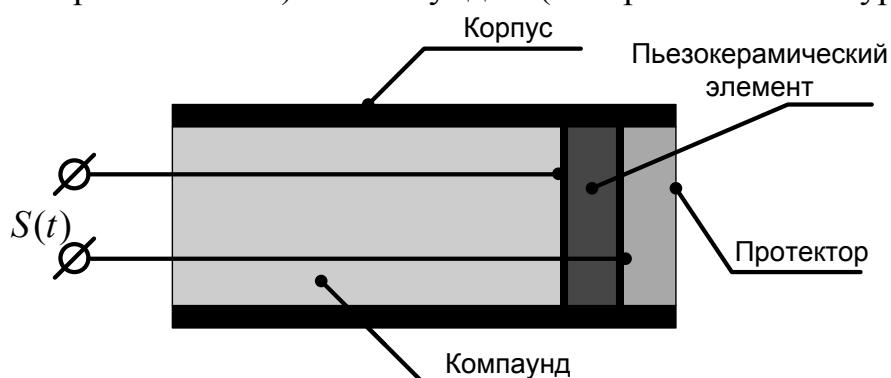


Рис. 12. Конструкция пьезокерамического датчика

Два электрода на верхней и нижней поверхности диска соединены с генератором сигналов. Колебание диска связано с частотой подаваемого сигнала и размерами диска.



В табл.1 приведены параметры пьезокерамических материалов со средней диэлектрической проницаемостью, применяемые в конструкциях ПКД для водной среды [17].

Существует много подходов для оптимального выбора ПКД, толщины и волнового сопротивления протектора и компаунда, при помощи систем автоматизированного проектирования ANSYS, ATILA, PZFLEX, ABAQUS, MODULEF, PHOEBE, PiezoCad [15,17,18].

В работе проведем выбор ПКД (материал PZT-5A) для акустического структурного мониторинга водопроводов применяя программу PiezoCad [19]. В табл.2 приведены основные результаты расчёта.

Таблица 1

Параметры пьезокерамических материалов со средней диэлектрической проницаемостью

Материал	T_k, C°	e^T_{33}/e_0	K_p	$ d_{31} , pKl/H$	$d_{33}, pKl/H$	$ g_{31} , mB\cdot m/H$	$d_{33}/\sqrt{e^T_{33}/e_0, pKl/H}$	$\operatorname{tg}\delta \cdot 10^2, E=50, B/cm$	Q_m
ПКР-88	315	2200	0,65	210	470	10,7	10,0	1,4	70
ПКР-89	320	1900	0,67	205	460	10,5	10,5	1,6	75
Аналоги									
PZT-5A	365	1700	0,60	171	374	11,4	9,1	2,0	75
ЦТСН В-1	240	2200	0,54	205	445	10,5	9,5	1,9	70
ЦТС-19	290	1600	0,60	150	340	10,6	8,5	2,5	60

Особенности выбора ПКД для специальных условий эксплуатации являются исключительно сложными. Имеется значительное число публикаций, в которых рассматриваются особенности выбора ПКД, которые основываются, как правило, нормальными условиями эксплуатации. В тех же случаях, когда требуется обеспечить работу ПКД в заданном диапазоне температуры, давления и т.п., рекомендации имеют качественный характер. Поэтому принимаемые решения часто базируются только на опыте и не являются оптимальными, особенно в тех случаях, когда необходимо обеспечить требуемые технические характеристики.

Таким образом, правильный выбор ПКД, с учетом требований к информативности и надежности в рабочих условиях, будет зависеть не только от материала пьезокерамики, но и от конструкции непосредственно излучателя. Применением программы PiezoCad при проектировании ПКД можно осуществить оптимальный выбор толщины ПКД, волнового сопротивления протектора и компаунда для применения в устройстве акустического структурного мониторинга водопроводов.



Таблица 2

Параметры преобразователя на основе материала PZT-5A

Параметр	Величина
Центральная частота	55000Гц
Частотный диапазон	0...100000Гц
Число точек	400
Временное окно	2048
Диаметр диска	20мм
Толщина диска	11,23636мм
Полярность	+
Продольная скорость	3694,0 м/с
Сдвиговая скорость	2612,0 м/с
Плотность	7750,0 кг/м ³
Постоянная ёмкость	211,6 пФ
Диэлектрическая константа	855,0 E33s
Тангенс угла электрических потерь	0,0200
Тангенс угла механических потерь	0,0130

Выводы

Основными составляющими частями технологии исследования внутренней структуры водопровода акустическими методами являются: гидроакустические средства; средства формирования и передачи данных; методика формирования аппаратно-программных комплексов сбора и обработки информации и методика их использования для проведения исследований.

Технология исследования водопровода акустическими методами должна удовлетворять следующим требованиям:

1. Позволять исследовать подземные и наземные водопроводы, с осадочными налетами на стенках трубы, с коррозионными процессами внутри трубы и т.п.

2. Содержать научно обоснованную методику формирования исследовательских аппаратно-программных комплексов сбора и обработки информации о состоянии водопровода.

3. Технология должна быть апробирована в процессе формирования образцов аппаратно-программных комплексов и проведения с их использованием экспериментальных и плановых исследований водопроводов.

4. Водопроводная труба влияет на исходный сигнал, как фильтр низких частот (ФНЧ), соответственно более высокие моды при распространении подвержены большему затуханию, чем низкочастотные.

5. Акустическая скорость распространения волны зависит от сопротивлений материалов (вода, полиэтилен, сталь, грунт и т.д.), которые распределяют энергию волны. В грунте не распространяется «плоская» волна, поэтому можно предположить, что шум будет накладываться на «плоскую» волну, распространяющуюся внутри трубы. При уменьшении частоты исходного импульса до 5,00кГц и, не изменяя диаметр трубы, отраженные сигналы,



прошедшие через стенки стальной трубы и области грунта затухают на 14,00dB.

6. Отражения акустической волны на границе раздела нескольких сред, имеющих разную плотность, уменьшают энергию распространяемого акустического давления внутри трубы и увеличивать многолучевое распространение волн.

7. Выбор зондирующего датчика, с учетом требований к информативности и надежности в рабочих условиях, будет зависеть не только от выбранного материала, но и от конструкции датчика.



ГЛАВА 6. БИОГАЗВЕРМИТЕХНОЛОГИЯ КАК ФАКТОР РОСТА ЭНЕРГЕТИЧЕКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РЕГИОНА

Введение

Одной из ключевых проблем современного общества является проблема отходов. Ежегодно в мире на свалки отправляются миллиарды тонн отходов, а перерабатывается лишь незначительная их часть. Парадоксальность этой ситуации еще больше ввиду того, что отходы, а особенно, органические, являются по сути вторичными ресурсами и крупнейшими альтернативными источниками энергии.

В современной литературе и нормативной документации роли биогенных методов переработки органических отходов уделяется недостаточное внимание. Также существенной проблемой в данной сфере является однобокий подход к технологиям биогенной переработки: одни ученые «ратуют» за биогазовое направление, другие – за зоогенную переработку отходов. Но в единую взаимосвязанную систему эти направления, как правило, не сводятся.

В качестве комплексного решения данной проблемы на базе Санкт-Петербургского горного университета разрабатывается биогазвермитехнологическое направление. Его сущность – создание специальных биогазвермитехнологических буртов в рельефных понижениях (например, отработанных карьерах), в которых послойно складируются органические отходы, затем заселяется поголовье дождевых компостных червей, перерабатывающих отходы в биогумус, а для дегазации создается сеть горизонтальных коллекторов с последующей аккумуляцией метановоздушной смеси.

6.1. Биогаз и биогазвермитехнология

Процессы разложения органических отходов с получением горючего газа и его использованием в быту известны давно: в Китае их история насчитывает 5 тыс. лет, в Индии – 2 тыс. лет. Природа биологического процесса разложения органических веществ с образованием метана за прошедшие тысячелетия не изменилась. Но современные наука и техника создали оборудование и системы, позволяющие сделать эти «древние» технологии рентабельными и применяемыми не только в странах с теплым климатом, но и в странах с суровым континентальным климатом, например в России.

Биогаз плохо растворим в воде, состоит из метана (55-85%) и углекислого газа (15-45 %), могут быть следы сероводорода. Его теплота сгорания составляет от 21 до 27,2 МДж/м³. При переработке 1 т свежих отходов крупного рогатого скота и свиней (при влажности 85 %) можно получить от 45 до 60 м³ биогаза, 1 т куриного помета (при влажности 75%) – до 100 м³ биогаза. По теплоте сгорания 1 м³ биогаза эквивалентен: 0,8 м³ природного газа, 0,7 кг мазута, 0,6 кг бензина, 1,5 кг дров (в абсолютно сухом состоянии), 3 кг навозных брикетов. Биогаз, как и природный газ, относится к наиболее чистым видам топлива [1].



Получение биогаза из органических отходов имеет следующие особенности:

- осуществляется санитарная обработка сточных вод (особенно животноводческих и коммунально-бытовых), содержание органических веществ снижается до 10 раз;
- анаэробная переработка отходов животноводства, растениеводства и активного ила приводит к минерализации основных компонентов удобрений (азота и фосфора) и их сохранению (в отличие от традиционных способов приготовления органических удобрений методами компостирования, при которых теряется до 30-40 % азота);
- при метановом брожении высокий (80-90 %) КПД превращения энергии органических веществ в биогаз;
- биогаз с высокой эффективностью может быть использован для получения тепловой и электрической энергии, а также в двигателях внутреннего сгорания;
- биогазовые установки могут быть размещены в любом регионе страны и не требуют строительства дорогостоящих газопроводов.

Биогазовые технологии позволяют наиболее рационально и эффективно конвертировать энергию химических связей органических отходов в энергию газообразного топлива и высокоэффективных органических удобрений, применение которых, в свою очередь, позволит существенно снизить производство минеральных удобрений, на получение которых расходуется до 30 % электроэнергии, потребляемой сельским хозяйством.

Интенсивное внедрение биогазовых технологий в развитых и развивающихся странах, повышение их эффективности и рентабельности внесли значительные изменения в переориентировку этих технологий от только энергетических к экологическим и агрохимическим (производство удобрений), особенно при переработке разнообразных органических отходов. Очевидно, это является решающей альтернативой для получения биогаза. В последние годы биогазовые технологии были детально оценены в Дании, которая стала первой страной, успешно продемонстрировавшей коммерческие биогазовые заводы по переработке отходов животноводства и других сельскохозяйственных отходов для получения тепловой и электрической энергии. Вклад биогаза в энергетический баланс страны составляет 12 %.

К производству биогаза относится также получение лендуилл-газа или биогаза из мусорных свалок. В настоящее время во многих странах создаются специальные обустроенные хранилища для твердых бытовых отходов (ТБО) с целью извлечения из них биогаза, используемого для производства электрической и тепловой энергии.

Для широкого распространения биогазовой технологии особое значение имеют следующие факторы:

- стоимость установки;
- удельная производительность;
- полнота переработки сброшенной массы и биогаза в наиболее ценные продукты по сравнению с исходным сырьем;



- эффективность в решении задач, связанных с охраной окружающей среды;
 - высокая эксплуатационная надежность и простота обслуживания.

Стоимость установки в значительной степени определяется простотой ее технологической схемы и отсутствием в ней уникальных компонентов. На современном этапе развития биотехнологии важное значение приобретает интенсификация процесса метанового сбраживания и снижение за счет этого капитальных и эксплуатационных затрат.

Опыт внедрения биоэнергетических установок за рубежом свидетельствует об ускоренном развитии этого направления. Примерами соответствующих технических решений могут служить установки модульного типа, разработанные фирмами Швеции, Германии, Финляндии, выполняемые на основе горизонтальных цилиндрических реакторов с продольными мешалками. Другое направление в реакторостроении представляют крупные вертикальные метантенки, собираемые на месте.

Несмотря на то, что биогазовый реактор вносит наибольшую единичную долю в стоимость всей установки, затраты на него, как правило, не превышают 30% всех затрат на биоэнергетическую установку. Вследствие этого более существенным является увеличение скорости переработки и связанное с этим уменьшение объема реактора, что позволит обеспечить необходимый экономический эффект раньше, чем произойдет существенное уменьшение затрат на комплектующее оборудование, входящее в состав биоэнергетической установки или значительное сокращение его номенклатуры в связи с существенным упрощением установок.

Биогазвермитехнологический бурт на основе отработанного карьера (рис. 1) перерабатывает до 200 кг отходов крупного рогатого скота и производит в сутки до 10-12 м³ биогаза и до 200 л жидкых удобрений.

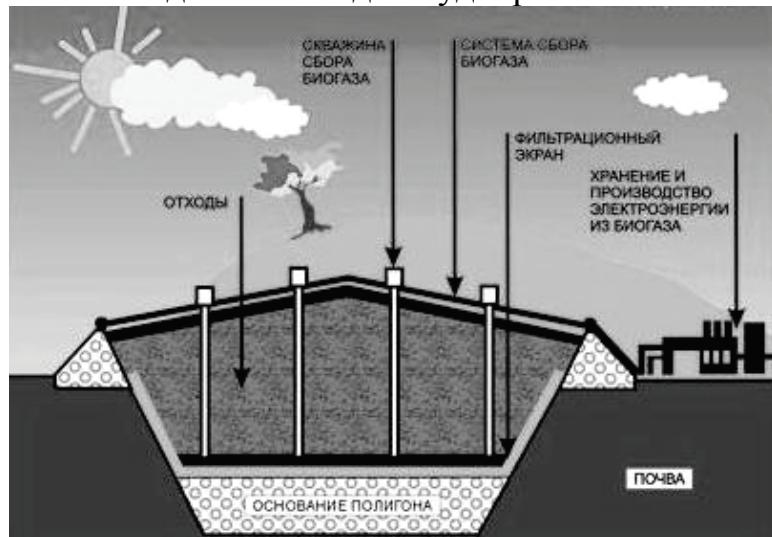


Рис. 1. Модель-схема биогазвермитехнологического бурта на базе отработанного карьера

Автономность работы такого бурта может быть достигнута при условии ежедневной переработки не менее 500 кг отходов с влажностью 85 %.



Сравнительный анализ выхлопных газов, полученных на работающем с номинальной мощностью биогазбензоэлектрогенераторе при сжигании в нем последовательно бензина и биогаза, показал, что при сжигании биогаза содержание СО в 45 раз меньше, углеводородов в 30 раз меньше, оксидов азота в 1,5 раза меньше, чем при сжигании бензина.

Оптимальный расход биогаза на производство 1 кВт·ч электрической энергии (220 В, 50 Гц на биогазбензоэлектрогенераторе АБ-4Т/400-М2 (БГ)) составил 0,55-0,6 м³/ч [1].

Оптимальный расход биогаза при эксплуатации газовой ИК-беспламенной горелки мощностью 5 кВт составил 0,8-1 м³/ч. Менее мощный вариант биогазвермитологического бурта (созданный для фермерских нужд) способен перерабатывать до 1 т отходов в сутки и производить до 40 м³ биогаза, который используется для получения электрической (80 кВт·ч/сут.) или тепловой энергии (0,14 Гкал/сут.) и до 1 т жидких удобрений.

Стоимость исходных отходов крупного рогатого скота в Ленинградской области составляет 1000-2000 руб./т, а рыночная цена произведенных удобрений (по месту производства) - уже 90 000 руб./т [4]. Расход удобрений на 1 га в зависимости от выращиваемых культур составляет 1-3 т. Собственные потребности в энергии на поддержание термофильного (52-53°C) процесса составляют 30 %. Срок эксплуатации модуля – не менее 10 лет.

6.2. Вермитехнологический компонент

Вермитехнология – система организационно-технологических мероприятий по культивированию дождевых компостных червей на разных субстратах в конкретных экологических условиях, обработке и применению копролита и биомассы червей в сельском хозяйстве. Вермикультура -популяция дождевых компостных червей (*vermis* - в переводе с латинского - черви) вместе с сопутствующими микроорганизмами в конкретном органическом субстрате.

Ежегодно на земле образуется около 230 млрд. тонн сухого органического вещества (листьев, стеблей, плодов, ягод, корнеплодов и т.д.), содержащего все необходимые пищевые компоненты (белки, жиры, углеводы, минеральные соли, витамины, ферменты, биологически активные вещества и т.д.) и накопившего в себе энергию в десятки раз большую, чем дает сжигание за год всех видов топлива. Вся эта растительная органическая масса падает на почву и здесь достается микроорганизмам и почвенным животным, тогда как на долю людей и наземных животных из этого количества перепадает не более 10 %. Это знание делает биотехнологию прогнозируемой и перспективной на неопределенно длительный период времени. Процесс переработки органических отходов с использованием дождевых червей стал называться вермикультурированием, а полученный продукт – вермикомпостом или биогумусом. Характерной чертой этой биотехнологии является возможность переработки червем широкого ассортимента органических отходов: навоз всех видов животных, помет, осадки очистных сооружений, отходы сельскохозяйственного и горноперерабатывающих производств. Существуют



несколько основных способов получения биогумуса с помощью вермитехнологии, применяемых в разных странах (табл. 1) [3].

Таблица 1

Сравнительная характеристика способов получения биогумуса

Способ вермикомпостирования	Описание способа	Преимущества	Недостатки
Грядный	Вермикомпостная смесь размещается в виде гряд, сверху накрывается тканью для предотвращения избыточного облучения дождевых червей ультрафиолетовыми лучами. Может использоваться в регионах с более суровым типом климата - если вермикомпостирование осуществляется в специальных помещениях (рис. 2а)	Технологическая универсальность; позволяет разработать технические средства, обеспечивающие приготовление субстрата, его доставку, формование основных гряд и распределение подкормки, а также переработку вермикомпоста	Низкая скорость переработки вермикомпоста дождевыми червями
Туннельный	Конвертируемые компоненты помещаются в невысокие пленочные теплицы, куда в дальнейшем заселяются черви. Применяется при промышленном производстве биогумуса	Высокая скорость переработки вермикомпоста, универсальность при промышленном внедрении	Высокая стоимость производства
Траншейный	Необходимо использование дренажного материала (гравий, синтетические капсулы, ветки кустарников или деревьев), которым выстилается дно 60-сантиметровой по глубине траншеи (рис. 2б)	Низкая стоимость производства, технологическая простота применения	Низкая скорость переработки вермикомпоста дождевыми червями, большая зависимость от агроклиматических условий



а

Грядный способ вермикомпостирования



б

Траншейный способ вермикомпостирования

Рис. 2. Способы вермикомпостирования



Очень важным моментом при вермикомпостировании является поддержание оптимальных параметров (табл. 2) [3]:

Таблица 2

Оптимальные параметры вермикомпостирования

Наименование показателя	Значение
Температура воздуха	+ 18-20°C
Температура субстрата	+ 28-30°C
Влажность воздуха	50-55 %
Влажность субстрата	60-70 %
pH субстрата	7,3-7,6
соотношение азота N к углероду C	30:1
Срок до заселения червей	7-10 дней

При недостаточном питании рост и развитие червей сильно замедляется, они гибнут. Быстрое размножение дождевых червей, неприхотливость их к условиям питания и содержания, быстрый прирост биомассы и высокое содержание белков в их теле побудили ученых разработать способы промышленного разведения червя для народнохозяйственных нужд. Основные физиологические параметры дождевых компостных червей представлены в таблице 2 [3].

Таблица 2

Основные физиологические характеристики дождевых компостных червей *Eisenia foetida*

Физиологический параметр	Значение
Длина, см	8-10
Масса, г	1-1,2
Продолжительность жизни, лет	10-15
Плодовитость 1 особи, шт./год	1200-1500
Компонентный состав:	
вода, %	85
сухой материал, %	15
жир, %	1
белок, %	9
зола, %	0,8

6.3. Потенциал вермитехнологии в обеспечении экологической безопасности

На базе Горного университета и МГУ им. Н.П. Огарева была проведена серия опытов, целью которых было получение биогумуса с наибольшей продуктивностью. В результате был получен вариант вермикомпоста, состоящий из навоза крупного рогатого скота (КРС), дефеката (использованной в сахарном производстве смеси извести с щебенкой + остатки от сахарной свеклы), садовой земли и лиственного опада.



Навоз КРС – сложный капиллярно-пористый материал, межклеточное пространство которого заполнено водой с малым содержанием сахарозы. В свежем навозе КРС содержание сухих веществ колеблется от 10 до 20 %, рН смешен в кислую сторону [3].

Навоз КРС смешивают с дефекатом в соотношении 3:1 по объему для нейтрализации среды до получения кислотности, равной рН 7,3-7,6, что является оптимальным для обитания навозных червей. Дефекат – смесь щебня с известняком, которые используются для перетирания сахарной свеклы в сахарном производстве.

В пробах дефеката, поступивших на анализ в Федеральное государственное учреждение «Государственный центр агрохимической службы «Мордовский», установлено содержание (табл. 3):

Таблица 3

Основные физико-химические показатели дефеката

№	Наименование показателей	Показатель
1	Содержание суммы углекислого кальция и углекислого магния в перерасчете на CaCO_3 , %	75
2	Содержание влаги, %	25
3	Содержание общего азота, %	0,5
4	Содержание общего калия, %	0,4
5	Содержание общего фосфора, %	0,6
6	Содержание органического вещества, %	35

Анализы проведены в соответствии с ТУ 18 РСФСР 570-74 и ГОСТ 26715-85 – ГОСТ 26718-85.

Внесение садовой земли в равных пропорциях к объему смеси оптимально для жизнедеятельности навозного червя. Для повышения пористости вносят наполнитель, например лиственный опад, 15-20 % в пропорциях от объема последней полученной смеси. Если пропорция будет составлять менее 15 %, то ухудшается воздушный режим внесения лиственного опада, если более 20 %, то снижается качество компостосодержащего субстрата.

Способ осуществляется следующим образом:

1. Приготовление исходного компостосодержащего субстрата. Навоз КРС смешивают с дефекатом в соотношении 3:1 по объему.
2. Перемешивание садовой земли в равных пропорциях по отношению к полученной смеси
3. Внесение органического наполнителя - лиственного опада в пропорциях 15-20 % от объема последней полученной смеси

В качестве наполнителя для сравнения также использовали резаную солому и опилки. Далее в компостосодержащий субстрат вносят навозных червей *Eisenia foetida* по нормативам 10-12 шт. на 1 л смеси. Биогумус подсушивают, просеивают и используют для выращивания культурных растений.



Полученный биогумус был исследован на предмет содержания органического вещества в различных субстратах после вермикультурирования.

Как показали результаты вермикультурирования (табл. 4), в опытных субстратах (№№2-5) повышение органического вещества по сравнению с контролем. Соотношение гуминовых кислот (ГК) и фульвокислот (ФК) на оптимальном уровне.

Таблица 4
Химический анализ различных видов вермикомпостов

№	Состав смеси (соотношение компонентов, %)	Содержание органического вещества на % на сухую почву			ГК:ФК
		Общий углерод	ГК	ФК	
1	Садовая земля (контроль)	3,70	2,72	0,67	4,06
2	Садовая земля + (дефекат + навоз КРС) (50+50)	4,88	2,51	0,74	3,39
3	Садовая земля + (дефекат + навоз КРС)+лиственый опад (50+50+10)	4,73	2,45	0,77	3,18
4	Садовая земля + (дефекат + навоз КРС)+резаная солома (50+50+10)	4,62	2,53	0,71	3,56
5	Садовая земля + (дефекат + навоз КРС)+опилки (50+50+10)	5,43	2,49	0,72	3,46

В пробах биогумуса установлено следующее содержание основных индикаторных химических показателей (табл. 5). Анализы проведены в соответствии с ГОСТ 26712-85 - ГОСТ 26718-85.

Полученный биогумус был апробирован на редисе сорта «Жара», который выращивался в течении 25 дней (табл. 6).

Из таблицы 6 видно, что оптимальным соотношением компонентов для получения наибольшей биопродуктивности обладает субстрат №3, т.е. оптимальным составом будет обладать смесь, состоящая из садовой земли, навоза КРС, дефеката и лиственного опада в заданных пропорциях.

Таблица 5
Основные химические показатели биогумуса

Кислотность (рН) солевой суспензии	Азот общий	Калий общий	Фосфор общий
	% на сухой продукт		
8,06	0,84	1,62	1,41



В качестве органического наполнителя используют лиственный опад из лесной или пригородной зоны. Лиственный опад из городской зоны нежелателен ввиду большого содержания в нем свинца, ртути и других тяжелых металлов. Навозные черви поглощают эти вещества и переводят их в калойдную форму. Однако в дальнейшем при изменении условий хранения полученного биогумуса, калойдная форма может трансформироваться, тем самым произойдет резкое ухудшение качества биогумуса. Создание данной смеси осенью является оптимальным, т.к. затраты на сбор лиственного опада в это время года минимальны.

Таблица 6
Экспериментальные исследования различных видов
вермикомпостов

№	Состав смеси (соотношение компонентов, %)	Средняя масса корнеплода редиса, г	Диаметр корнеплода редиса, мм
1	Садовая земля (контроль)	9,27	24,88
2	Садовая земля + (дефекат + навоз КРС) (50+50)	11,97	28,31
3	<i>Садовая земля + (дефекат + навоз КРС)+лиственный опад (50+50+10)</i>	13,31	29,33
4	Садовая земля + (дефекат + навоз КРС)+резаная солома (50+50+10)	12,73	28,69
5	Садовая земля + (дефекат + навоз КРС)+опилки (50+50+10)	12,93	28,49

По сравнению с известными решениями предлагаемый способ позволяет повысить интенсивность процесса переработки органических отходов и уменьшить затраты на производство биогумуса.

В зависимости от геоэкологических условий вермикомпостирование проводят различными способами. В районах с тёплым, мягким климатом червей чаще всего содержат на площадках под открытым небом, с холодным - в помещениях, теплицах, плёночных тоннелях и пр.

В естественных условиях обитания на видовой состав и численность дождевых червей влияет тип почвы. На пастбищах в суглинках, легких суглинистых и супесчаных почвах численность червей была максимальной и составляла до 450 особей/м². В глинистых почвах значительно меньше (до 230 особей/м²), а в кислых - наименьшей (25 особей/м²). Такая особенность должна учитываться и при создании искусственных условий вермикультивирования (особенно при вермитехнологической рекультивации карьеров, отвалов, хвостохранилищ).



6.4. Анализ возможностей биогазвермитехнологии в условиях г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области

Одним из главных богатств Ленинградской области и Санкт-Петербурга в ресурсном отношении являются всевозможные строительные материалы. При этом их добыча сопряжена с целым рядом проблем, одной из которых является их рекультивация после завершения разработки. Однако даже такую, на первый взгляд, неприятную проблему можно решать с получением значительного положительного побочного эффекта: на базе начальной стадии рекультивации карьерные выемки рассматривать как каркас для создания биогазовых буртов.

На базе Горного университета разработана модель бурта, предназначенного для вермитехнологической (основанной на переработке органических отходов в удобрение с помощью дождевых компостных червей) рекультивации карьеров строительных материалов с применением биогазовой технологии. Полученную при этом энергию можно использовать не только для нужд самого предприятия, но и обеспечивать ей близлежащие объекты производства или дома.

Для выработки биогаза необходимо заложить бурт мощностью не менее 10 метров (рис. 3, 4). Рациональная схема почвенного бурта, в котором будет использоваться биогазвермитехнология, имеет вид:



Рис. 3. Схема почвенного бурта, предназначенного для вермитехнологической рекультивации почвенного массива

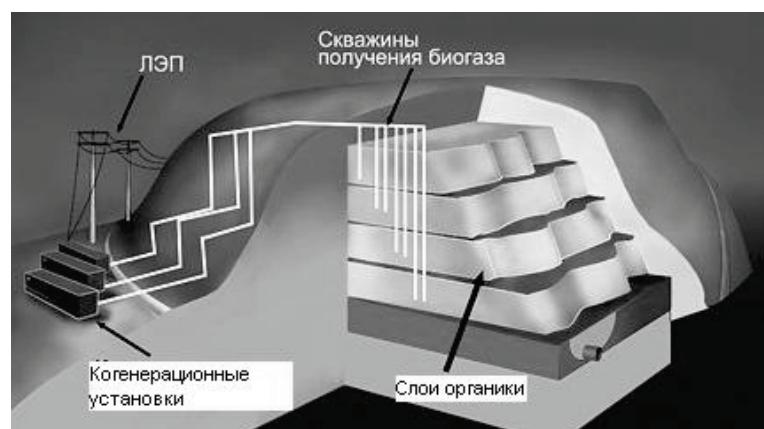


Рис. 4. Модель почвенного бурта для применения биогазовермитехнологии



В качестве субстрата для заполнения бурта предлагаем использовать легкоразлагаемую органическую фракцию отходов. Разложение этих отходов завершается в течение 2-4 лет, что вполне удовлетворяет времени хранения грунта, а также способствует ускорению процесса образования биогаза. Как легкоразлагаемые органические отходы можно использовать древесные и волокнистые материалы, такие как кора, опилки, стружка, сено, листва, солома, пищевые отходы и т.п.

Для дегазации предпочтительнее создать сеть горизонтальных коллекторов. Горизонтальные системы для сбора биогаза должны быть размещены в поверхностных слоях на глубине 2-4 м. Трубопровод лучше всего изготавливать из полиэтилена высокой плотности. Минимальный диаметр используемых труб составляет 100 мм. При заглубленном расположении трубы закладываются в вырытые в слое субстрата траншеи глубиной не менее 900 мм и обсыпаются гравием или песком слоем до 500 мм. Затем траншея вновь закладываются слоем субстрата. Минимальный наклон горизонтальных трубопроводов составляет 4 угловых градуса в пределах участка бурта, и 1 градус за его пределами.

В унифицированном виде принципиальная схема сбора и использования биогаза при таком подходе представлена на рисунке 5:

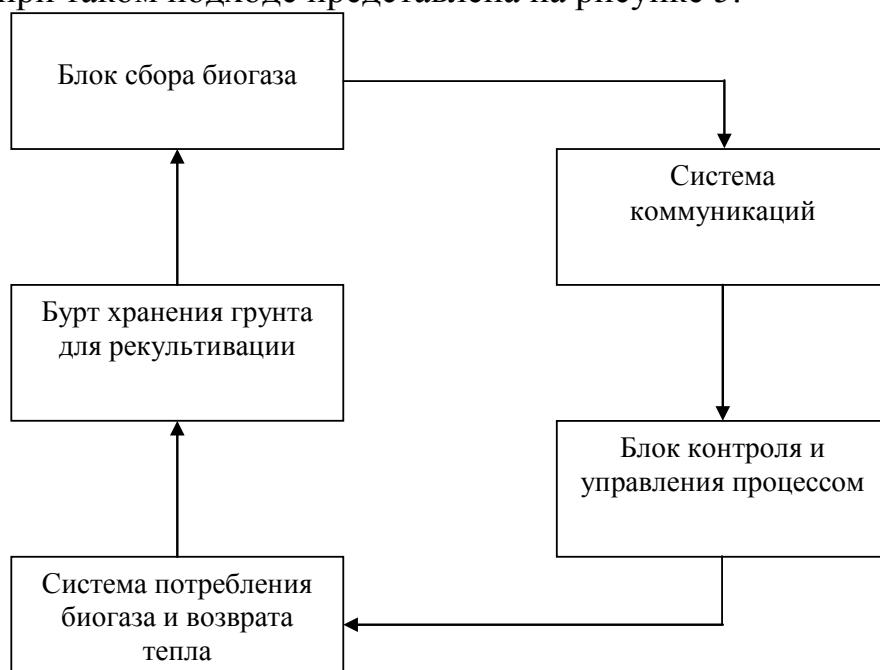


Рис. 5. Предлагаемая схема сбора и использования биогаза

В качестве перспективного варианта, особенно в условиях Санкт-Петербурга и Ленинградской области, является применение различных видов ТБО в качестве органического слоя в бурте. Существенная часть фракций ТБО повсеместно представлена различными органическими материалами. Основными группами среди них являются пищевые остатки, бумага и древесные отходы. В среднем доля органических фракций ТБО составляет около 65%. Удельная теплота сгорания их составляет 1480 ккал/кг. На территории России ежегодно образуется более 130 млн. м³ (или 26 млн. тонн) твёрдых бытовых отходов, из них перерабатываются промышленными



методами только 3,5%, а остальные вывозятся на полигоны и свалки, часто несанкционированные. Используя формулу для расчёта энергетического потенциала [1]:

$$\mathcal{E.P.} = \frac{q \times m}{q_{y.m.}} \quad (1)$$

где $\mathcal{E.P.}$ - энергетический потенциал;

q - удельная теплота сгорания топлива;

m - масса топлива;

$q_{y.m.}$ - удельная теплота сгорания условного топлива (каменный уголь с $q = 7000$ ккал/кг)

получим, что энергетический потенциал органических фракций ТБО составляет 3573142 тонн условного топлива.

Энергетический потенциал органической фракции ТБО, при переработке в автономном биоэнергетическом модуле (БИОЭН-1), являющегося прототипом используемого модуля при биогазвермитехнологии определяется по формуле 2:

$$\mathcal{E.P.} = [(m + 0,85 \times m) \times 80 \text{кВт} \cdot \text{ч}] - 0,3[(m + 0,85 \times m) \times 80 \text{кВт} \cdot \text{ч}] \quad (2)$$

Ежегодно в Санкт-Петербурге накапливается до 5800 тыс. м³ бытовых отходов, их энергетический потенциал, рассчитанный по выше указанной формуле, составляет примерно 159420 тонны условного топлива.

Особенно эффективным этот вариант является при использовании органических отходов животноводческих комплексов. Так, из навоза одной коровы можно получить в сутки до 4,2 м³ биогаза. Энергия, заключенная в одном м³ биогаза, эквивалентна энергии 0,6 м³ природного горючего газа, 0,74 л нефти, 0,65 л дизельного топлива, 0,48 л бензина. При применении биогаза экономятся также мазут, уголь, электроэнергия и другие энергоносители. Внедрение биогазовых установок улучшает экологическую обстановку на животноводческих фермах, птицефабриках и на прилегающих территориях, предотвращаются вредные воздействия на окружающую среду.

В таблице 7 приведены суммарные сведения о поголовье сельскохозяйственных животных в Санкт-Петербурге и Ленинградской области [5]:

Таблица 7

Поголовье сельскохозяйственных животных в хозяйствах г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области всех категорий
(на 1 июля 2015 года; голов)

Сельскохозяйственные животные	Хозяйства всех категорий
Крупный рогатый скот	3312700
Лошади	63220
Свиньи	2816200
Козы	227370
Овцы	329500
Птица	55621760



При переводе этих данных на цифры по Санкт-Петербургу и Ленинградской области можно получить показатели, приведенные в таблице 8.

Таблица 8
Показатель количества отходов животноводства в хозяйствах Санкт-Петербурга и Ленинградской области (т/сут)

Сельскохозяйственные животные	Хозяйства всех категорий
Крупный рогатый скот	96730,84
Лошади	935,66
Свиньи	21403,12
Козы	1182,32
Овцы	1713,4
Птица	13905,44

Выход биогаза обычно подсчитывается в литрах или кубических метрах на килограмм, сухого вещества, содержащегося в навозе. В таблице 9 показаны значения выхода биогаза на килограмм сухого вещества для разных видов сырья после 10-20 дней ферментации.

Таблица 9
Выход биогаза и содержание в нем метана при использовании разных типов сырья

Тип сырья	Выход газа (м ³ на килограмм сухого вещества)	Содержание метана (%)
Навоз КРС	0,250-0,340	65
Свиной навоз	0,340-0,580	65-70
Птичий помет	0,310-0,620	60
Конский навоз	0,200-0,300	56-60
Овечий навоз	0,300-0,620	70
Сточные воды, фекалии	0,310-0,740	70

Исходя из имеющейся информации, на основе были выполнены расчеты потенциального выхода биогаза из сельскохозяйственных отходов, образующихся на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области – результаты приведены в таблице 10:

Таблица 10
Потенциальный выход биогаза из сельскохозяйственных отходов, образующихся на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области

Тип отходов	Количество отходов (т/сут.)	Выход биогаза (м ³ /кг)
Навоз КРС	9673,084	2418271
Свиной навоз	2140,312	727706,08
Птичий помет	1390,544	431068,64



Конский навоз	93,566	18713,2
Овечий навоз	171,34	51402
Козий навоз	118,232	35469,6
Всего	13587,078	3682630,52

Выводы

В представленной работе представлен вариант повышения энергетического потенциала региона и снижения экологической нагрузки за счет применения вторичных ресурсов (на примере органических отходов).

Достигнуты следующие основные результаты:

1) проанализированы возможности применения биогазвермитехнологии в условиях Санкт-Петербурга и Ленинградской области;

2) рассчитан предполагаемый экономический эффект от внедрения инновационной биогазовой установки как для Санкт-Петербурга, так и для Ленинградской области;

3) спроектирована схема установки для получения биогаза из органического слоя для получения дешевой тепловой энергии при вермитехнологической рекультивации карьеров строительных материалов.



ГЛАВА 7. О ВЛИЯНИИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ТРАНСФОРМАЦИИ МИКРОДЕФЕКТОВ В МОНОКРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ

Введение

Современный уровень развития микро- и наноэлектроники предъявляет высокие требования к качеству монокристаллического кремния, используемого в качестве основного материала электронной промышленности. На сегодняшний день накоплен обширный экспериментальный материал о природе, структуре и поведении микродефектов в монокристаллах кремния. Впервые микродефекты были проанализированы и классифицированы в работе [1]. На основе результатов металлографического и рентгеновского анализа были введены понятия о двух типах микродефектов в зависимости от их размеров и концентрации. А-микродефекты имеют более крупные ямки травления и меньшую концентрацию (10^6 см^{-3}), а В-микродефекты имеют более мелкие ямки травления, но более высокую концентрацию (10^7 см^{-3}). Дальнейшие исследования дефектной структуры монокристаллов кремния, выращенных в режиме повышенных скоростей (более 5 мм/мин) показали, что в них присутствуют микродефекты С- и D-типа с еще более мелкими ямками травления в концентрации 10^{10} - 10^{11} см^{-3} [2]. Позднее было определено, что С-микродефекты представляют собой форму распределения D-микродефектов, связанную с резким изменением тепловых условий роста кристаллов кремния [3]. По мере появления дополнительных данных о природе микродефектов изменялась и их классификация.

7.1. Современная классификация микродефектов в монокристаллическом кремнии

В соответствии с общепринятой в настоящее время классификацией микродефекты подразделяются на дефекты **A**-, **B**- и **D**-типа. Микродефекты **A**- и **B**-типа образуются при сравнительно низких скоростях выращивания (≤ 3 – 4 мм/мин), дефекты **D**-типа – при высоких (≥ 5 мм/мин).

На сегодняшний день многочисленными экспериментами установлено, что микродефекты **A**-типа являются дислокационными петлями внедренного типа [4-6], расположены в плоскостях {110} и {111} и, как правило, сильно декорированные атомами остаточных примесей [6]. Размер петель зависит от скорости роста кристалла. Так, при $V=1$ мм/мин дислокационные петли имеют размеры до 20 мкм, а с увеличением скорости до 3 мм/мин их размер уменьшается до 1–4 мкм [6]. **A**-микродефекты могут генерировать дислокации.

В работе [6] впервые показано, что микродефекты **B**-типа также являются дефектами внедрения с размерами 15–45 нм и концентрацией $\sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Они имеют ромбовидную или квадратную форму со сторонами по направлениям [110] и [100], и лежат в основном в плоскости {100}. Эти микродефекты являются преципитатами (выделениями), состоящими из собственных межузельных атомов кремния и атомов примесей кислорода и углерода.

Микродефекты **D**-типа – дефекты внедрённого типа с размерами 5–60 нм.



Эти микродефекты являются скоплениями частиц SiO_2 и образуются при скорости выращивания $3-5 \text{ мм/мин}$ [7]. Микродефекты **D'**-типа самые мелкие микродефекты с размерами $3,5 \text{ нм}$ [7]. Это микропреципитаты, образующиеся в результате взаимодействия вакансий и атомов остаточного кислорода с образованием кристаллической и аморфной фаз типа SiO_2 . Микродефекты **Dc**-типа являются зародышами микродефектов **D**-типа. Установлено, что **D**-микродефекты являются также дефектами внедренного типа; их концентрация составляет 10^{13} см^{-3} , размер $5-10 \text{ нм}$ [7].

Образование микродефектов связано с диффузией точечных дефектов и примесей и, следовательно, определяется температурой и временем пребывания монокристалла при данной температуре. С этим связано многообразие размеров и характера распределения микродефектов в монокристаллах даже имеющих одинаковый состав примесей, но выращенных в различных тепловых условиях.

Исследование влияния различных внешних воздействий на структурное совершенство выращенных кристаллов кремния, анализ причин и механизмов трансформации дефектов кристаллической структуры в перспективе могут дать возможность управлять структурой и свойствами исходных монокристаллов кремния на любом этапе промышленного производства.

7.2. Влияние тепловых условий выращивания монокристаллов

Исследование процессов дефектообразования в монокристаллах кремния с помощью электронной микроскопии позволило авторам работ [8-9] установить, что образование **A** и **B**-микродефектов усиливается примесью углерода и замедляется примесью кислорода, образование же **D**-микродефектов подавляется примесью углерода, а при легировании кислородом их распределение становится полосчатым. Экспериментально подтверждено, что образование **A**- и **B**-микродефектов в бездислокационных монокристаллах кремния связано с наличием градиента температуры в растущем монокристалле и повышенной концентрацией примеси, а области распределения **D**-микродефектов характеризуются пониженной концентрацией примеси [10]. Следствием осаждения примесей на микродефектах является возрастание их электрической активности [7].

В работе [11] разработана математическая модель, связывающая распределение плотности микродефектов и равномерность распределения кислорода вдоль длины выращиваемого монокристалла с температурой расплава, скоростью выращивания, осевым температурным градиентом. Уравнение, описывающее плотность микродефектов в монокристаллах кремния в процессе выращивания с учетом влияния величины относительного осевого температурного градиента **A** и относительной скорости выращивания **B**, имеет следующий вид [11]:

$$N = 142,34 - 149,79A - 1,8352B + 167,956A^2 + 42,0817B^2. \quad (1)$$

Решение данного уравнения показало, что существенное влияние на распределение плотности микродефектов оказывает осевой температурный градиент. Использование такой модели позволяет определять требуемые значения скорости выращивания и осевого температурного градиента уже на



начальной стадии технологического процесса выращивания монокристаллов кремния большого диаметра. Проведенные в работе [11] исследования влияния тепловых условий ростовой установки на распределение плотности микродефектов в монокристаллах кремния позволили определить диапазон значений осевого температурного градиента в пределах от 50 до 93 К/см и скорости выращивания V в пределах от 0,33 до 0,8 мм/мин, обеспечивающие получение монокристаллов кремния с неравномерностью распределения плотности микродефектов по длине монокристалла, не превышающей 8 дефектов на см^2 .

Влияние температурных условий выращивания на процессы дефектообразования в монокристаллах кремния было экспериментально изучено в работе [7]. Для определения температуры образования различных типов микродефектов автором были проведены эксперименты по выращиванию монокристаллов при различных скоростях с фиксацией начальных стадий образования микродефектов путем закалки. Закалка проводилась методом декантации расплавленной зоны.

Проведенный расчет температурных полей в растущем кристалле кремния позволил установить взаимосвязь между скоростью растущего монокристалла, осевым температурным градиентом и скоростью охлаждения слитка:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{dT}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} \quad (2)$$

Результаты расчета зависимости скорости охлаждения слитка от осевого температурного градиента для различных скоростей роста монокристалла приведены на рис.1. Сопоставление результатов расчетов с результатами металлографических исследований позволили автору работы [7] определить температуры образования различных микродефектов в зависимости от тепловых условий выращивания монокристалла кремния (табл.1).

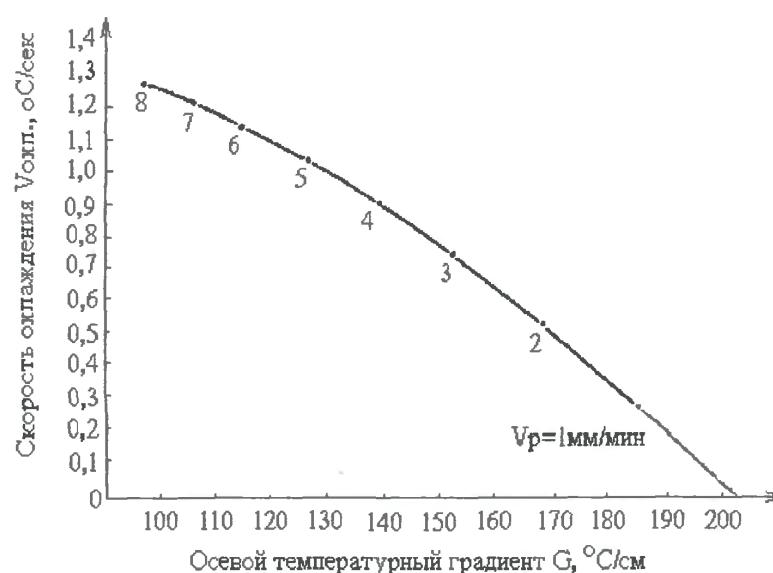


Рис.1. Зависимость скорости охлаждения слитка от осевого температурного градиента для различных скоростей роста монокристалла [7]



Как известно, свирл-дефекты являются наиболее крупными дефектами и представляют собой скопления микродефектов А и В типа в виде спиралевидных полос в поперечном сечении монокристалла [10]. Исследование условий охлаждения монокристаллов различных диаметров, выращенных без подогрева, показало, что монокристаллы большего диаметра при равной скорости выращивания, имеют меньший осевой градиент температуры и условия выращивания монокристаллов без свирл-дефектов обеспечиваются для них при меньшей скорости выращивания [7]. При этом для определённой величины градиента температуры в растущем монокристалле существует своя минимальная скорость выращивания, при достижении которой и превышении её создаются условия выращивания монокристаллов без свирл-дефектов.

Экспериментально установлено, что их образование связано с диффузионными процессами, т.е. для их образования необходимы время и соответствующая температура. Увеличение градиента температуры приводит к увеличению диффузионного потока и, следовательно, способствует ускорению диффузионных процессов. Поэтому, чем выше градиент температуры, тем выше необходимая скорость охлаждения монокристалла, при которой сокращается время на протекание диффузионных процессов для образования свирл-дефектов. Следовательно, снижение градиента температуры приводит к возможности выращивания монокристаллов без свирл-дефектов при меньшей скорости выращивания монокристаллов.

Таблица 1
Рассчитанные значения температур образования микродефектов различного типа [7]

Скорость роста V_p , мм/мин	Условия выращивания	Тип микродефектов	Расстояние от фронта кристаллизации, мм	Температура образования, $^{\circ}\text{C}$
2	Закалка	A,B	23	$T_A=1100$
3	Закалка	A,B	25	$T_B=1380$
5	Закалка	D	26	$T_D=1150$
6	остановка 60 мин	D	27	$T_D=1150$
6	остановка 30 мин +закалка	D	26	$T_D=1150$

Модель, предложенная в работе [7], хорошо зарекомендовала себя в промышленной технологии выращивания бездефектного монокристаллического кремния, в настоящий момент проблема устранения свирл – дефектов на производстве полностью решена.

7.3. Влияние радиационной обработки монокристаллов

Процессы образования радиационных дефектов в полупроводниках рассматривались во многих работах, их обзор приведен в монографии [12]. Экспериментальные исследования взаимодействия радиационных дефектов с



конкретными видами микродефектов были проведены в работе [7]. Монокристаллы кремния, легированные фосфором ($1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$), с различными видами микродефектов облучались потоком электронов с энергией 3,5 МэВ и интегральным потоком $5 \cdot 10^{14} - 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при температуре не более 60°C. Была обнаружена различная рекомбинационная активность микродефектов А- и D-типа, а также их различное поведение с точки зрения накопления радиационных дефектов в результате электронного облучения. Микродефекты А-типа почти полностью утратили рекомбинационную активность, в то же время рекомбинационная активность D-микродефектов практически не изменилась. Схемы возможных механизмов взаимодействия радиационных дефектов с А- и D- микродефектами приведены на рис.2.

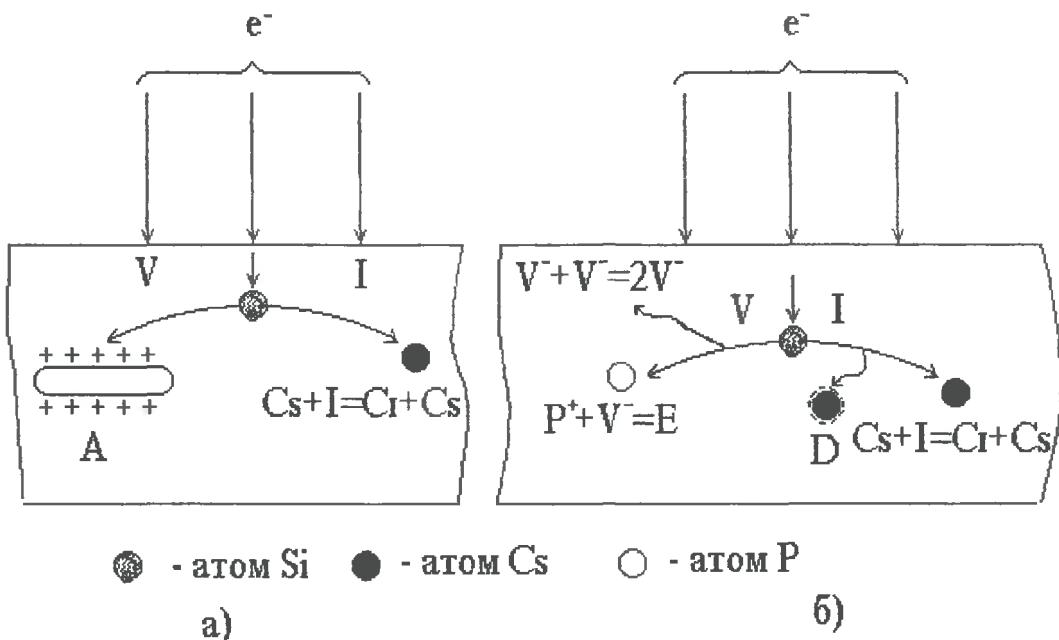


Рис.2. Механизмы взаимодействия радиационных дефектов при облучении электронами монокристаллов кремния с ростовыми А-микродефектами (а) и D- микродефектами (б) [7]

Достаточно высокая концентрация введенных облучением вакансий (V⁻) и междуузельных атомов I_{Si} (10^{14} см^{-3}) способствует нейтрализации рекомбинационного поля в окрестности А-микродефектов, оставшееся количество вакансий рекомбинирует с междуузельными атомами кремния [7]. Это происходит вследствие захвата вакансий А-микродефектами, представляющими собой дислокационные петли и создающими в кристаллической решетке деформации сжатия. Междуузельные атомы кремния I_{Si} рекомбинируют с оставшимися вакансиями V⁻, а также с атомами углерода C_s, концентрация которых в кристаллах кремния, выращенных методом бестигельной зонной плавки (БЗП) достаточно велика (10^{16} см^{-3}).

Механизм сохранения электрической активности D-микродефектами при радиационном воздействии, по мнению автора работы [7], состоит из трех составляющих:

- 1) кулоновское взаимодействие вакансий V⁻ с положительными ионами



легирующей примеси фосфора с образованием так называемых Е-центров,

2) образование дивакансий,

3) взаимодействие собственных междуузельных атомов кремния с остаточным углеродом.

Анализ результатов экспериментов, проведенных в работе [7], показал, что в зависимости от типа ростовых микродефектов в исходных монокристаллах кремния при их облучении наблюдается различная концентрация радиационных дефектов. Этот факт подтвердил предположение о различной физической природе А- и Д-микродефектов.

Методом двухкристальной рентгеновской дифрактометрии в работе [13] исследованы структурные изменения в кристаллах кремния Cz-Si до и после облучения высокоэнергетическими электронами ($E = 18$ МэВ). Исходные монокристаллы содержали высокую концентрацию кластеров и дислокационных петель. Исследована динамика изменения концентраций и размеров нескольких типов взаимосвязанных доминирующих дефектов (сферические и дископодобные кластеры, дислокационные петли) до и после облучения кристаллов.

Для интерпретации экспериментальных данных авторами [13] использована обобщенная динамическая теория дифракции рентгеновских волн в реальных кристаллах с хаотически распределенными микродефектами различных типов и нарушенным приповерхностным слоем. В работе [13] установлено, что структурные изменения в монокристаллах Cz-Si после высокоэнергетического облучения связаны с изменением размеров и концентраций доминирующих типов дефектов. Определено также, что при высоком уровне облучения монокристаллов кремния происходит уменьшение концентрации дискообразных кластеров и дислокационных петель и увеличение их размеров при росте концентрации мелких сферических кластеров.

Особый интерес вызывает одно из новых направлений технологии получения однородных по распределению фосфора монокристаллов кремния – метод нейтронного трансмутационного легирования (НТЛ), предложенный в работах [14,15] и основанный на реакции трансмутации кремния при воздействии на него тепловых нейтронов ($E_n=100$ кэВ). Для этих целей используют исследовательские атомные реакторы либо реакторы атомных электростанций, имеющие высокую плотность и достаточную однородность потока тепловых нейтронов. Важным фактором при проведении НТЛ является структурное совершенство исходного монокристалла кремния.

Исследование влияния нейтронного легирования и последующего отжига (при 850°C в течение 2 часов) на структуру монокристаллов кремния, содержащих все известные типы микродефектов, было проведено в работе [7]. Анализ электрофизических параметров монокристаллов до и после НТЛ показал, что микродефекты А- и Д-типов проявляют разную электрическую активность по отношению к радиационным дефектам, вводимым при нейтронном облучении. После НТЛ и относительно низкого температурного отжига происходит эффективный процесс дефектообразования, приводящий



даже к появлению свирл- дефектов [7].

Определяющее влияние на этот процесс оказывает присутствие в кристаллах атомов остаточных примесей углерода и кислорода. Результаты экспериментов подтвердили, что нейтронное облучение монокристаллов кремния способствует увеличению концентрации исходных микродефектов и постепенной их трансформации из одного типа в другой с участием атомов примесей.

7.4. Влияние магнитных полей

Влияние постоянного магнитного поля на структуру, механические и электрофизические параметры монокристаллического кремния были изучены в работе [16]. В качестве исходных материалов выбраны образцы монокристаллического полупроводникового кремния, выращенного по методу Чохральского (Cz-Si), нелегированные и легированные Hf, Zr, Mg, Al, в количестве от $2 \cdot 10^{-4}$ до $8,7 \cdot 10^{-2}$ % ат. Кремний подвергали обработке в постоянном магнитном поле с индукцией 0,07 Тл. Экспозиция образцов составляла 240 и 720 часов.

Анализ экспериментальных результатов выявил влияние слабого магнитного поля на структуру, механические и электрофизические свойства исследуемых полупроводниковых материалов, а именно: увеличение плотности дефектов внутреннего строения, значительное повышение микротвердости и деградацию электрофизических свойств образцов. При этом снижение электрофизических свойств исследованных образцов после выдержки в постоянном магнитном поле находится в корреляционной зависимости с изменением микроструктуры исследованных образцов.

Интересным результатом обработки монокристаллического кремния постоянным магнитным полем явилось формирование поликристаллического структуры за счет образования большого количества межзеренных границ специального типа. Дальнейшее экспонирование в постоянном магнитном поле способствовало некоторому уменьшению размеров зерен.

Авторы [16] предполагают, что формирование поликристаллической структуры образцов нелегированного кремния под воздействием постоянного магнитного поля обусловлено изменением волновых функций валентных электронов, которые в свою очередь вызывают изменения направлений, в которых реализуется ковалентная связь. Перестройка направлений ковалентной связи приводит к изменению типа кристаллической решетки кремния, то есть происходит фазовое превращение.

Вероятной причиной формирования большого количества двойников в структуре является образование в определенных объемах образца ромбической фазы кремния со сдвиговым механизмом [17]. То, что в нелегированном кремнии сдвиговые преобразования $\text{Si}_{\text{ГЦК}} \leftrightarrow \text{Si}_{\text{ромб}}$ происходят при температурах выше 350°C говорит о том, что в данном случае оно обусловлено исключительно влиянием магнитного поля.

По мнению авторов [16], все указанные выше легирующие элементы повышают критические температуры фазовых превращений в кремнии, а также



стабилизируют высокотемпературную $\text{Si}_{\text{O}_{\text{C}}\text{K}}$ фазу, тем самым исключая низкотемпературные оползнево-диффузионные фазовые превращения и формирование двойников в структуре.

Авторами работы [16] определено, что влияние постоянного магнитного поля в течение 240 или 720 часов не только нивелирует влияние легирующих элементов на энергию взаимодействия атомов кремния, но и способствует облегчению оползневого и оползнево-диффузионного фазовых превращений в кремнии. При этом средние значения микротвердости как матрицы, так и структурных дефектов повышаются в образцах нелегированного кремния и кремния, легированного магнием и гафнием. Напротив, уменьшение средних значений микротвердости матрицы и структурных составляющих наблюдается на образцах кремния, легированного алюминием и цирконием. Таким образом, в работе [16] установлено, что использование магнитного поля позволяет управлять свойствами полупроводникового кремния за счет ликвидации или торможения оползневых и оползнево-фазовых диффузионных преобразований.

7.5. Механизмы образования микродефектов

Автором [18] было высказано предположение о возможности образования микродефектов как по вакансационному, так и по междоузельному механизмам. В результате протекания диффузионных процессов и аннигиляции вакансий и междоузельных атомов, в зависимости от величины отношения скорости выращивания V и градиента температуры G в охлаждаемом монокристалле может создаваться избыточная концентрация или вакансий C_v или междоузельных атомов C_i . Если соотношение V/G меньше определенной критической величины J ($J = V/G = 3,3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/(\text{К} \cdot \text{с})$), то образуются микродефекты вакансационного типа V_i . Если соотношение V/G больше J , то образуются микродефекты междоузельного типа, проходящие последовательно следующие превращения: микродефекты **B**-типа \rightarrow микродефекты **A**-типа. В случае, если соотношение V/G равно J , то в монокристалле не должны образовываться микродефекты. Автором работы [19] были обобщены полученные результаты и предложена модель образования микродефектов, основанная на взаимодействии вакансий и междоузельных атомов с атомами кислорода и углерода.

Автором работы [7] предложен следующий механизм образования микродефектов, который учитывает как процессы рекомбинации точечных дефектов, так и взаимодействие примесей с определенным типом точечных дефектов. Согласно [18], при высокой скорости выращивания ($\geq 5 \text{ мм/мин}$) имеет место избыток вакансий в кристалле, результатом чего является ускоренный процесс комплексообразования кислородно-вакансационных ассоциатов. Так как межузельные атомы кислорода O_i очень подвижны при избытке вакансий, то комплексообразование происходит за счет ухода межузельного кислорода в замещающее положение O_s . Понижение температуры способствует процессу скопления примесных атомов, причем атомы кислорода в замещающем положении O_s играют роль центров



микропреципитатов – возникают **D'**-микродефекты. Это области по составу приближающиеся к SiO_2 .

При большой скорости выращивания (более 8 мм/мин) атомы кислорода и кремния не успевают перестроиться в кристаллическую фазу. В результате образуются **D'**-микродефекты с аморфной структурой. Это аналогично общепринятому эффекту образования аморфной фазы целого ряда веществ при сверхбольших скоростях кристаллизации. При скорости выращивания 5,6 мм/мин образуются **D'**-микродефекты с кристаллической структурой. Рост **D'**-микродефектов и переход их в **D**-микродефекты будет способствовать избыток вакансий при данных условиях роста, ибо при образовании одной молекулы SiO_2 возникает избыток объёма, равный объёму одного атома кремния. Этот избыток объёма будет скомпенсирован путем захвата вакансии границей раздела между микропреципитатом и матрицей (кремнием).

Подтверждением предлагаемого механизма, по мнению автора [7], является то, что эти дефекты являются дефектами внедренного типа. **B**-микродефекты образуются при выращивании монокристаллов со скоростью ≤ 3 мм/мин. В этом случае, согласно критерию [18], кристалл пересыщается собственными межузельными атомами кремния. При выращивании монокристаллов с такой скоростью атомы углерода, находящиеся в замещающем положении, играют роль катализатора в образовании центров преципитации, т.к. области вокруг атомов углерода являются наиболее благоприятными для расположения межузельных атомов кремния. Пересыщение по собственным межузельным атомам кремния, а также достаточно большое количество атомов углерода ($5 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) приводит к образованию комплексов, состоящих из атома углерода в замещающем положении и межузельного атома кремния ($\text{C}_s + \text{I}_{\text{Si}} \rightarrow [\text{C}_s\text{Si}]$) [7].

Кроме этого, пересыщение по межузельным атомам кремния (I_{Si}) уменьшает критический радиус $[\text{C}_s\text{Si}]$ – зародышей и ускоряет диффузию атомов углерода в замещающем положении (C_s). Более того, пересыщение по I_{Si} , ускоряя диффузию C_s , может приводить к совместной преципитации O_i (атомов кислорода в межузельном положении) и C_s (атомов углерода в замещающем положении) [20].

Таким образом, по мнению автора работы [7], процесс комплексообразования, приводящий к зарождению **B**-микродефектов, может быть описан схемой

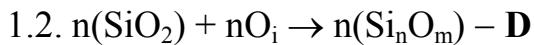


Условно можно считать, что **B**-микродефекты являются оксикарбидами кремния. Рост **B**-микродефектов будет приводить к эмиссии собственных межузельных атомов кремния I_{Si} в матрицу, и в результате становится возможным образование межузельных дислокационных петель – микродефектов **A**-типа. В свою очередь на дислокационных петлях осаждаются атомы примесей [21].

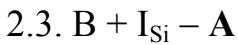
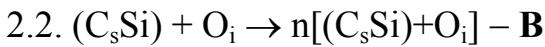
Описанный выше механизм образования микродефектов можно представить следующей схемой:



1. При избытке вакансий (V) для скорости роста ≥ 5 мм/мин



2. При избытке межузельных атомов кремния (I_{Si}) для скорости роста ≤ 3 мм/мин



При выращивании монокристаллов кремния с промежуточной скоростью (от 3 мм/мин до 5 мм/мин), когда в кристалле одновременно имеется пересыщение и вакансиями и межузельными атомами кремния, происходит сложный процесс комплексообразования на основе приведенной выше схемы (позиции 1.1; 1.2; 2.1 и 2.2). Важно при этом подчеркнуть, что присутствующие в кристалле примеси, не только участвуют в образовании микродефектов, но и являются определяющим фактором в их возникновении и развитии.

Таким образом, все типы микродефектов имеют межузельный характер и образуются в результате взаимодействия точечных дефектов с атомами кислорода, углерода и других примесей. Из этого следует, что в принципе высокосовершенные (без микродефектов A-, B- и D-типа) монокристаллы кремния можно получить путём использования сверхчистого исходного поликристаллического кремния, проведения процесса выращивания с соблюдением мер по недопущению попадания примесей в расплавленную зону (стерильность процесса), а также подавления процессов взаимодействия избыточных точечных дефектов с атомами остаточных примесей за счёт выбора оптимальных технологических параметров при выращивании монокристаллов.

Авторами работы [22] предложен механизм образования и трансформации микродефектов на основе кинетической модели роста и коалесценции преципитатов кислорода и углерода. Представлена схема единой модели процесса преципитации во время охлаждения бездислокационных монокристаллов кремния после выращивания в температурном интервале (1410-30)°С. По мнению авторов [22], такая модель преципитации совместно с кинетическими моделями образования и роста межузельных дислокационных петель и вакансационных микропор может быть представлена математическим аппаратом, который позволяет теоретически описывать процессы образования и трансформации ростовых микродефектов в бездислокационных монокристаллах кремния любого диаметра, полученных с помощью методов БЗП и Чохральского.

7.6. Влияние туннельного эффекта кристаллизации

В процессе выращивания монокристаллов кремния методом бестигельной зонной плавки была установлена возможность увеличения скорости кристаллизации за счет создания высоких градиентов температуры в области



фазового перехода. Такой прием выращивания авторы работы [23] объяснили эффектом «туннельной» кристаллизации кремния, заключающееся в том, что при высоких градиентах температуры в области фазового перехода первого рода происходит скачкообразный («туннельный») переход плотности кремния в жидкой фазе от $2,53 \text{ г}/\text{см}^3$ до $2,33 \text{ г}/\text{см}^3$ - в его переохлажденной области вблизи фронта кристаллизации, минуя максимальное ее значение при температуре, несколько превышающей температуру плавления.

При рассмотрении влияния примесей на образование структурных дефектов туннельный эффект кристаллизации оказывает положительное действие при устраниении стратовой (полосчатой) неоднородности, как элемент накопления примесей у фронта кристаллизации и последующего образования структурных дефектов [24]. При кристаллизации моноатомного слоя кремния только часть примеси из расплава (при условии равномерного распределения примеси в объеме расплава и в соответствии с коэффициентом распределения примеси) усваивается растущим кристаллом. Остальная часть примеси (не усвоенная растущим кристаллом) остается в расплаве, обогащая прифронтовую область расплава.

При кристаллизации второго слоя кремния растущим кристаллом усваивается примесь из обогащенного примесью расплава после кристаллизации первого атомного слоя и т. д. Таким образом в прифронтовой области расплава происходит пошаговое накопление примеси и образование области концентрационного переохлаждения, включая возможное увеличение концентрации примеси до критического значения – достижения условий возникновения самостоятельной второй фазы, исходя из условий образования самостоятельных соединений на основе кремния и примеси или самостоятельных фаз на основе межпримесного взаимодействия. Для устранения или значительного снижения характеристик страт, предлагается применять режимы выращивания монокристаллов при высоких значениях градиента температуры, что исключит накопление примеси у фронта кристаллизации и обеспечит однородное ее распределение по объему монокристалла. В процессе выращивания монокристалла кремния на его поверхности, контактирующей с расплавом, вследствие обрыва периодичности кристаллической решетки образуется высокая концентрация ненасыщенных межатомных связей [25]. Присоединение к атомной ступеньке на поверхности растущего кристалла не только отдельных атомов, но и их группировок с уже сформированной тетраэдрической ориентацией ковалентных связей способствует ускоренному росту кристалла без образования таких протяженных структурных дефектов, как дислокации, дефекты упаковки и двойники, но с повышенной вероятностью образования вакансий в кристаллической решетке. При охлаждении монокристалла вакансии выделяются из твердого раствора в решетке, образуя микродефекты вакансационного типа (D-микродефекты), что наблюдалось в экспериментах [26].

Выводы

По результатам выполненного исследования установлена высокая



чувствительность структурного совершенства монокристаллов кремния в зависимости от воздействия внешних источников энергии. Образование структурных дефектов при воздействии теплового поля связано с диффузионными процессами и для их образования необходимы время и соответствующая температура. При радиационной обработке монокристаллов определяющее влияние на дефектообразование оказывает присутствие в кристаллах атомов остаточных примесей углерода и кислорода. При этом нейтронное облучение монокристаллов кремния способствует увеличению концентрации исходных микродефектов и постепенной их трансформации из одного типа в другой с участием атомов примесей. Использование магнитного поля позволяет управлять свойствами полупроводникового кремния за счет ликвидации или торможения оползневых и оползнево-фазовых диффузионных преобразований. Использование эффекта туннельной кристаллизации обеспечивает устранение влияния примесного состава монокристалла и создает условие выращивания монокристаллов с равномерным распределением только вакансационных дефектов.



ГЛАВА 8. ОСОБЛИВОСТІ КАНАЛЬНОГО ТА ФІЗИЧНОГО РІВНІВ ТЕХНОЛОГІЙ МІМО ДЛЯ СТАНДАРТУ 802.11

Вступ

На сучасному етапі розвитку, для мереж сімейства стандартів 802.11x, як і для будь-яких інших, є актуальним постановка та вирішення задач діагностики та контролю їх параметрів, що потребують пошук нових рішень для підвищення їх ефективності у зв'язку із стрімким зростанням об'ємів трафіку.

Як відомо [1], при проектуванні безпровідних мереж передачі інформації, одним із головних критеріїв їх ефективності є пропускна здатність каналу, а головною структурною одиницею – безпровідний канал. На величину пропускної здатності суттєво впливає значна кількість факторів, які можуть мати як постійний характер, так і випадковий. До найбільш вагомих можна віднести: імовірність суттєвого погіршення електромагнітної сумісності із-за наявності передавачів мереж інших стандартів та випромінювань від промислових і побутових об'єктів (так звані зовнішні шуми); інтерференційні завади, що обумовлені випромінюванням інших передавачів сімейства стандартів 802.11x; архітектурні перешкоди, які значно знижують рівень сигналу та зменшують дальність впевненого прийому. Крім того, існують методи що направлені на підвищення ефективності пропускної здатності мереж і каналів які також можна поділити на групи: програмні методи оптимізації корисної інформації, що передається по каналу (стиснення, видалення надлишковості та інш. [2]); апаратні методи, що призначені для покращення параметрів каналу (OFDM, MCS, MIMO, технологія формування направленого променя та інш.[3]); методи оптимізації побудови мереж, що передбачають знаходження максимально можливої кількості необхідних параметрів та оцінок їх залежностей від особливостей безпровідного середовища передачі.

8.1. Постановка задачі

Сучасні методи побудови мультисервісних мереж, передбачають широке впровадження безпровідних систем передачі інформації, а саме високошвидкісних каналів із технологіями підвищення ефективності. Тому в даній роботі розглянемо технологію MIMO, як одну із самих швидко впроважуваних для сімейства стандартів 802.11x, яка описується канальним та фізичним рівнем.

Як було встановлено у [4] і [5], використання тільки математичних методів для оцінки та контролю параметрів трафіку є недостатнім для сучасних мереж, Тому, в такому випадку, постає необхідність постановки та вирішення задач, які безпосередньо пов'язані із впливом характеристик каналу передачі та знаходження максимально можливої кількості необхідних параметрів та оцінок їх залежностей від особливостей безпровідного середовища передачі. Але наявність додаткової технології підвищення ефективності каналу потребує її попереднього теоретичного вивчення з метою встановлення всіх можливих факторів впливу. Тому, розглядаючи технологію MIMO, яка є доступною починаючи із стандарту 802.11n, відразу можна виділити дві групи розширень



канального та фізичного рівнів [6]: просторове мультиплексування (SM – spatial multiplexing), формування вузько-направленого променя (TxBF – transmit beamforming), просторово-часове блокове кодування (STBC – space-time block coding), використання кодів із малою густиною перевірок на парність (LDPC – low density parity check), метод вибору антени (ASEL) і технологія об'єднання частотних каналів; технологія об'єднання сигналів із забезпеченням максимального відношення сигнал/шум (MRC – Maximal Ratio Combining). Ці розширення реалізуються при наявності пристрійв із множиною приймально-передавальних блоків та антен, що реалізують технологію MIMO, а також у мережах які побудовані точками доступу із технологією MIMO [6]. Все це в сукупності і приводить до підвищення ефективності безпровідних каналів.

Таким чином, теоретично технологія MIMO може значно підвищувати ефективність безпровідного каналу за рахунок покращення його характеристик та створення паралельних просторових каналів, але разом з тим значно підвищується складність програмно-апаратної реалізації, що приводить до виникнення додаткових негативних факторів у порівнянні із звичайним каналом 802.11 [7,8,9]. Саме тому постає задача дослідити механізм реалізації технології MIMO для стандарту 802.11 щоб виявити переваги та недоліки для розробки ефективних методів діагностики та контролю безпровідних каналів.

8.2. Мета та задачі дослідження

Метою даної роботи є дослідження технології MIMO для сімейства стандартів 802.11x, визначення основних параметрів та їх вплив на ефективну швидкість передачі інформації у безпровідному каналі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести дослідження фізичного рівня реалізації технології MIMO базового стандарту 802.11;
- виконати теоретичні дослідження впливу приймально-передавальної матриці MIMO на основні критерії ефективності;
- провести дослідження канального рівня та визначити додаткову керуючу інформацію, що стосується ММО технології.

8.3. Особливості MIMO у стандарті 802.11

Як відомо [1], особливістю сімейства стандартів 802.11x є залежність пропускної здатності каналу від багатьох факторів які можуть мати як постійний характер, так і випадковий. Починаючи із стандарту 802.11n існує можливість використання технології MIMO яку можна охарактеризувати як дві групи розширень канального та фізичного рівнів. Вони дозволяють встановлювати різні режими роботи точок доступу, що дає можливість створення так званих високопродуктивних каналів (HT – high throughput) із теоретичною пропускною здатністю 600 Мб/с для стандарту 802.11n, та до 6,77 Гб/с для стандарту 802.11ac [3]. Це досягається за допомогою використання змінного індекса модуляції та схеми кодування MCS (Modulation & Coding Scheme), а також технології розширення спектру, створенням каналів шириною 20 МГц, 40 МГц, 80 МГц та 160 МГц.



Основною структурною одиницею для технології MIMO є так зване радіо-коло, що визначається як сукупність одної пари приймально-передавальних блоків відповідного стандарту, включаючи змішувачі, підсилювачі та АЦП і ЦАП [6]. Це є не що інше як канал передачі інформації, для якого характерна модель радіоканалу із двома парами передавач-приймач, кожна з яких працює на одну антenu. Для такого каналу, основними параметрами будуть сумарна потужність сигналів на вході приймача радіо-коло та ефективна швидкість передачі інформації [9]. На основі цього, враховуючи модель каналу стандарту 802.11x, який підтримує MIMO, для одного радіо-коло [1] та роботу [3], структуру безпровідного каналу із технологією MIMO можна представити як показано на рис.1.

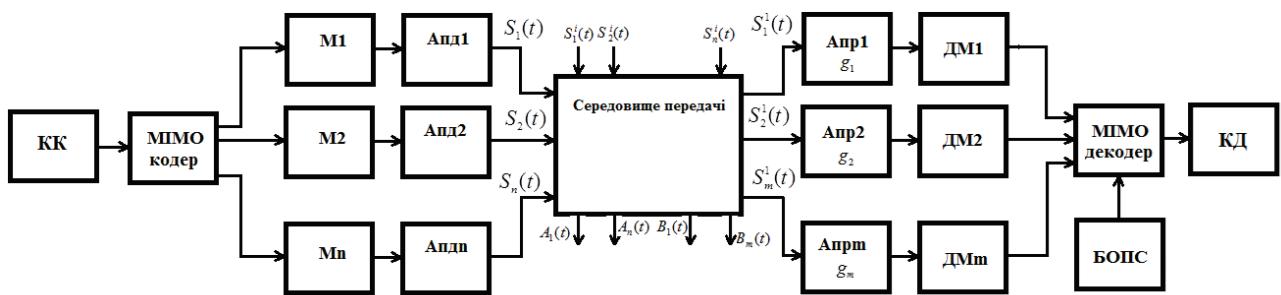


Рис. 1. Структура безпровідного каналу стандарту 802.11 з використанням технології MIMO

На підрівнях LLC, MAC та PLCP виконується завадостійке кодування канальним кодером (КК) [1]. Далі присутній блок кодера MIMO, який реалізується із використанням зворотного швидкого перетворення Фурье у якості модулятора [10]. Тут інформація перетворюється на частотні коефіцієнти, які після перетворення стають часовими інтервалами, кожен з яких відповідає одному із n передавачів. Для запобігання колізій додатково додаються захисні інтервали які мають назву циклових префіксів (CP - cyclic prefix) [11]. Відповідний інформаційний потік надходить у модулятор де за рахунок пари аналого-цифрових перетворювачів створюється реальна і уявна компоненти сигналу OFDM та перетворюється у модульований ВЧ сигнал. На виході передавальної антени ($A_{\text{пд.}n}$) n -го передавача формується сигнал $S_n(t)$ та надходить у середовище передачі. На приймальній стороні всі операції виконуються в зворотному напрямку. При надходженні сигналу $S_m^1(t)$ із середовища передачі отримуються блоки інформації від кожного приймального пристрою m ($A_{\text{пд.}m}$, $D_{\text{пд.}m}$), а в декодері MIMO виконується швидке перетворення Фур'є на основі даних із блока оцінки параметрів сигналу (БОПС), створюючи результатуючу послідовність. Як правило, у середовищі передачі існують завади природного характеру, від пристрійв систем передачі та побутових пристрій – $B_1(t) \dots B_m(t)$ та інтерференційні завади – $A_1(t) \dots A_n(t)$, які вносять інші передавачі стандартів 802.11x $S_1^i(t) \dots S_n^i(t)$ [1]. Крім того, до завад можна віднести завади які створюються множиною радіо-кіл, так як вони



працюють на одному частотному каналі і в кожній приймальній антені $A_{\text{пд.м}}$ буде наводитись сигнал від кожної передавальної антени $A_{\text{пд.п.}}$. Як показують дослідження [9,12] рівень випромінювання для кожної антени є однаковим, а сумарна потужність не перевищує 100 мВт.

8.4. Математична модель МІМО каналу

Загальна математична модель для систем із застосуванням технології МІМО визначається із загальної моделі безпровідного каналу [13], що є найменшою структурною одиницею – просторовий канал передачі інформації або радіо коло [6]. Таким чином, враховуючи [1] і структуру на рис. 1, таку модель можна записати як рівень сигналу на вході піймача:

$$S_m(t) = \sqrt{S/N} \cdot a(t) \cdot S_n(t) + A_n(t) + B_m(t),$$

де $a(t)$ – коефіцієнт який враховує послаблення та завмирання передавального сигналу.

Оскільки, технологія МІМО передбачає наявність множини приймальних антен та множини передавальних антен і відповідних їм радіо кіл, то в такому випадку кожна приймальна антена буде отримувати сигнал від кожної передавальної антени, створюючи при цьому комплексний сигнал на вході приймача. Найпростіший варіант передбачає вибір приймачем найкращого сигналу із множини сигналів на приймальних антенах. Тоді для кожного радіо кола існує дія інтерференційних та шумових завад та існує свій коефіцієнт затухання $a_i(t)$ [14]. Таким чином, для масиву приймально передавальних антен можна записати так:

$$\begin{bmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \\ S_m(t) \end{bmatrix} = \sqrt{S/N} \cdot \begin{bmatrix} a_1(t) \\ a_2(t) \\ a_i(t) \end{bmatrix} \cdot S_n(t) + \begin{bmatrix} A_1(t) + B_1(t) \\ A_2(t) + B_2(t) \\ A_n(t) + B_m(t) \end{bmatrix}$$

Сама по собі така система дає змогу покращувати ефективність безпровідного каналу та отримала назву технології об'єднання сигналів із забезпеченням максимального відношення сигнал/шум (MRC – Maximal Ratio Combining). При цьому всі прийняті сигнали на всі доступні антени, якщо вони прийняті один до одного у фазі, об'єднуються в один комбінований, який має вищий рівень ніж при наявності одного передавача [15]. В результаті цього, буде виконуватись нерівність:

$$S_{MRC}(t) = \sqrt{\frac{S}{N}} \cdot (|a_1(t)|^2 + |a_2(t)|^2 + |a_i(t)|^2) \cdot S_n(t) + \begin{bmatrix} a_1^i(t) \\ a_2^i(t) \\ a_i^i(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1(t) + B_1(t) \\ A_2(t) + B_2(t) \\ A_n(t) + B_m(t) \end{bmatrix}$$

де $a_i^i(t)$ – коефіцієнт який враховує послаблення та завмирання передавального сигналу для інтерференційного кола матриці МІМО.

При використанні МІМО системи для створення незалежних безпровідних



каналів, наприклад від точки доступу до різних абонентів із індивідуальними радіоколами в такому випадку використовується просторове мультиплексування (SM – spatial multiplexing) [16]. В такому випадку загальний потік інформації збільшується за рахунок збільшення кількості незалежних каналів передачі, яке обмежується максимально можливим числом радіокол. В такому випадку вся система описується як $n \times m$ (див рис. 1). Враховуючи максимально можливий рівень випромінювання сигналу передавача для стандарту 802.11, потужність для кожної передавальної антени буде поділятись на кількість передавачів, щоб сумарне значення не перевищувало граничні норми (як правило 100мВт). Таким чином, для такого режиму роботи математична модель каналу запишеться так:

$$\begin{bmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \\ \vdots \\ S_n(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{S}{Nm}} \cdot \begin{bmatrix} a_{11}(t) \dots a_{1n}(t) \\ a_{21}(t) \dots a_{2n}(t) \\ \vdots \\ a_{m1}(t) \dots a_{mn}(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \\ \vdots \\ S_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_1(t) + B_1(t) \\ A_2(t) + B_2(t) \\ \vdots \\ A_n(t) + B_m(t) \end{bmatrix}$$

Як відомо [15], системи стандарту 802.11 для передачі інформації використовують OFDM. Тому для отримання інформації із підносійних у частотному каналі виконується операція порівняння переданого сигналу із шумоподібним сигналом який можна визначити за формулами:

$$S_u(t) = S_n(t) + \left(\sqrt{S/N} \cdot a(t) \right)^{-1} \cdot (A_n(t) + B_m(t)),$$

$$S_u^{MRC}(t) = S_n(t) + \frac{1}{\sqrt{S/N} (|a_1(t)|^2 + |a_i(t)|^2)} \begin{bmatrix} a_1^i(t) \\ a_2^i(t) \\ \vdots \\ a_i^i(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1(t) + B_1(t) \\ A_2(t) + B_2(t) \\ \vdots \\ A_n(t) + B_m(t) \end{bmatrix},$$

$$S_u^{mxn}(t) = S_n + \frac{A_{mxn}}{\sqrt{S/N} (A_{mxn} A_{mxn}^T)} \begin{bmatrix} A_1(t) + B_1(t) \\ A_2(t) + B_2(t) \\ \vdots \\ A_n(t) + B_m(t) \end{bmatrix},$$

де $S_u(t)$ – шумоподібний сигнал для одного радіокола; $S_u^{MRC}(t)$ – шумоподібний сигнал для технології MRC; $S_u^{mxn}(t)$ шумоподібний сигнал просторового мультиплексування для будь-якої кількості приймальних та передавальних антен; A_{mxn} – матриця характеристик затухання $a_{mn}(t)$; A_{mxn}^T – зворотна матриця характеристик затухання $a_{mn}(t)$; S_n – матриця сигналів від передавальних антен.

Ємність каналу можна визначити за допомогою формули Шеннона [14]. Враховуючи наявне затухання у каналі для одного радіокола можна записати так:

$$C = \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} |a(t)|^2 \right),$$



А при наявності n випромінюючих антен та m приймальних антен ємність каналу складе:

$$C = \log_2 \left(\left| B_m + \frac{S}{Nm} A_{mn} A_{mn}^T \right| \right),$$

де B_m – матриця затухань сигналу приймачів MIMO.

8.5. Структура кадру канального рівня

Для роботи пристрою із технологією MIMO, починаючи із стандарту 802.11n, використовуються додаткові керуючі інформаційні поля. Вони формуються на підрівні PLCP фізичного рівня, де формується кадр PPDU шляхом додавання заголовку до кадрів MPDU [17]. Такі кадри використовуються для суміщеного режиму передачі і містять коротку та довгу синхропослідовності як для низькошвидкісного режиму, так і для високошвидкісного режиму. Але до синхропослідовності високошвидкісного режиму додатково додається інформація про створення MIMO каналу. Керуюча інформація про наявність просторово-розділених потоків передачі інформації MIMO знаходитьться у MAC заголовку та містить додаткове керуюче поле високошвидкісного режиму HT (КПНТ), яке має довжину 4 байти і структуру, як показано на рис. 2.

Кадр MPDU має наступні складові, які детально розглядались у [5] і [17]: MAC заголовок (керуюче поле (КП), поле мережного вектора розміщення (ПМВР), поле адресації (ПА), поле керування послідовністю (ПКП), поле контролю якості QoS (ПКЯ), поле КПНТ), поле даних (ПД) та поле циклічного надлишкового коду (ЦНК).

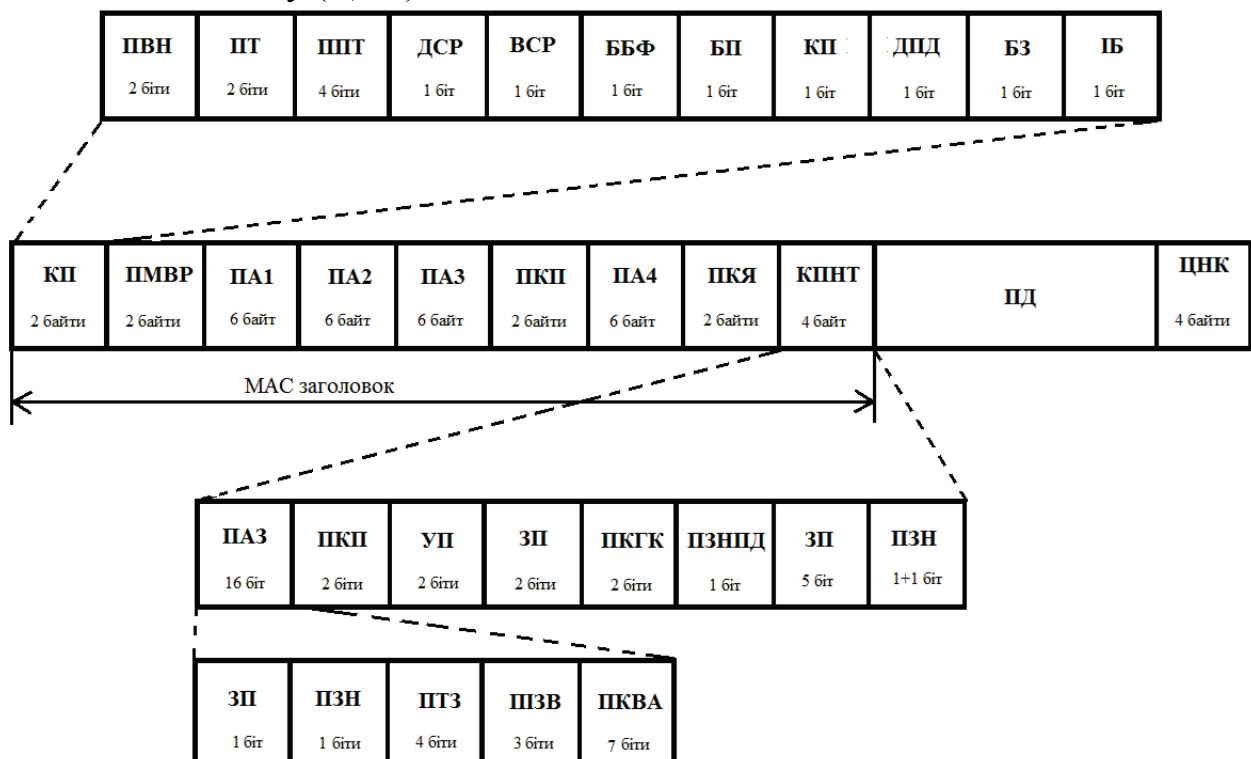


Рис. 2. Структура кадру MPDU стандарту 802.11n



Поле КПНТ містить в собі: підполе контролю адаптації з'єднання (ПАЗ), яке виконує функцію оптимального вибору параметрів каналу між приймачем і передавачем та вибір схеми кодування MCS; підполе калібрування позиції (ПКП), виконує функції узгодження передавального та приймального пристрою; узгоджуюча послідовність ідентифікаторів зондуючих пакетів (УП); зарезервоване поле (ЗП); підполе керування головного каналу (ПКГК), використовується для ідентифікації типу відповіді при використанні зондуючих кадрів PPDU; поле задання нульового пакету даних (ПЗНПД) для процедури зондування (встановлення в одиницю задає надсилення нульового пакету PPDU наступним); два підполя протоколу зворотного напрямку (ПЗН), які в свою чергу, виконують функцію підвищення ефективності передачі інформації між станціями.

Керуюче поле складається із наступних частин: підполе версії протоколу (ПВП), яке вказує на належність кадру до відповідного стандарту; підполе типу (ПТ) та підполе підтипу (ППТ), що використовуються для визначення функції кадру; біти індикації до системи розподілу (ДСР) та від системи розподілу (ВСР), які встановлюють потік кадрів між зовнішнім середовищем та системою розподілу; біт більшого фрагменту (ББФ), вказує що даний кадр містить частину повідомлення, продовження якого передається у наступному кадрі; біт повтору передачі кадру (БП); біт керування потужністю (КП), що може встановлювати енергозберігаючий режим; додаткове поле даних (ДПД), для прийняття кадру під час режиму енергозбереження; біт захисту (БЗ), для визначення наявності у кадрі шифрування; та індикаторний біт (ІБ).

В свою чергу, індикаторний біт виконує функцію вмикання режиму НТ, та показує наявність поля КПНТ у МАС заголовку. Цей біт вказує приймальній станції, що кадр повинен декодуватись із використанням високошвидкісного режиму. Саме із цього параметру визначається подальша передача даних що стосується використання технології МІМО. При встановленні ІБ в одиницю, до кадру MPDU додається інформаційне поле КПНТ, в якому підполе ПАЗ містить інформацію про початкове налаштування МІМО каналу та має наступну структуру (див. рис. 2). Перший біт є зарезервованим (ЗП). Другий біт використовується як поле для підготовки запиту (ППЗ) до приймача для передачі зондуючого кадру PPDU. В такому випадку зондуючий кадр використовується для технології формування променя з метою калібрування радіо кіл та як механізм визначення керувальної матриці МІМО. Поле типу запиту (ПТЗ) являє собою інформацію яка може встановлювати призначення останнього поля і є індикатором команд ASEL. Для використання МІМО використовується значення 14, що є ідентифікатором для використання поля керування вибором антен (ПКВА), яке містить в собі команди для методу ASEL. І накінець поле ідентифікатора зворотної відповіді (ПЗВ) показує наявність кадру підтвердження успішної передачі інформаційного кадру.

8.6. Інформаційний елемент узгодження

Для керуванням процесом передачі інформації у каналі в стандарті 802.11 використовуються керуючі кадри (Management frames) в інформаційному полі



яких містяться так звані інформаційні елементи (HT information element) для встановлення (HT capabilities element) та керування (HT operations element) високошвидкісного режиму передачі інформації [6]. Оскільки MIMO використовується для створення високошвидкісного каналу, то вся інформація про доступні апаратні можливості приймача і передавача міститься у інформаційному елементі узгодження (HT capabilities element), структура якого наведена на рис. 3.

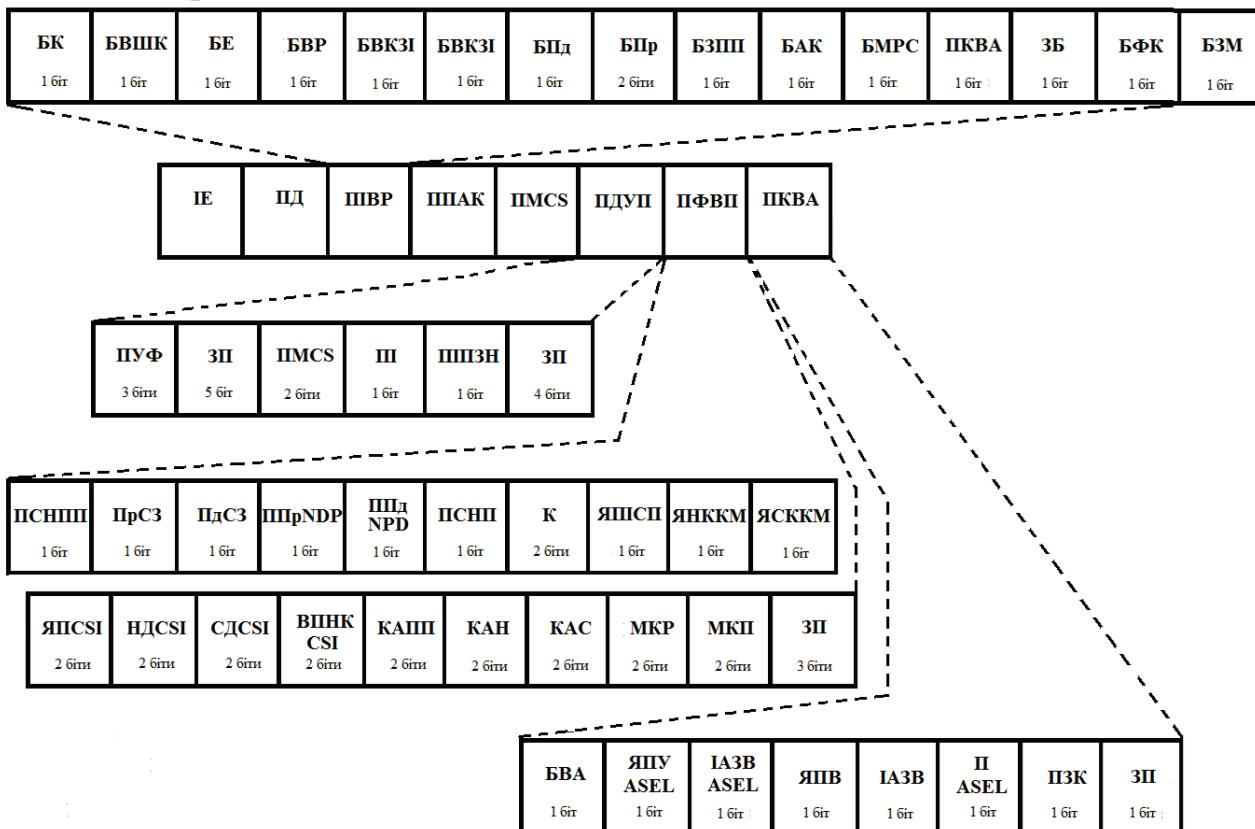


Рис. 3. Структура інформаційного елемента узгодження

Передача інформації із використанням MIMO визначається як високошвидкісний режим, тому основна керуюча інформація міститься в узгоджуючому інформаційному елементі. В загальному існує чотири типи інформаційних елементів, тип яких визначається ідентифікатором (IE), який в даному випадку встановлюється в 45, та полем довжини (ПД), яке встановлюється в 26 (довжина в байтах).

Поле яке містить інформацію про особливості роботи високошвидкісного режиму (ПIVR), має довжину два байти та показує які технології використовуються при передачі інформації [6]. Його структура являє собою керуючі біти, перший біт з яких показує готовність приймачем приймати пакети із кодуванням LDPC (БК). Далі біт вибору ширини каналу (БВШК), біт енергозбереження (БЕ), біт узгодження високопродуктивного режиму (БВР), наступні два біти встановлення короткого захисного інтервалу (БВКЗІ). Просторово-часове блокове кодування технології MIMO використовується для підвищення надійності передачі даних та вказується бітом передачі (БПд) та бітами прийому (БПр) для закодованого PPDU кадру таким методом. Вони



вказують на кількість підтримуваних просторових потоків передачі даних в каналі. Наступний біт – затримка для блокового пакету підтвердження (БЗПП), що забезпечує наявність методу оптимізації службової інформації в каналі використанням одного загального пакету підтвердження ACK для багатьох переданих кадрів в режимі однона правленої передачі [18]. Далі йде біт максимальної довжини кадрів для методу агрегації кадрів MSDU (БАК), біт узгодження методу розширення спектра стандарту 802.11g (БМРС), зарезервований біт (ЗБ), біт включення методу формування каналу ширину 40 МГц для частотного діапазону 2,4 ГГц (БФК) та біт захисного механізму для короткої синхропослідовності L-SIG (БЗМ).

Поле параметрів агрегації кадрів (ППАК) містить інформацію про метод об'єднання кадрів типу MPDU для підвищення пропускної здатності, та містить підполя даних про максимальну та мінімальну довжину агрегованого кадру.

Для встановлення та вибору можливої швидкості передачі інформації існує механізм керуванням пропускною здатністю каналу з використанням індексу модуляції та схеми кодування (MCS). Інформація про всі можливі режими MCS із врахуванням максимальної кількості підтримуваних просторових потоків MIMO знаходиться в полі PMCS довжина якого становить 16 байт.

Високошвидкісний режим передачі також має додаткові розширенні параметри узгодження які містяться у полі PDU. Воно містить 3 біти інформації про підтримку режима сумісного існування фаз (PCO – Phased Coexistence Operation) для узгодження із пристроями старих стандартів ПУФ; зарезервовані поля на 5 біт і 4 біт (ЗП); поле зворотного зв'язку MCS (PMCS) використовується для індикації готовності прийому зворотного зв'язку для схеми MCS, яка має особливість динамічної зміни та використовується із протоколом узгодження каналу у MAC заголовку кадру у полі КПНТ; поле індикації наявності поля КПНТ у MAC заголовку (ПІ); поле індикатора протокола зворотного напрямку (ППЗН).

Технологія формування вузько-направленого променя використовує поле PFBP, яке має довжину 4 байти і містить ряд дозволів. Оскільки тут використовується явні та неявні методи апроксимації фізичних процесів для оцінки характеристик MIMO каналу, тому для правильної оцінки передавач отримує зворотну відповідь від приймача, яка в залежності від типу роботи MIMO системи поділяється на два види [6]: неявний зворотній зв'язок, який оцінюється із довгої синхропослідовності прийнятого кадру PPDU від підлаштовуваного пристрою (Implicit feedback); явний зворотній зв'язок, який оцінюється із довгої синхропослідовності прийнятого кадру PPDU від формувача променя (Explicit feedback). Таким чином, сумісність пристрою із неявним методом визначається у полях: підполе сумісності неявної передачі (ПСНП), підполе сумісності неявної передачі приймача (ПСНПП).

Для явного методу використовується зворотна відповідь яка не потребує необхідності у калібруванні, але створює додаткове навантаження у приймачі. В цьому випадку формувач променя (beamformer) отримує зворотну відповідь від підлаштовуваного пристрою (beamformee). Ця відповідь може містити наступну інформацію: інформацію стану каналу, що містить інформацію про



MIMO коефіцієнти для визначення керувальної матриці формувачем (тут використовується додатковий синхрокадр CSI); нестиснену відповідь, що являє собою обчислену керуючу матрицю підлаштовуваним пристроєм та надіслану до формувача променя; стиснені дані про керуючу матрицю і надіслану до формувача. Цей нейвний метод керується через наступні поля: поле явної передачі інформації стану каналу (ЯПСК); поле явних нестиснених коефіцієнтів керувальної матриці (ЯНККМ); поле явних стиснених коефіцієнтів керувальної матриці (ЯСККМ).

Крім того, відповідь від підлаштовуваного пристрою містить інформацію про наявність команд затримок або безпосередньої посилки із-за наявності захисних інтервалів між кадрами [18]. Ця інформація міститься у полі явної передачі CSI відповіді (ЯПCSI), полі нестиснених даних CSI (НДCSI) та полі стиснених даних CSI (СДCSI) а також поле визначення підтримки мінімально можливої кількості CSI відповіді (ВПМК CSI).

Поле калібрування (K) використовується для узгодження передавача та приймача та складається із двох частин що передбачають обмін зондуючими кадрами PPDU між пристроями та отримання синхровідповіді для кадру CSI, на базі чого вираховується керувальна матриця MIMO. Структура кадру CSI наведено на рис. 4.

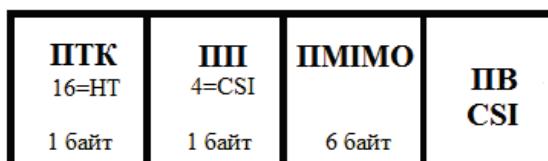


Рис. 4. Структура кадру SCI

Такий кадр, має типову побудову для керуючих кадрів складається із поля типу кадру ПТК із встановленим у 16, поля призначення ПП, яке встановлене у 4 (для кадрів типу CSI – синхрокадр), поля керування ММО та поля синхровідповіді CSI, яке має змінну довжину.

Для синхронізації використовується зондуючий кадр PPDU. Так як операція синхронізації може використовувати більше одного циклу то для цього використовується поле ПЗНПД (див рис. 2) яке встановлюється в одиницю при формуванні нульового кадру (NDP). Нульовий кадр формується на основі MSDU шляхом відсутності даних в інформаційному полі, а потім додаванням заголовку PPDU формуючи зондуючий кадр. Для керування цим використовуються поля сумісності прийому (ППрNDP) та передачі (ППдNDP). кадру NDP. Крім того, для зондування просторово розділених каналів використовується складене зондування (straggered sounding), де синхропослідовність LTF передається для кожного просторового потоку, Це керується полями сумісності передачі (ППдС3) та прийому (ПрС3) складеного зондування.

Наступні поля відповідають за керуванням масивом антен які приймають участь у формуванні направленого променя. До цього відноситься поле яке показує максимальну кількість антен формувача променя які може



підтримувати підлаштовуваний пристрій (КАПП) при наявності відповіді CSI, аналогічні поля які відповідають стисненій (КАС) або нестисненій відповіді CSI (КАН); поле максимальної кількості рядків для CSI відповіді (МКР); поле максимальної кількості просторово часових потоків (МКП) для каналу визначеним на основі прийнятого зондуочого кадру PPDU; зарезервованого поля (ЗП).

І накінець, поле керування для вибору антен ASEL (ПКВА) містить інструкції для динамічного створення необхідної кількості радіо-кіл із доступним масивом антен. Керуюча інформація для цього поля міститься у полі КПНТ кадру MSDU у підполі ПКВА (див. рис. 2). Поле КПНТ інформаційного елемента на рис. 3 має довжину 7 біт, перші три з яких містять команди ASEL, а наступні містять дані про відіслані команди. ПКВА являє собою групу бітів кожен з яких показує наявність певної функції встановленням в одиницю. В першу чергу наявність ASEL показує біт вибору антен (БВА). Якщо він встановлений в 1, після чого є доступними наступні функції: явна передача CSI відповіді за допомогою передачі ASEL узгодження (ФЯПУ ASEL); зворотна відповідь ідентифікаторів антен із підтримкою передачі ASEL узгодження (ФІАЗВ ASEL); явна передача CSI відповіді (ФЯПВ); зворотна відповідь ідентифікаторів (ФІАЗВ); прийом ASEL узгодження (П ASEL); передача зондуочого кадру PPDU (ПЗК); зарезервоване поле (ЗП).

Висновки

Отже, в даній роботі було проведено дослідження технології MIMO для безпровідного каналу стандарту 802.11. Виконуючи теоретичний аналіз канального та фізичного рівнів, визначено основні параметри, що мають вплив на якість передачі інформації.

Було запропоновано загальну структуру безпровідного каналу стандарту 802.11 із MIMO, яка враховує найбільш важомі фактори впливу на критерій ефективності. На основі проведених досліджень було встановлено:

- використання одночасно декількох антен випромінювання збільшує зону впевненого прийому сигналу, а наявність паралельних просторових каналів дозволяє збільшувати пропускну здатність потоку інформації еквівалентно їх кількості. Але в такому випадку це приводить до виникнення цілого ряду дестабілізуючих факторів таких як, наприклад, взаємні інтерференційні завади, які потребують подальших досліджень у реальних умовах;

- при використанні матриці приймально-передавальних антен існує можливість підвищувати рівень сигнал/шум за рахунок об'єднання сигналів на приймальних антенах у один комбінований, що задовільняє умові – чим вища потужність сигналу на вході приймача, та чим менша потужність сигналу від інтерференційної точки доступу, тим менше помилок та затримок буде при сеансах передачі пакетів. Крім того, така матриця дозволяє створювати незалежні радіо-кола між точкою доступу та користувачами;

для керування технологією MIMO використовується додаткова керуюча інформація яка збільшує MAC заголовок інформаційного кадру на 4 байти. Параметри режиму передачі із MIMO містяться у інформаційному елементі



узгодження для керуючих кадрів. Крім того, додатково застосовується процедура калібрування всієї антенної матриці із використанням зондуючих кадрів, що додає додаткове навантаження службової інформації на канал та вносить затримки для передачі корисної інформації.



ГЛАВА 9. АНАЛІЗ МУЛЬТИКОЛІНЕАРНОСТІ НЕЗАЛЕЖНИХ ЗМІННИХ ТА ЇЇ ВПЛИВУ НА ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ БАГАТОВИМІРНИХ ОБ'ЄКТІВ

Вступ

Підвищення вимог до ефективності технологічних процесів буріння, видобування, транспортування і зберігання нафти і газу диктує необхідність подальшого удосконалення систем автоматизованого керування. Оскільки названі процеси, як правило, відбуваються під впливом різного типу завад за умов дефіциту априорної та поточної інформації щодо параметрів об'єкта, а іноді і його структури (буріння свердловин), і самі процеси є нелінійними стохастичними, а сигнали у цих системах мають ймовірнісну природу, вирішення поставленої задачі повинно опиратися на статистичні методи обробки багатовимірних даних і часових рядів.

Застосування статистичних методів при аналізі і синтезі автоматизованих систем керування в нафтогазовій промисловості має порівняно коротку історію, але сьогодні важко назвати задачі керування, при роз'язанні яких не виникає потреба в використанні статистичного підходу. Важливу роль в статистичних задачах керування виконують оцінки математичного сподівання $M[X]$, випадкової величини X , дисперсії $\sigma_x^2(t)$ випадкового процесу $X(t)$, автокореляційної функції $R_{xx}(\tau)$ випадкового процесу $X(t)$, взаємно кореляційної функції $R_{xy}(\tau)$ випадкових процесів $X(t)$, $Y(t)$, спектральної щільності $S_{xx}(\omega)$ випадкового процесу $X(t)$, взаємної спектральної щільності потужності $S_{xy}(\omega)$ випадкових процесів $X(t)$, $Y(t)$. Випадковими процесами є також збурюючи та керуючі дії, завади вимірювань, показники на виході систем, зміни параметрів об'єктів керування в просторі і часі та ін.

Оцінювання стану таких об'єктів керування потребує достатньо повної інформації про їх моделі, а ідентифікація моделі можлива лише на основі результатів оцінювання стану. Отже, виникає «замкнене коло», подолати яке можливо лише за рахунок надлишковості отриманої первинної інформації.

Проте, використання великої кількості джерел інформації для задач автоматизованого керування, технічного моніторингу стану і діагностики несправностей не були добре вивчені.

Складний характер технологічних процесів змушує збільшувати сукупність спостережень, що приводять до істотних змін в оцінках параметрів – дисперсії та довірчого інтервалу (оцінок параметрів, обчислених за методом найменших квадратів (МНК) внаслідок їх повної або неповної мультиколінеарності (МК). Внаслідок цього важливим стає питання нейтралізації негативного впливу неповної МК, вилучення МК із моделі.

Покращити ефективність систем в напрямках підвищення точності, надійності і робастності можна шляхом застосування методу багато параметричного злиття даних і усунення бо використання МК між двома й більше змінними.



9.1. Ознаки явища мультиколінеарності та аналіз сучасних методів їх виявлення

Під мультиколінеарністю (МК) розуміють [1,2] наявність лінійних або приблизно лінійних (функціональних) зв'язків або сильної кореляції між двома, або більше незалежними факторними змінними у багатофакторній лінійній регресійній моделі, яка приводить до лінійної залежності нормальних рівнянь. Якщо такі зв'язки, тобто високий ступінь кореляції, існують, то це явище називають мультиколінеарністю.

Одним із порушень основних положень класичного лінійного регресійного аналізу, яке може мати місце тільки для багатофакторних регресійних моделей є МК. Наявність МК означає принципову неможливість інтерпретації даних спостережень методом послідовного аналізу кожного із коефіцієнтів регресії.

У практиці моделювання розрізняють повні і неповні МК.

Повною МК називається існування у багатофакторній лінійній регресійній моделі лінійної функціональної моделі між двома чи більше незалежними змінними.

Неповоною МК називають існування у багатофакторній лінійній регресійній моделі тісного кореляційного зв'язку між двома чи більше незалежними змінними (це основний вид МК).

Природа МК полягає у неможливості статистично оцінити й обґрунтувати впливожної незалежної змінної на залежну змінну моделі, що в свою чергу робить ненадійною інтерпретацію рівняння регресії. Причинами МК є одночасна зміна двох факторів досліджуваного процесу в одному напрямку, наявність тренду у зміні цих факторів, а також наявність лагу.

Наслідками МК є падіння точності оцінювання та зміщення оцінок параметрів моделі, які розраховуються за методом МНК. На основі цих оцінок неможливо зробити конкретні висновки про результати взаємозв'зку між показником і фактором. Збільшується також коваріація оцінок, а також незначущість моделі (*t*-статистика Стьюдента менша за критичну) – оцінки параметрів стають чутливими до обсягу статистичної вибірки. Стає важчим розрізняти окремо вплив кожної незалежної змінної на залежну й одночасний вплив обох цих змінних на залежну. Все це робить ненадійною інформацію оціненого рівня регресії. Тому важливо, щоб між пояснюючими змінними не було МК.

Ознаками МК є велике значення коефіцієнту детермінації поряд з незначущістю коефіцієнтів моделі, велике значення парних коефіцієнтів кореляції незалежних мінних та незначущість *t*-статистики Стьюдента. Наявність великого значення коефіцієнта кореляції $> 0,8$ і одночасно незначущість *t*-статистики є «klassичною» ознакою МК [1,2].

Зауважимо, що велике значення парних коефіцієнтів кореляції це достатня, але не необхідна умова наявності МК. МК може мати місце навіть при відносно невеликих значеннях парних коефіцієнтів кореляції у більш ніж двофакторній регресійній моделі.

Математично умову наявності МК можна записати у вигляді співвідношення



$$r_{x_i, x_j} \rightarrow 1, i \neq j; \bigcup r_{x_i, x_j} > 0,8, i \neq j, \quad (1)$$

де r_{x_i, x_j} – коефіцієнт кореляції двох випадкових процесів x_i та x_j .

Якщо $r_{x_i, x_j} = 0, i \neq j$, тоді МК відсутня. Якщо значення хоча б одного коефіцієнта кореляції у сукупності параметрів, що спостерігаються $r_{x_i, x_j} > 0,8$, то МК є серйозною проблемою.

Наявність МК створює певні проблеми при розробці моделей. Насамперед, визначник матриці спостережень $|X^T X|$ наближається до нуля і оператор оцінювання за звичайним МНК стає надзвичайно чутливим до похибок вимірювань і похибок обчислень. При цьому МНК-оцінки можуть мати значне зміщення відносно діючих оцінок узагальненої моделі, а в деяких випадках можуть стати взагалі беззмістовними. Збільшуються також дисперсії та коваріації оцінок параметрів, обчислених за методом МНК, довірчий інтервал (оскільки збільшується середній квадрат відхилення параметрів), зменшується t -статистика Стьюдента, $t \rightarrow 0$.

Наявність МК спотворює дійсні залежності між змінними моделі. Оцінки параметрів стають чутливими до розміру статистичної вибірки. Збільшення сукупності спостережень внаслідок цього іноді може провести до істотних змін в оцінках параметрів. Внаслідок цього важливим стає питання виявлення МК у моделі і вилучення її. З огляду на перелічені наслідки МК при побудові моделі треба мати інформацію про її існування чи відсутність.

Аналізування літературних джерел [1,2,3 та ін.] показало, що на даний момент не існує єдиного універсального методу виявлення МК, тому на практиці використовують декілька методів і підходів, які:

- основані на деяких зовнішніх ознаках, що дозволяють тільки встановити наявність МК;
- ґрунтуються на спеціальних статистичних тестах.

9.2. Критерії та алгоритми, що застосовуються для виявлення МК

Основні методи виявлення МК наступні [1,2,3 та ін.]:

• побудова регресійної залежності кожного фактора x_i з усіма іншими факторами – спосіб визначення щільності регресійного зв’язку. Тому цей тест має назву: побудова допоміжної регресії. Обчислення відповідного коефіцієнта детермінації для цього допоміжного регресійного рівняння та його перевірка за допомогою F -критерію Фішера дають змогу виявити лінійні зв’язки між незалежними змінними;

• тест, що застосовує характеристичні значення (власні числа матриці спостережень) та умовне число R (обчислюється як відношення максимального власного числа матриці до її мінімального власного числа), використовується в сучасних статистичних пакетах. За цим тестом розраховується не тільки умовне число R , але й умовний індекс $CI = \sqrt{R}$. Якщо $100 \leq R \leq 1000$, тоді МК «помірна», якщо $R > 1000$ – «висока». Аналогічно, якщо $10 \leq CI \leq 33$, то МК «помірна», якщо $CI > 33$ – «висока».

Жоден із них не є універсальним. Вони мають один спільний недолік –



жоден з них не проводить чіткої межі між тим, що треба вважати «суттєвою» МК, яку необхідно враховувати і тим, коли нею можна знектувати.

Найповніше дослідити МК дає змогу алгоритм Фаррара-Глобера [1], який застосовує три види статистичних критеріїв для виявлення МК (рис. 1) та належить до другої групи методів виявлення МК.



Рис. 1. Види статистичних критеріїв, що застосовуються для виявлення мультиколінеарності незалежних змінних

Порівнявши ці критерії з їх критичними значеннями, можна зробити конкретні висновки щодо наявності чи відсутності МК незалежних змінних, користуючись таким правилом:

$$\begin{aligned}
 R : & IF \left(r_{x_i, x_j} \rightarrow 1, i \neq j; \bigcup r_{x_i, x_j} > 0,8, i \neq j \right) \cap \\
 & \cap \chi^2 > \chi^2_{\text{табл}} \cap F_{K_i} > F_{K_{\text{табл}}} \cap R_K^2 \rightarrow \max \cap \\
 & \cap \left(t_{K_j} > t_{\text{табл}} \cup t \rightarrow 0 \right) \text{THEN має місце високаоколінеарна пара,}
 \end{aligned} \tag{2}$$

де χ^2 – критерій Пірсона χ^2 ;

F_K – F -критерій Фішера;

K – K -та незалежна змінна;

$R_K^2 = 1 - \frac{1}{C_{KK}}$ – коефіцієнт детермінації для кожної змінної;

C_{KK} – діагональний елемент матриці C , яка є оберненою до кореляційної матриці r ;

t_{K_j} – t -критерій Стюдента.

Алгоритм виявлення ознак МК спостережень незалежних змінних наведено на рис. 2.

9.3. Аналіз мультиколінеарності показників процесу буріння нафтових і газових свердловин електробурами

Аналіз МК показників процесу буріння нафтових і газових свердловин електробурами є актуальною науково-прикладною задачею [4÷8].

Найповніше дослідити наявності мультиколінеарності між змінними можна за допомогою алгоритму Фаррара-Глобера [9]. Для виявлення МК взято масив експериментальних даних, отриманих при бурінні свердловини №814



Рис. 2. Алгоритм виявлення ознак МК спостережень незалежних змінних

Прикарпатського УБР (Долото ЗУ 295 СЗГ, інтервал буріння 2080-2089 м). До



масиву входять наступні параметри: осьове зусилля F на долото, струм I , який споживається двигуном електробура Е240/8, та потужність N . Дані наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Масив експериментальних значень

№	Осьове зусилля F , кН	Струм I , А	Потужність N , кВт
1	105,600	142,200	232,300
2	105,350	128,000	233,600
3	105,840	147,400	233,700
4	107,160	144,000	237,900
5	104,615	140,600	231,800
6	104,615	141,000	233,900
7	106,820	142,100	232,700
8	104,860	144,800	231,500
9	105,250	137,500	230,100
10	109,510	134,100	231,500
...
114	96,560	150,600	239,100
115	98,240	150,000	237,800
116	99,080	155,600	238,100
117	99,920	151,700	238,400

Таблиця 2

Проміжні розрахунки

№	X_1	X_2	$(X_{1i} - X_{1cp})^2$	$(X_{2i} - X_{2cp})^2$
1	142,200	232,300	0,1580	5,2019
2	142,100	232,700	213,0851	0,9619
3	139,300	235,700	23,0646	0,7758
4	139,300	230,200	1,9672	11,0173
5	140,700	239,400	3,9898	7,7327
6	139,100	230,700	2,5518	0,4634
7	134,500	232,800	0,2474	3,5373
8	134,600	234,000	4,8513	9,4911
9	136,200	234,300	25,9839	20,0773
10	143,800	234,900	72,2064	9,4911
...
114	150,600	239,100	64,0410	20,4234
115	150,000	237,800	54,7980	10,3634
116	155,600	238,100	169,0667	12,3850
117	151,700	238,400	82,8567	14,5865
Усього	16683,9	27445,95	5 182,2692	670,0292



Перевіримо наявність мультиколінеарності між струмом I , який споживає двигун електробура та потужністю N . Всі розрахунки проводимо в програмі MSEExcel, замінивши позначення $I \rightarrow X_1$, $N \rightarrow X_2$.

Здійснимо проміжні розрахунки та занесемо дані в табл. 2 та табл. 3.

Таблиця 3

Проміжні розрахунки (продовження)

Показник	X_1	X_2
Середнє значення	142,5974	234,5808
Стандартне відхилення	6,6839	2,4034

Нормалізуємо змінні X_1 та X_2 за допомогою функції «STANDARDIZE» в MSEExcel. Транспонуємо матрицю X^* в матрицю X^{*1} за допомогою функції «TRANSPOSE».

Перемножимо матриці X^{*1} та X^* за допомогою функції «MMULT» та отримаємо:

$$X^{*1} X^* = \begin{matrix} 116,0000 & 0,4803 \\ 0,4803 & 116,0000 \end{matrix}$$

Знаходимо кореляційну матрицю r . Для цього потрібно кожний елемент матриці $X^{*1} X^*$ помножити на $\frac{1}{116} \left(\frac{1}{n-1} = \frac{1}{117-1} = \frac{1}{116} \right)$.

$$r = \begin{matrix} 1,0000 & 0,4803 \\ 0,4803 & 1,0000 \end{matrix}$$

Після визначення кореляційної матриці r знаходимо визначник її за допомогою функції «MDETERM»:

Визначаємо значення $\det r = 0,7694$ критерія Пірсона χ^2 за формулою:

$$\chi^2 = - \left\{ n - 1 - \frac{1}{6} (2m + 5) \right\} \ln(\det r) , \quad (3)$$

де n – число спостережень;

m – число пояснювальних змінних

$$\ln(\det r) = -0,2622.$$

$$\text{Отже, } \chi^2 = - \left\{ 117 - 1 - \frac{1}{6} (2 \cdot 2 + 5) \right\} \cdot (-0,2622) = 30,0222 .$$

Порівнюємо отриманий критерій Пірсона χ^2 з табличним значенням. При ступені вільності $k = \frac{1}{2} m(m-1) = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot (2-1) = 1$ та рівні значущості $\alpha = 0,05$ критерій $\chi^2_{\text{табл.}} = 3,8$. Оскільки $\chi^2 > \chi^2_{\text{табл.}}$ ($30,0222 > 3,8$), робимо висновок, що у масиві досліджуваних змінних існує МК.

Наступним знаходимо критерій Фішера (F -критерій) за формулою:



$$F = (C_{kk} - 1) \left(\frac{n - m}{m - 1} \right), \quad (4)$$

де C_{kk} – діагональні елементи матриці C .

Визначаємо обернену матрицю C , до кореляційної матриці за допомогою функції «MINVERSE».

$$C = \begin{matrix} 1,2998 & -0,6242 \\ -0,6242 & 1,2998 \end{matrix}.$$

Використовуючи діагональні елементи матриці C , розраховуємо F-критерій:

$$F = (1,2998 - 1) \left(\frac{117 - 2}{2 - 1} \right) = 34,4759$$

Для рівня значущості $\alpha = 0,05$ і ступенів вільності $k_1 = m - 1 = 2 - 1 = 1$ і $k_2 = n - m = 117 - 2 = 115$ за статистичними таблицями F-розподілу знаходимо критичне значення критерію Фішера $F_{\text{табл}} = 3,9$. Табличне значення $F_{\text{табл}}$ порівнюємо з розрахунковим значенням. Оскільки $F > F_{\text{табл}}$ ($34,4759 > 3,9$), то це означає, що змінні X_1 та X_2 мультиколінеарні між собою.

Визначимо останній критерій з алгоритму Фаррара-Глобера – t -критерій Стьюдента, за формулою:

$$t_{12} = \frac{r_{12} \sqrt{n - m}}{\sqrt{1 - r_{12}^2}}. \quad (5)$$

Використовуючи матрицю C , обчислюємо частинний коефіцієнт кореляції за формулою:

$$r_{12} = \frac{-c_{12}}{\sqrt{c_{11}c_{22}}} \quad , \quad (4)$$

$$r_{12} = \frac{-(-0,6242)}{\sqrt{1,2998 \cdot 1,2998}} = 0,4803.$$

На основі знайденого частинного коефіцієнта кореляції знаходимо розрахункове значення t -критерію Стьюдента:

$$t_{12} = \frac{0,4803 \cdot \sqrt{117 - 2}}{\sqrt{1 - 0,4803^2}} = 5,8716.$$

Обчислений t -критерій порівнюємо з табличним значенням ($t_{\text{табл.}} = 1,66$), коли рівень значущості $\alpha = 0,05$ та ступінь вільності $k = n - m = 117 - 2 = 115$. Оскільки $t_{12} > t_{\text{табл.}}$ ($5,8716 > 1,66$), то можна стверджувати, що між змінними X_1 та X_2 за існує МК.

Отже, за алгоритмом Фаррара-Глобера виявили МК між струмом I , який споживає двигун електробура, та потужністю N .

Тепер встановимо зв'язок між параметрами процесу буріння свердловин електробурами в різні моменти часу. Здійснимо це за допомогою автокореляційної функції та функції спектральної щільності.



Для отримання автокореляційних функцій для параметрів осьового зусилля F , струму I та потужності N скористаємося програмою Mathcad. У результаті отримаємо графіки, наведені нижче (рис. 3-5).

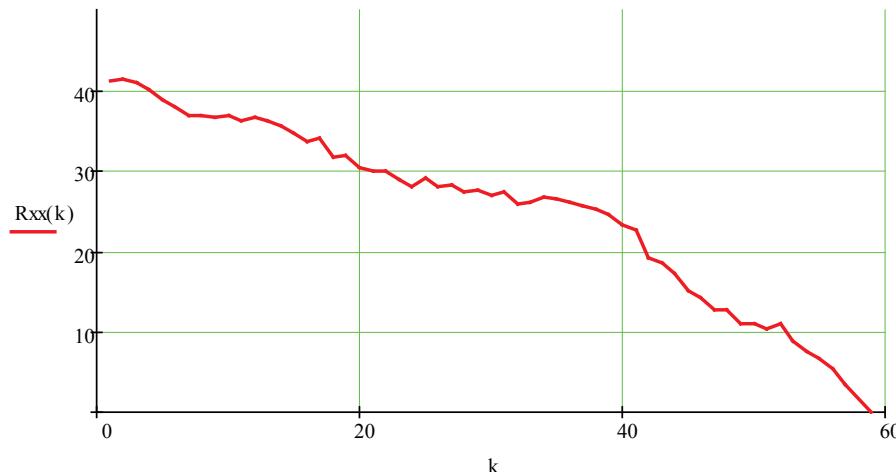


Рис. 3. Графік автокореляційної функції для осьового зусилля F

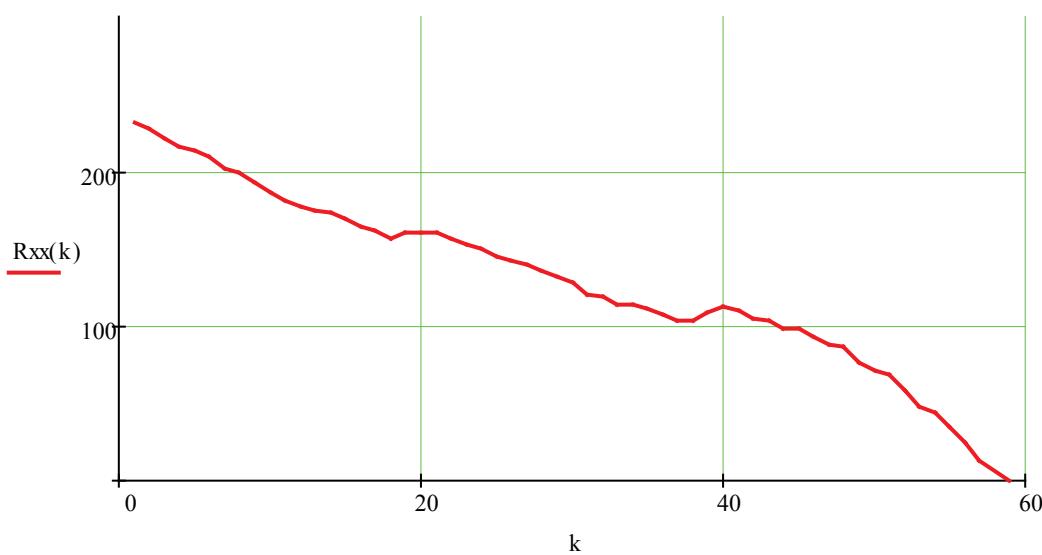
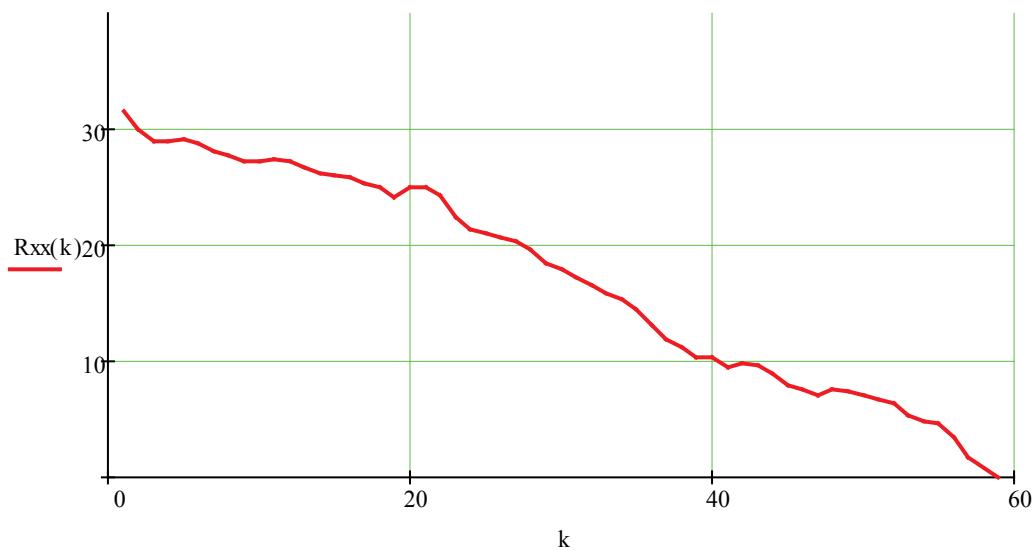
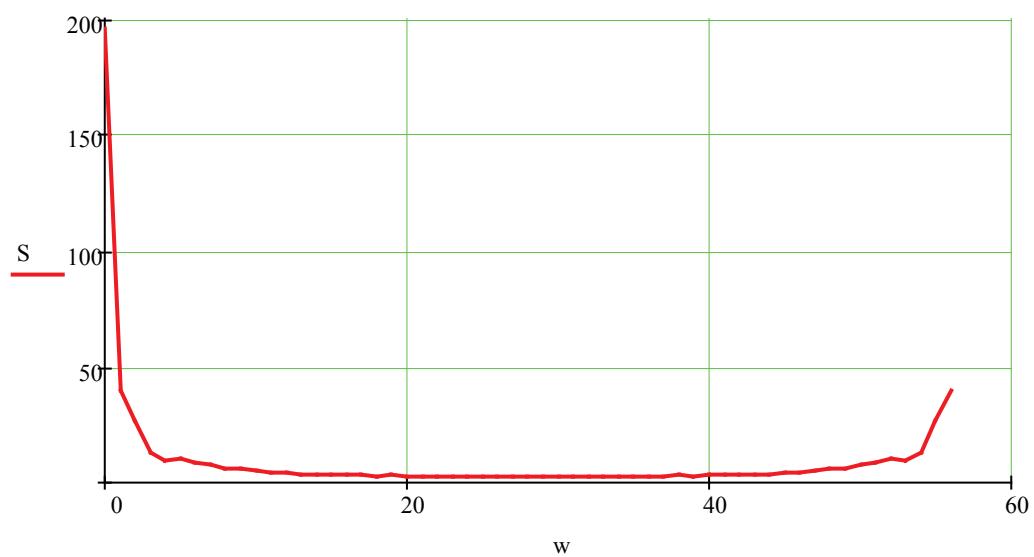
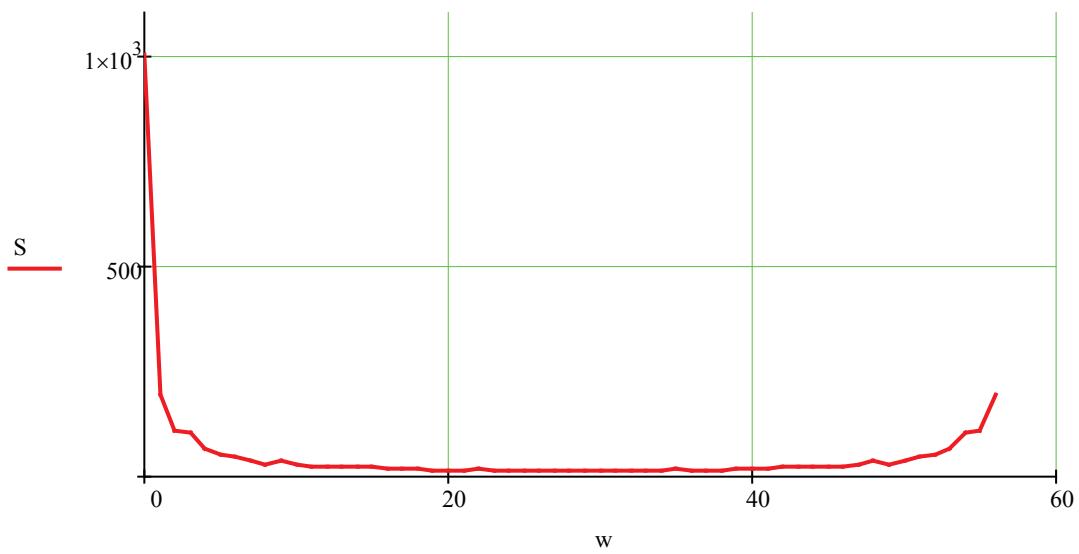


Рис. 4. Графік автокореляційної функції для струму I

Отримані графіки автокореляційних функцій підтверджують, що досліджуваний процес є стаціонарним та ергодичним.

За допомогою програми Mathcad визначимо спектральні щільності для досліджуваних параметрів. У програмі виконаємо пряме перетворення Фур'є отриманих автокореляційних функцій. У результаті чого, отримали графіки спектральних щільностей для параметрів F , I та N , що зображені на рис. 6-8.

Для спектральних щільностей знайдемо їхні рівняння, скориставшись функцією linfit у програмі Mathcad.

Рис. 5. Графік автокореляційної функції для потужності N Рис. 6. Графік спектральної щільності для осьового зусилля F Рис. 5. Графік спектральної щільності для струму I

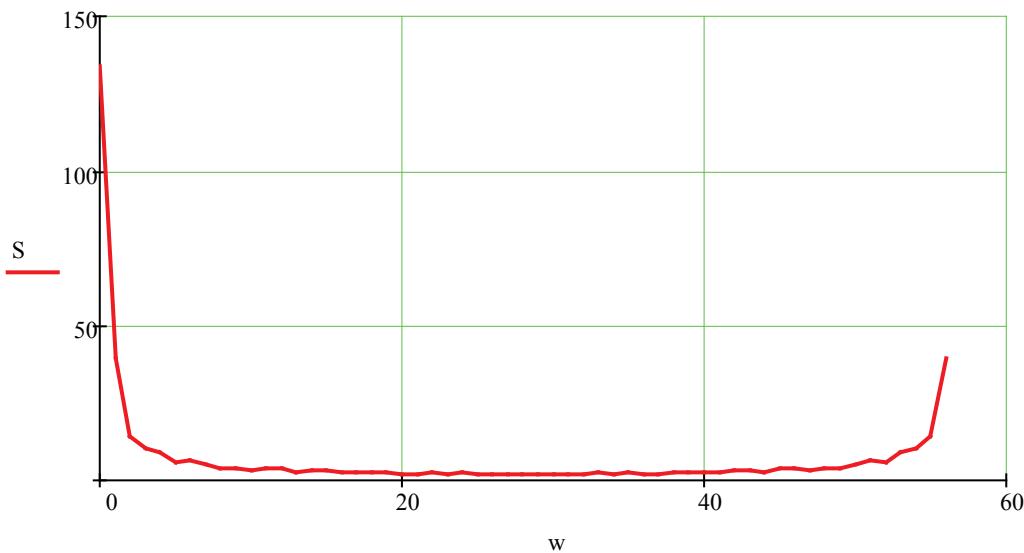


Рис. 6. Графік спектральної щільності для потужності N

Знаходимо для осьового зусилля F на долото рівняння, записавши наступне в Mathcad і одержимо:

$$\begin{aligned} vx &:= w \\ vy &:= S \\ FF(x) &:= \begin{pmatrix} 0 \\ x \\ x^2 \\ x^4 \end{pmatrix} \\ KF &:= \text{linfit}(vx, vy, FF) \\ KF &= \begin{pmatrix} 22.436 \\ -0.034 \\ 1.167 \times 10^{-5} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Отримаємо рівняння спектральної щільності для осьового зусилля F :

$$S_F(\omega) = 1,167 \cdot 10^{-5} \cdot \omega^4 - 0,034 \cdot \omega^2 + 22,436$$

Аналогічно робимо для струму I , що споживає електробур:

$$\begin{aligned} vx &:= w \\ vy &:= S \\ FI(x) &:= \begin{pmatrix} 0 \\ x \\ x^2 \end{pmatrix} \\ KI &:= \text{linfit}(vx, vy, FI) \\ KI &= \begin{pmatrix} 66.122 \\ -0.012 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Отримаємо рівняння спектральної щільності для струму I :

$$S_I(\omega) = -0,012 \cdot \omega^2 + 66,122$$

Також знаходимо рівняння для потужності N електробура:

$$\begin{aligned} vx &:= w \\ vy &:= S \end{aligned}$$



$$FN(x) := \begin{pmatrix} x^0 \\ x^2 \end{pmatrix}$$

$$KN := \text{linfit}(vx, vy, FN)$$

$$KN = \begin{pmatrix} 8,983 \\ -1,375 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

Отримаємо рівняння спектральної щільності для потужності N :

$$S_N(\omega) = -1,375 \cdot 10^{-3} \cdot \omega^2 + 8,983$$

У результаті даних розрахунків отримуємо наступні вирази амплітудно-фазових функцій:

$$|W_{FI}(j\omega)|^2 = \frac{-0,012 \cdot \omega^2 + 66,122}{1,167 \cdot 10^{-5} \cdot \omega^4 - 0,034 \cdot \omega^2 + 22,436}$$

$$|W_{FN}(j\omega)|^2 = \frac{-1,375 \cdot 10^{-3} \cdot \omega^2 + 8,983}{1,167 \cdot 10^{-5} \cdot \omega^4 - 0,034 \cdot \omega^2 + 22,436}$$

Для отримання функцій передачі із даних виразів використовуємо програму Matlab. У програмі Matlab використовуємо функцію `fact`.

Для первого виразу:

`>> S=tf([-0.012 0 66.122], [1.167e-5 0 -0.034 0 22.436])`

Transfer function:

$$-0.012 s^2 + 66.12$$

$$-----$$

$$1.167e-005 s^4 - 0.034 s^2 + 22.44$$

`>> [W,W_]=fact(S)`

Transfer function:

$$0.1095 s + 8.132$$

$$-----$$

$$0.003416 s^2 + 0.2576 s + 4.737$$

Transfer function:

$$0.1095 s - 8.132$$

$$-----$$

$$0.003416 s^2 - 0.2576 s + 4.737$$

Отже, отримаємо функцію передачі:

$$W_{FI}(s) = \frac{0,1095s + 8,132}{0,003416s^2 + 0,2576s + 4,737}$$

Для другого виразу:

`>> S=tf([-1.375e-3 0 8.983], [1.167e-5 0 -0.034 0 22.436])`



Transfer function:

$$-0.001375 s^2 + 8.983$$

$$1.167e-005 s^4 - 0.034 s^2 + 22.44$$

>> [W,W_]=fact(S)

Transfer function:

$$0.03708 s + 2.997$$

$$0.003416 s^2 + 0.2576 s + 4.737$$

Transfer function:

$$0.03708 s - 2.997$$

$$0.003416 s^2 - 0.2576 s + 4.737$$

Отримаємо другу функцію передачі:

$$W_{FN}(s) = \frac{0,03708s + 2,997}{0,003416s^2 + 0,2576s + 4,737}$$

Висновки

У представлений роботі використано алгоритм Фаррара-Глобера для виявлення явища МК між показниками процесу буріння свердловин електробурами. Встановили також зв'язок між досліджуваними параметрами процесу буріння в різні моменти часу за допомогою автокореляційної функції та функції спектральної щільності. Автокореляційні функції підтвердили, що досліджуваний процес є стаціонарним та ергодичним. Визначили рівняння спектральних щільностей та отримали функції передачі $W_{FI}(s)$ та $W_{FN}(s)$. Так як існує щільний зв'язок між досліджуваними параметрами, запропоновано використовувати для автоматичного керування процесом буріння електробурами один із досліджуваних параметрів – струм навантаження двигуна електробура або потужність, яку споживає електробур.

Отже, оскільки між досліджуваними змінними існує високий ступінь МК, то усунути її можна шляхом відкидання однієї змінної з високою кореляцією і виключення її із математичної моделі. Для цього достатньо порівняти отримані функції передачі $W_{FI}(s)$ та $W_{FN}(s)$ і вибрати оптимальну.



ГЛАВА 10. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ СТАТИСТИКА КАК СРЕДСТВО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА

Введение

Тенденции последних десяти лет таковы, что в технологиях, используемых с целью повышения эффективности добычи, применяют гидроразрыв пласта (ГРП), так как это позволяет увеличивать приток нефти. Технология основана на механизме возникновения и распространения трещин в горных породах. Учитывая, что для эффективного использования таких технологий необходимо иметь приемлемую для описания данного перспективного процесса модель, представляют интерес исследования эффективности ГРП с использованием вероятностно - статистического подхода. Это позволило бы, в частности, решать задачу определения оптимального количества стадий гидроразрыва с последующей оценкой расстояний между создаваемыми трещинами. Поэтому возникла необходимость разработки, на основе вероятностно – статистического подхода новых критериев успешности применения многократного ГРП в технологиях комплексного воздействия на пласт для использования в промысловых условиях.

10.1. Анализ литературных данных в постановке проблемы

В исследованиях, посвященных изучению эффективности использования ГРП, особенно в условиях трудноизвлекаемых запасов нефти, многими учеными рассматриваются пути совершенствования технологий многостадийного гидроразрыва пласта в анизотропном неоднородном нефтенасыщенном коллекторе [1–4].

В работе [5] описаны возможности оценки коэффициента продуктивности залежей по косвенным данным на стадии составления первых проектных документов и моделирования процессов нефтеизвлечения с использованием опыта разработки месторождений, находящихся длительное время в эксплуатации.

Вызывает интерес исследования, проведенные [6], по методике определения величины закачиваемого проппанта. Авторами данной работы, в частности, введены новые определяющие уравнения, которые позволяют описать процесс закрытия трещины. Проведен анализ влияния вязкости жидкости, его плотности, размера и проницаемости пласта. Данные исследования могут быть признаны полезными при выборе состава проппанта.

В своих исследованиях авторы работы [7], на основе статистического анализа, сгруппировали месторождение Широтного Приобья. На основе многофакторного анализа были выявлены геологические признаки, которые влияют на эффективность разработки месторождений.

Моделирование упруго-пластического поля напряжений вокруг ствола скважины предлагаются в работе [8], где новая упруго-пластическая гидравлическая модель инициирования разрыва пласта разрабатывается в сочетании с максимальным пределом прочности на растяжение, что является важным при определении поля напряжения гидроразрыва пласта.



В повышении эффективности гидроразрыва может быть полезен опыт, предложенный в [9] с использованием импульс – технологии гидроразрыва песка. Впервые авторы вводят понятие дискретного многослойного шлифования внутри трещин. В своих исследованиях они доказали, что использование длительность импульса на пласт позволяет эффективно увеличить производительность скважины, уменьшить объем гидроразрыва расклинивающего наполнителя.

Исследователи [10] предлагают математическую модель, которая позволяет не только точно оценить эффективность гидроразрыва, но также определить оптимальную конструкцию параметров в горизонтальных скважинах. Лабораторные испытания были применены на месторождении и показали хороший результат.

Вместе с тем, нельзя не отметить, что, несмотря на существенные исследования в области повышения продуктивности пласта с использованием технологий одностадийного и многостадийного ГРП, остаются некоторые открытые вопросы. На основании изученных публикаций, учебных пособий [12,13], проведенных исследований с использованием аппарата математической статистики, месторождения Широтного Приобья, авторы определили цель и задачи исследования, которые позволили бы дать ответ на ряд таких вопросов.

10.2. Цель и задачи исследования

Цель исследования – определение критерий эффективности ГРП, с использованием вероятностно-статистического подхода.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить такие задачи:

- статистический анализ существующих технологий применения гидроразрыва;
- теоретические исследования эффективности проведения операции одностадийного и многостадийного гидроразрыва пласта;
- определение критериев эффективности применения технологии ГРП.

10.3. Результаты исследований. Геолого – промысловые исследования приобского месторождения.

Исследование выполняется с использованием вероятностно-статистического анализа проведенных ГРП, на основании которого предполагается возможным выбор метода интенсификации добычи на основе применения технологии одностадийного ГРП, фильтрационно-емкостных свойств горизонта АС12-3, которые способствуют формированию в нем трудноизвлекаемых запасов. На основе обработки статистических данных его промысловой эффективности установлены количественные критерии выбора параметров трещины по её длине, высоте и количеству закачиваемого в неё проппанта. На основании их внедрения удалось поднять промысловую эффективность одностадийного ГРП и обеспечить приросты ежегодной накопленной добычи не менее чем на 10 – 15 %. Однако по истечении некоторого времени (4 лет) промысловая эффективность одностадийного ГРП начала также снижаться, что потребовало поиска путей его совершенствования



на основе внедрения его многостадийной модификации. Анализ результатов его промыслового опробования позволил получить количественные критерии оптимизации многостадийного ГРП на основе обоснованного выбора как длины и объема трещин, так и их количества, что позволило обеспечить достижение планового КИН при разработке горизонта АС12-3 в установленные и согласованные с ГКЗ РФ сроки.

Уникальное Приобское месторождение входит в крупную Хулымско-Приобскую зону нефтегазонакопления, которая в виде широкой полосы протягивается с севера на юг в центральной части Западно-Сибирской равнины. [4]

Согласно геолого-промышленным исследованиям, нефтенасыщенная толщина месторождения имеет пластово-садовый характер и представлена основным продуктивным горизонтом пласта АС-12-3 Черкашинской свиты, мощность которого увеличивается (до 16 – 18 м) к сводовой части месторождения и уменьшается (до 4 – 5 м) в его крыльевой зоне.

На рис. 1 представлены гистограммы распределения эффективной нефтенасыщенной мощности пласта АС12-3, из которых видно, что она составляет не более 50 % от фактической мощности этого пласта и её преобладающая величина от 3 до 7 метров составляет 60 %, а на остальные мощности от 1 до 3 м и от 8 до 10 м приходится менее 40 %.

Кроме того, пласт АС12-3 характеризуется достаточно высокой расчлененностью, которая в случае наличия от 2 до 6 пропластков составляет до 80 % и более (рис. 2).

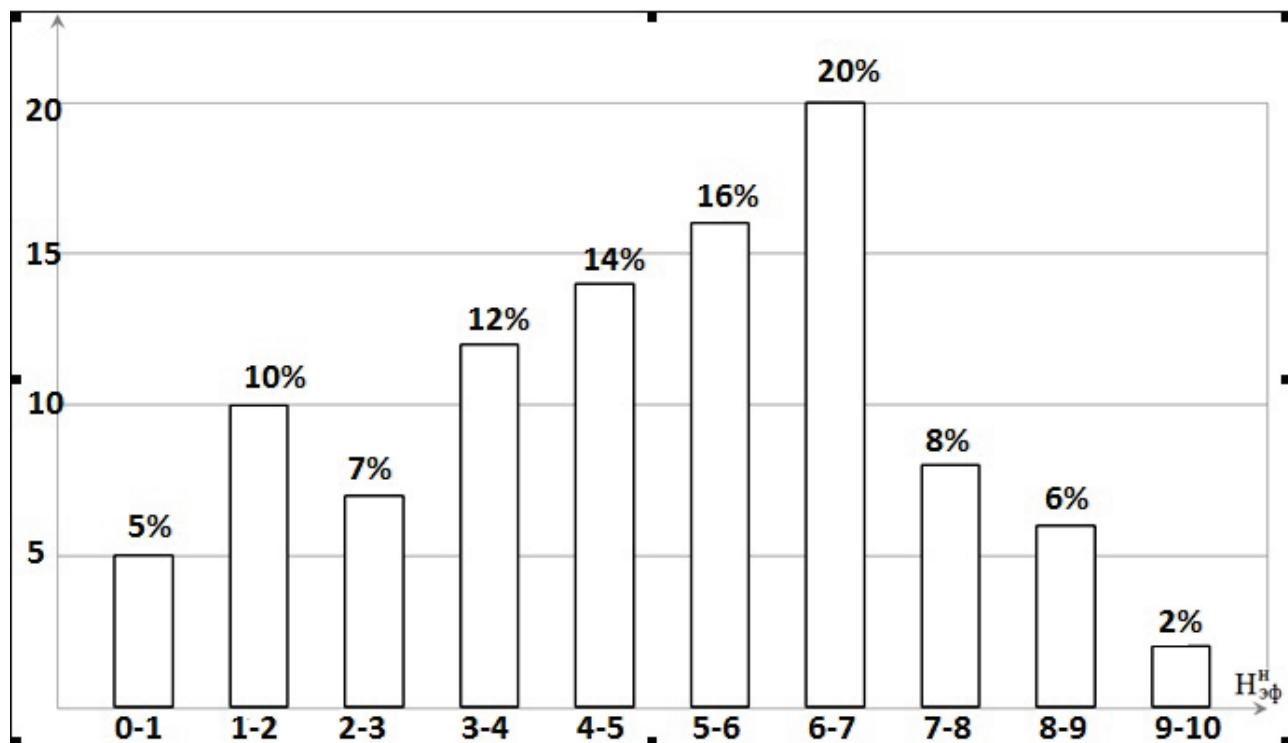


Рис. 1. Гистограмма распределения эффективной нефтенасыщенной мощности пласта АС12-3 [2]

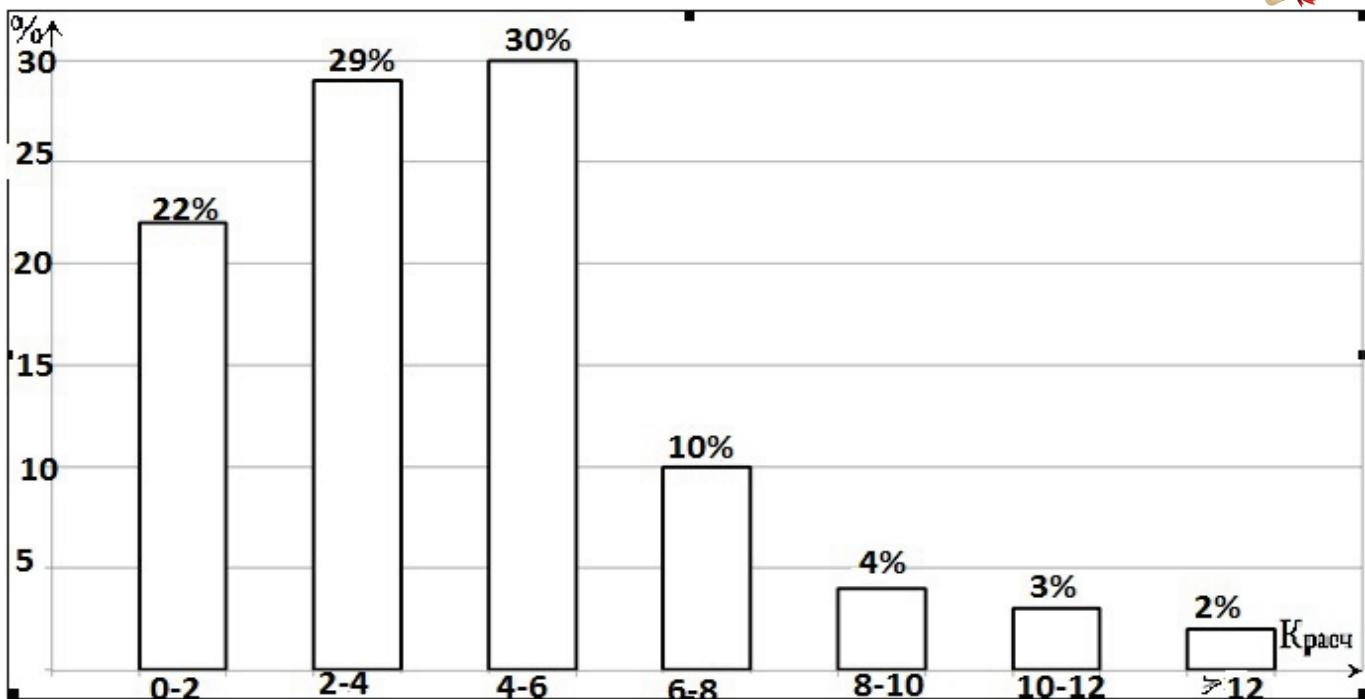


Рис. 2. Гистограмма распределения расчлененности продуктивного пласта AC12-3 [2]

Продуктивный пласт имеет достаточно низкий коэффициент песчанистости, доля которого до 0,4 составляет около 90 % (рис. 3). Это обусловлено относительно высоким коэффициентом глинистости ($K_{Гл} = 5-8 \%$), несмотря на достаточно высокую среднюю межзерновую пористость пласта (рис. 4) равную 19 %, что является причиной его невысокой проницаемости (45 – 90 мпс) при средней нефтенасыщенности от 62 до 76 %.

В конечном счете, приведенные фильтрационно-емкостные свойства пласта AC12-3 позволяют отнести содержащиеся в нем запасы нефти к категории трудноизвлекаемых, что приводит к их неравномерной выработке по площади залегания.

Согласно выполненными исследованиями было установлено [6,11], что в процессе длительной эксплуатации пласта AC12-3 (с 1986 года) произошло неравномерное перераспределение остаточных запасов по площади его залегания. Так, минимальное содержание остаточных запасов оказалось приурочено к зонам (участкам) пласта с минимальной расчлененностью и максимальной песчанистостью, тогда как значительная доля остаточных запасов оказалась сосредоточенной на участках пласта с максимальной расчлененностью и минимальной песчанистостью и, соответственно, с минимальной проницаемостью. Соответственно обводненность продуктивного пласта AC12-3 имеет прямо противоположный характер: она выше там, где расчлененность меньше, а песчанистость выше, и ниже там, где, наоборот, расчлененность выше, а песчанистость ниже.

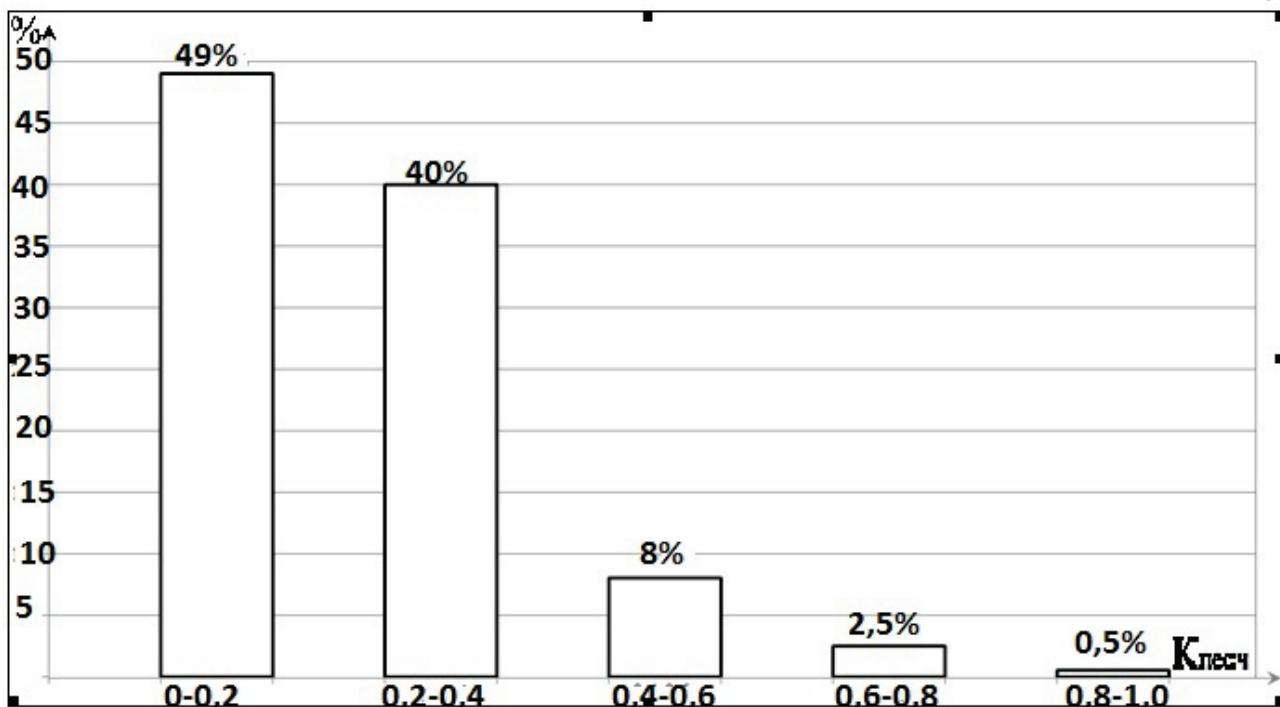


Рис. 3. Гистограмма распределения песчанистости продуктивного пласта AC12-3[2]

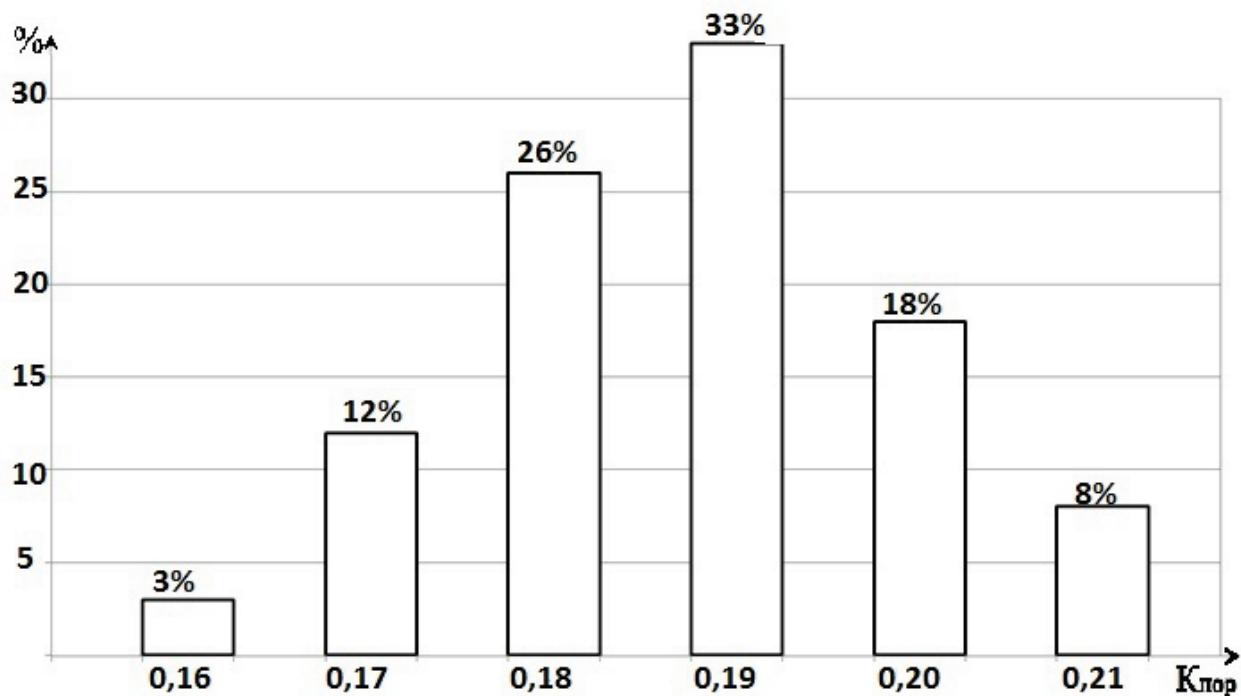


Рис. 4. Гистограмма распределения пористости продуктивного пласта AC12-3[2]

Ухудшение структуры запасов в процессе интенсивной разработки пласта AC12-3 привело, несмотря на увеличение эксплуатационного фонда скважин к 1991 году до 80 единиц, к началу быстрого падения текущей годовой добычи (рис. 5) и стало основной причиной поиска более эффективных методов ПНП. К началу 2000 года после апробации различных методов интенсификации



(СКО, термоимплозия, ГС и БГС) и тщательного анализа полученных материалов, выбор остановился на технологии одностадийного ГРП [3].

В соответствии с проектным заданием режим ГРП выбирался с расчетом получения единичной трещины в продуктивной толще высотой (Нтр) до 0,8 – 0,9 Нпл, длиной Lтр до 70 – 80 м и раскрытием (В) до 3 – 5 мм.

Оценка промысловой эффективности ГРП показала, что она составляла около 50 %. Анализ результатов неудачных ГРП показал, что они, как правило, сопровождаются низкими дебитами и ростом обводненности по сравнению с первоначальной, хотя выбранные скважины были расположены в зоне достаточно высоких остаточных запасов.

Изучение особенности строения месторождения и сопоставление их с направлением разломов подстилающего его фундамента показало, что в крыльевых зонах осадочной толщи формируются участки напряженного состояния горной породы, сопровождаемые образованием естественной трещиноватости, имеющей преимущественно осевое (вдоль валообразной структуры месторождения) направление.

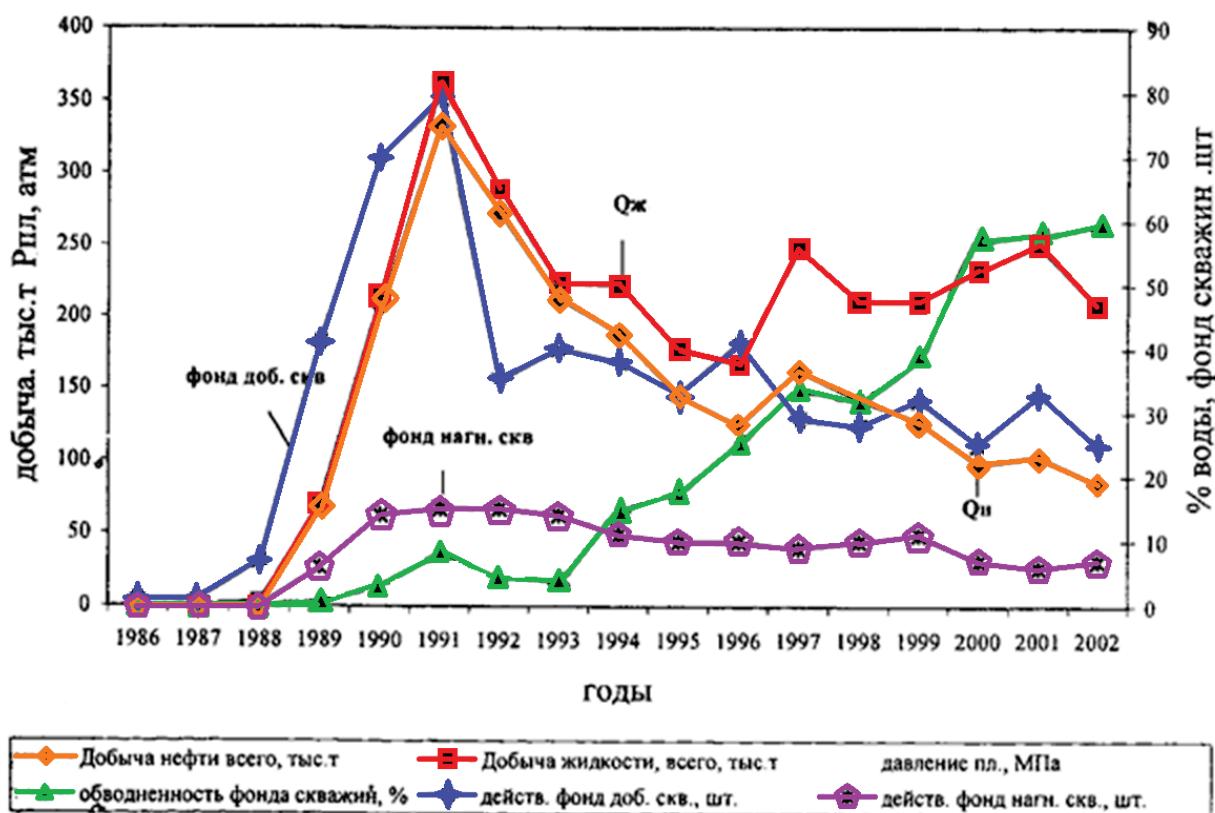


Рис. 5. Динамика эксплуатации пласта АС12-3 Приобского месторождения

Сопоставление данных неудачных ГРП с расположением скважин в зонах сосредоточения остаточных запасов и направлением в них естественной трещиноватости показало, что они обусловлены попаданием второго крыла трещины в зону истощенных запасов с высоким уровнем обводненности, что могло служить объяснением их низкой эффективности [2].

На стадии опытно-промышленного опробования технологии



одностадийного ГРП выбор скважин осуществлялся по следующим критериям [4]:

- нефтенасыщенная мощность пласта не менее 3 м;
- потенциальный дебит (максимальный дебит за всю историю эксплуатации) не менее 10 т/сут;
- начальная нефтенасыщенность $K_n > 0,4 + 0,15 \cdot (1 - \sqrt{\alpha_{nc}})$;
- мощность перекрывающих и подстилающих экранов не менее 3 м.
- отношение текущего пластового давления к начальному не менее 0,9.
- состояние цементного камня в интервале перфорации ± 20 м хорошее;
- скважина не должна иметь заколонных перетоков;
- обводненность продукции не более 50 %;
- угол отклонения ствола скважины от вертикали в интервале пласта не более 10° ;
- обводненность окружающих добывающих скважин не более 70 %.

С целью исследования зависимости технологической эффективности ГРП от технологии его проведения, на основании ранее апробированной методики было изучено влияние на нее параметров трещины: длина, высота, ширина, а также количества проппанта.

В результате было получено, что с ростом длины трещины увеличивался начальный дебит по нефти и снижалась обводненность добываемой продукции, что следует из графиков, приведенных на рис. 6, 7.

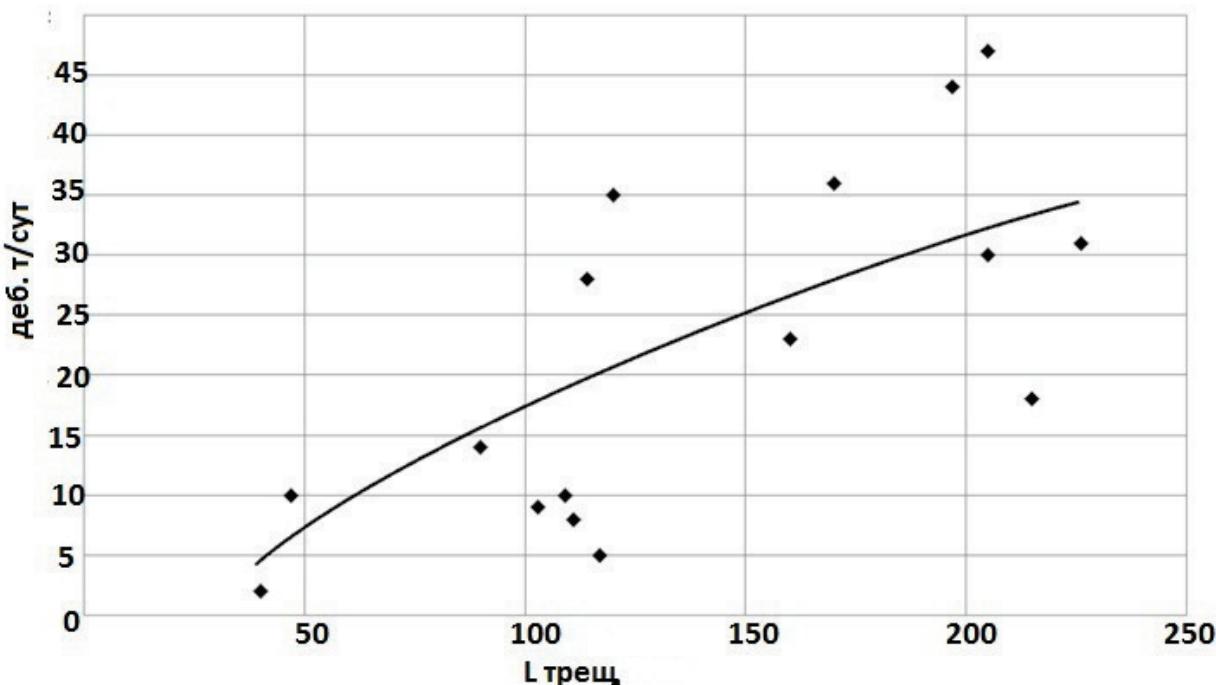


Рис. 6. Зависимость дебита скважины после одноинтервального ГРП от длины трещины

При этом было установлено, что с ростом высоты трещины относительно эффективной мощности пласта дебит по нефти снижается, а обводненность, наоборот – растет, что хорошо видно из графиков, приведенных на рис. 8, 9.



Такое поведение, очевидно, связано с уменьшением эффективной нефтенасыщенной мощности пласта по мере выработки запасов в процессе длительной эксплуатации.

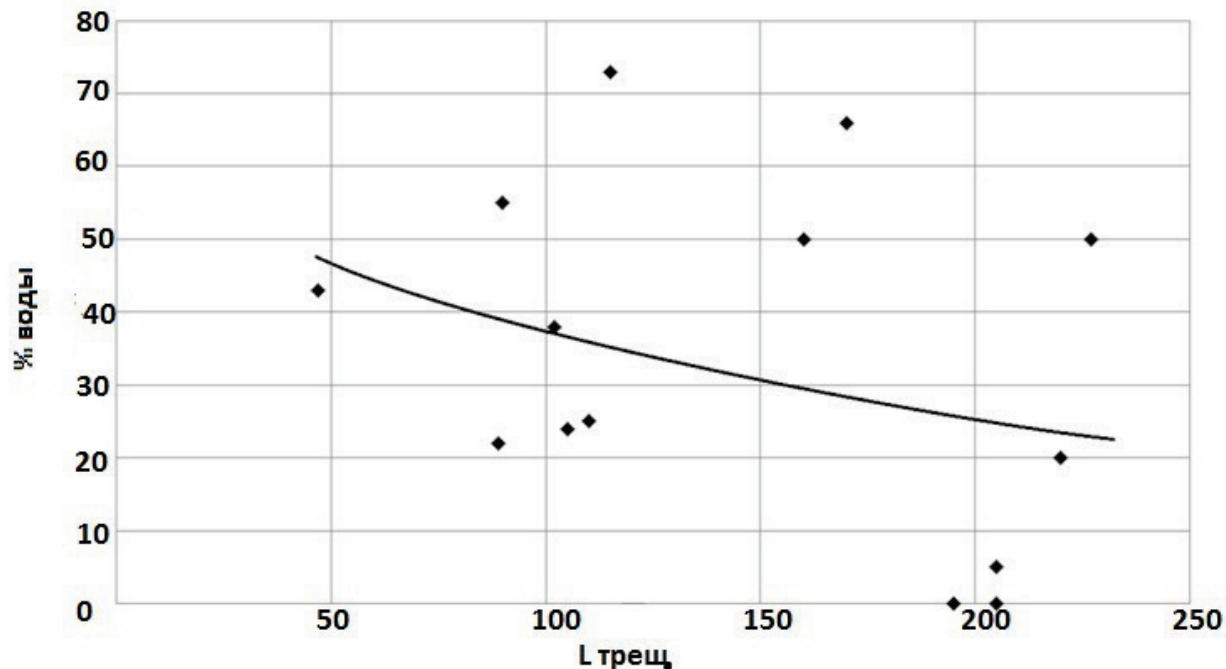


Рис. 7. Зависимость обводненности скважины после одноинтервального (одностадийного) ГРП от длины трещины

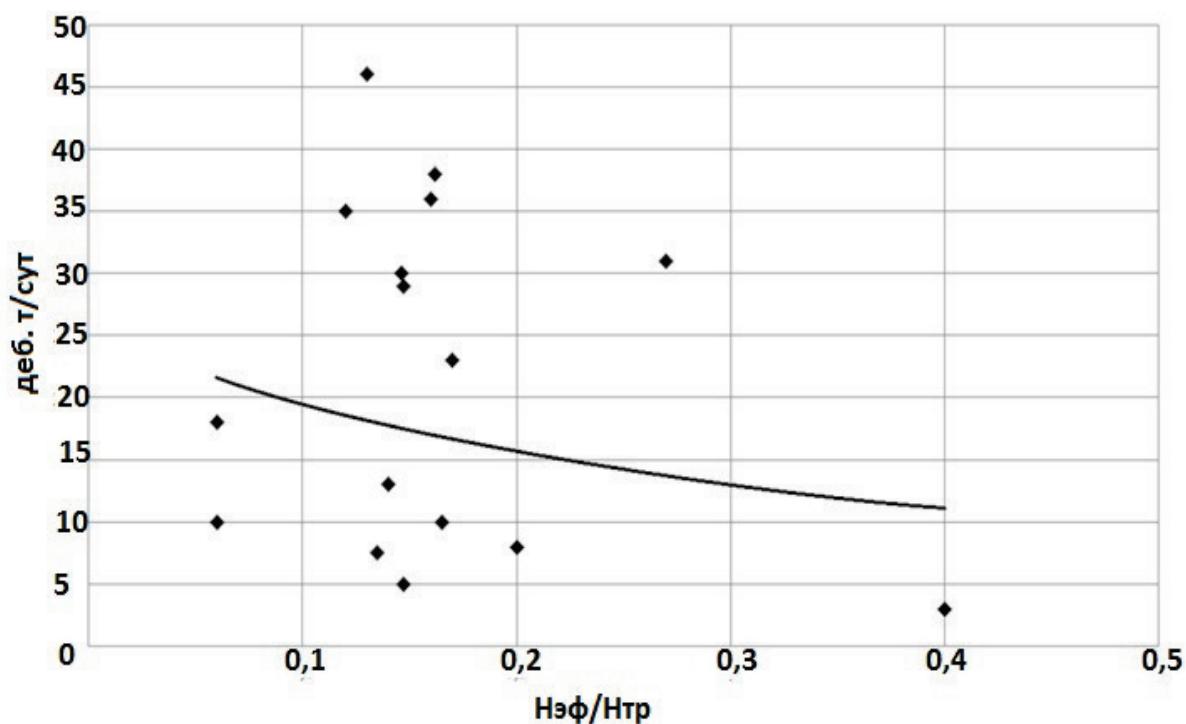


Рис. 8. Зависимость дебита нефти после одностадийного ГРП от отношения эффективной мощности пласта к высоте трещины

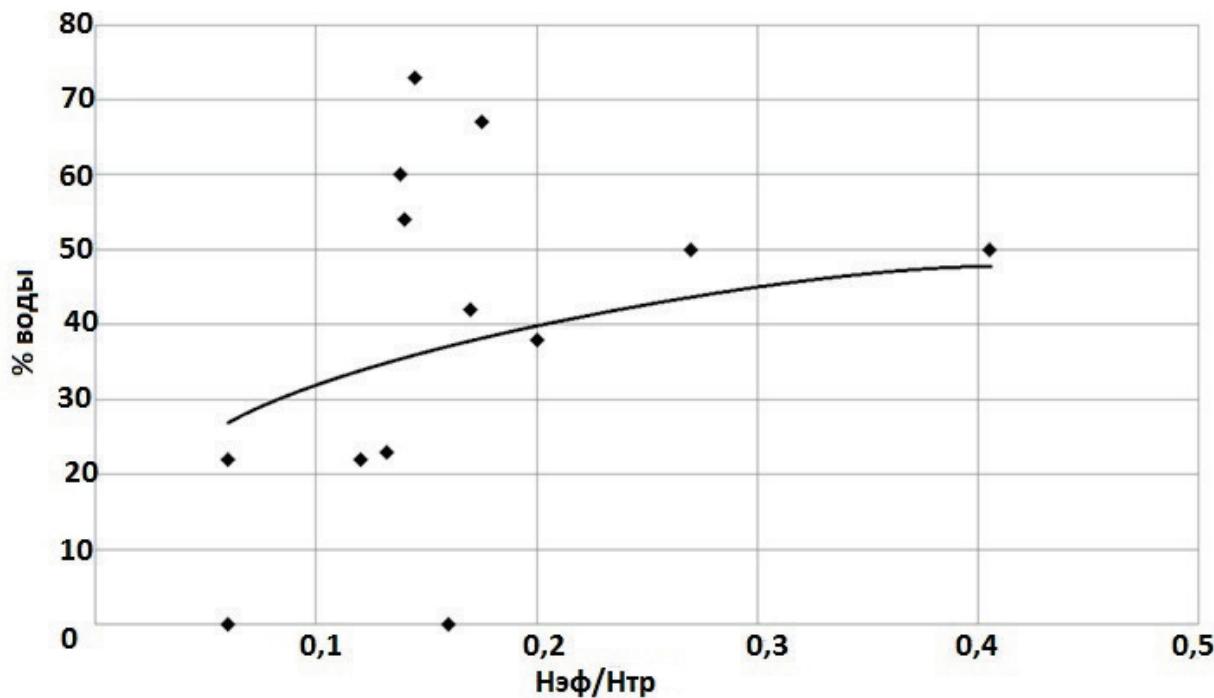


Рис. 9. Зависимость обводненности продукции после одностадийного ГРП от отношения эффективной мощности пласта к высоте трещины

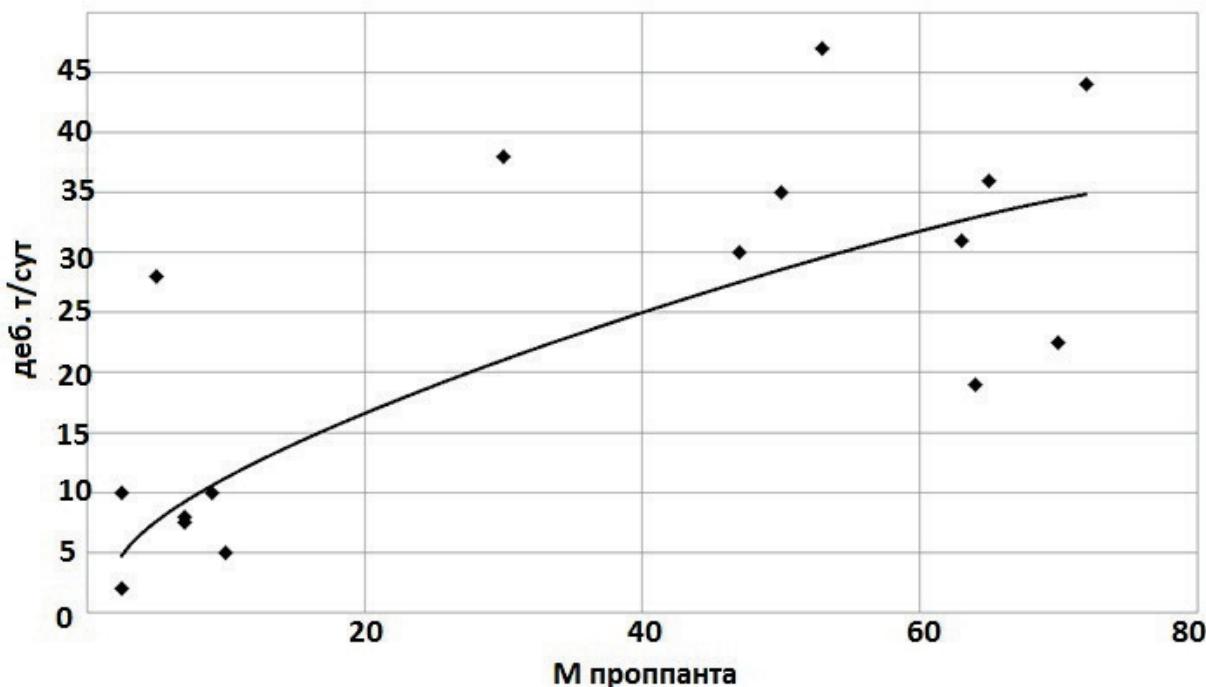


Рис. 10. Зависимость дебита по нефти после одностадийного ГРП от массы закаченного в трещину проппанта

Далее было установлено, что с ростом массы закачиваемого проппанта дебит по нефти после ГРП также растет (рис. 10), что хорошо коррелируется с графиком на рис. 6 для зависимости дебита от длины трещины. Полученные на рис. 6–10 зависимости позволили существенно скорректировать технологию одностадийного ГРП в отношении повышения его не только технологической,



но и экономической эффективности.

За счет использования полученных критериев выбора оптимальных параметров технологии одностадийного ГРП, удалось не только остановить наметившийся спад накопленной текущей добычи при эксплуатации пласта БВ8-1, но также обеспечить её увеличение к 2006 году (рис. 11). Некорректное высказывание. Однако, после 2006 года, как видно (из графиков 11-13), наметился очередной спад накопленной текущей добычи.

10.4. Эффективность технологии многостадийного ГРП

В качестве альтернативы одностадийному ГРП была разработана технология многостадийного ГРП, когда в пласте бурится горизонтальный ствол и в нем с помощью спецоснастки применяется технология создания нескольких трещин, отстоящих через определенный интервал друг от друга [4, 11].

На рис. 12 показаны диапазоны дебитов скважин, в которых проводился многостадийный ГРП, начиная от начальных (остановочных) дебитов до ГРП, затем – расчетных (прогнозных) и реальных дебитов сразу после ГРП (запускных), далее – через 3 месяца после ГРП и затем через 6 месяцев после ГРП.

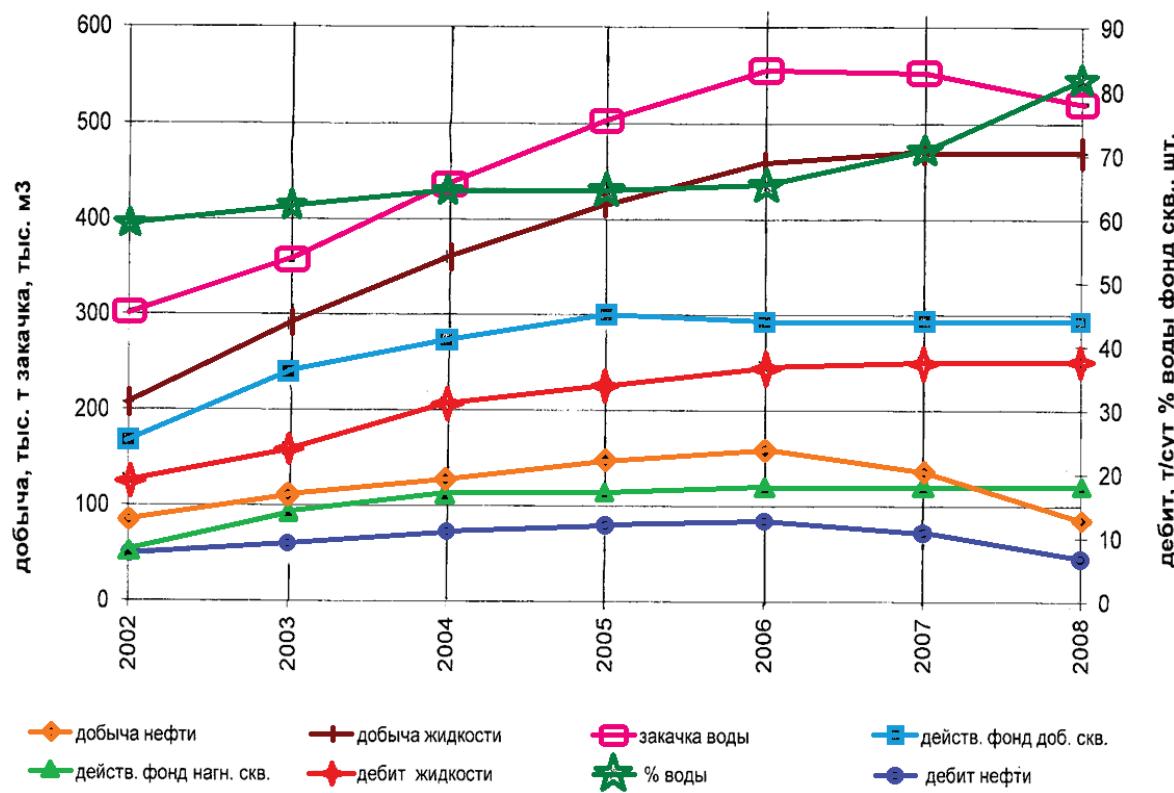


Рис. 11. Динамика разработки пласта АС12-3 с 2002 по 2008 г.г.

Из приведенных зависимостей следует, что диапазон расчетных и запускных дебитов практически совпадает, что свидетельствует о достаточно совершенной методике прогнозирования промыслового эффекта от многостадийного ГРП [4]. Однако по истечении сначала 3-х месяцев, а затем и 6 месяцев, реальные дебиты начинают существенно расходиться с расчетными



данными. Причем это расхождение происходит как в сторону уменьшения дебитов, по сравнению с расчетными данными, так и в сторону их увеличения. Такое поведение обусловлено проявлением системной ошибки в выполненных расчетах, поскольку сопровождается соответствующим неучтенным ростом обводненности добываемой продукции в первом случае и её снижением – во втором.

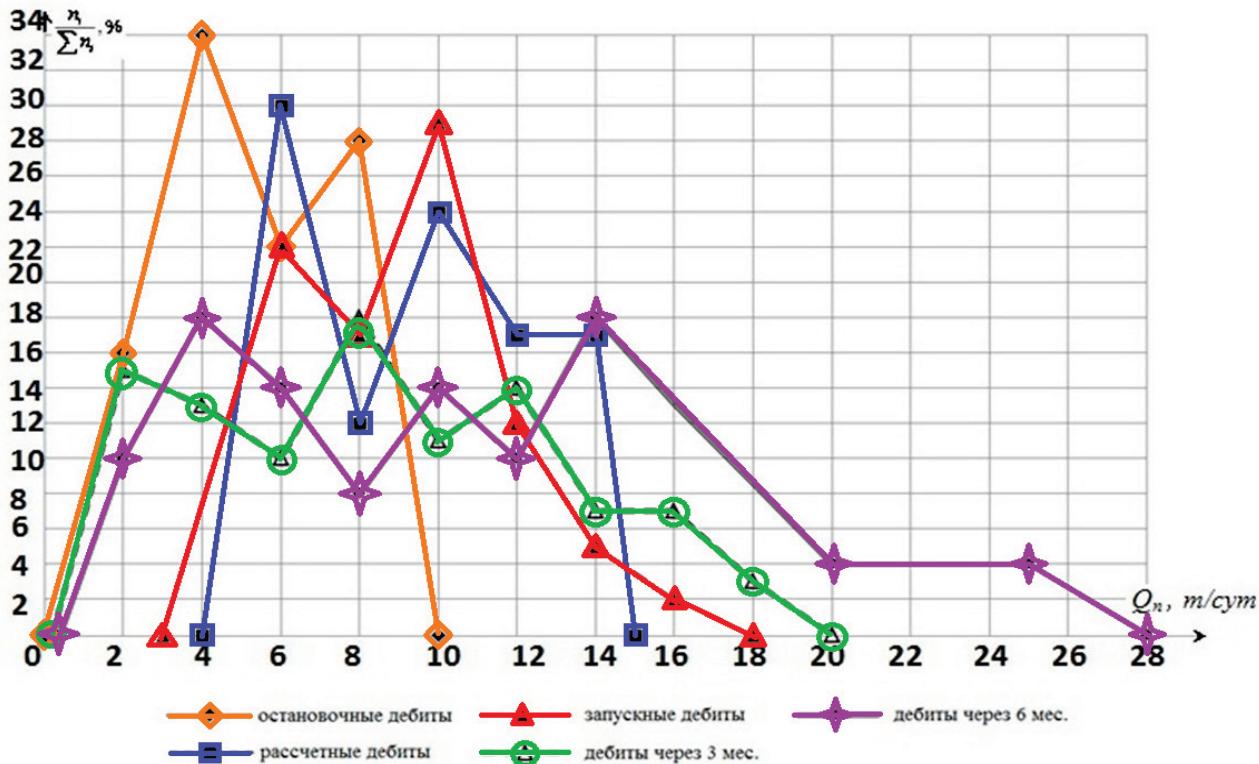


Рис. 12. Графики распределения дебитов скважин после многостадийных ГРП пласта АС12-3

Постараемся разобраться, является ли упомянутая ошибка в расчетах системной или носит случайный характер. Рассмотрим графики распределения отклонения реальных дебитов от прогнозируемых.

Полученные графики представлены на рис. 13. Из них видно, что прогнозные расчеты в случае бурения ВС и ННС оправдываются в 15 % случаев, после бурения БС – в 25 % случаев, а после многостадийного ГРП достоверность прогноза составляет 50 % на 50 %.

Поскольку при интенсификации добычи с помощью технологии многостадийного ГРП проявление тенденции постепенного снижения текущего дебита во времени неизбежно в связи с истощением запасов нефти в пределах контура питания конкретной скважины, будем исследовать зависимость расхождения реальных темпов падения дебитов нефти и обводненности.

Таким образом, в результате выполненного анализа взаимосвязи степени вероятности, положительного прогноза по приросту дебита нефти и снижения его обводненности, получили дополнительные количественные критерии, определяющие свойства образовавшихся трещин. Они обеспечивают необходимую технологическую эффективность используемого метода ПНП, которые соответствуют выполненным прогнозным расчетам.

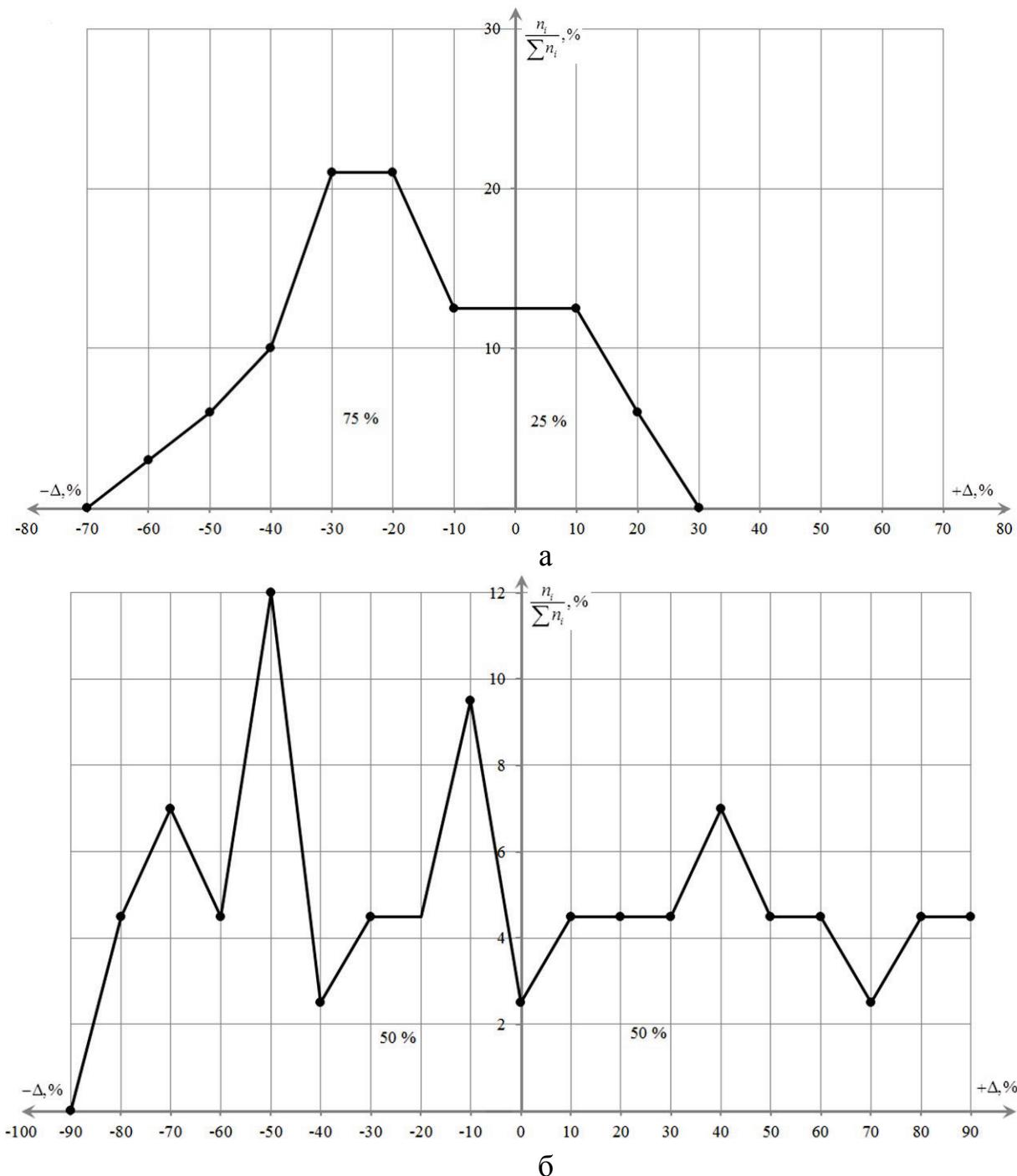


Рис. 13. График распределения отклонения реальных дебитов от прогнозируемых: а – после выхода из бурения БС; б- выход из ГРП

Выводы

1. Продуктивный горизонт АС12-3 имеет сложное геолого-физическое строение и низкие фильтрационно-емкостные свойства, что существенно осложняет его разработку и способствует активному формированию в нем трудно-извлекаемых запасов.

2. Применение технологии интенсификации разработки горизонта БВ8-1 на основе одностадийного ГРП показало её эффективность в течение достаточно ограниченного времени не превышающего 3 – 4 лет.

3. Применение на горизонте АС12-3 технологии многостадийного ГРП



показало её более высокую эффективность по сравнению с технологией одностадийного ГРП. Однако подтверждаемость положительных прогнозных показателей от её применения не превысила 50 %.

4. Результаты анализа статистических показателей промысловых результатов применения многостадийного ГРП на горизонте АС12-3 позволили уточнить диапазоны выбора основных параметров трещин гидроразрыва по их длине, объему, количеству трещин и весу закачиваемого проппанта.



Литература

Глава 1:

1. Пупков К.А. О некоторых этапах развития теории и техники интеллектуальных систем // Интеллектуальные системы: Труды 8-го международного симпозиума. – М.: РУСАКИ, 2008. – С. 4-17.
2. Физические основы надежности интегральных схем / Сыноров В.Ф., Пивоварова Р.П., Петров Б.К. и др. Под ред. Ю.Г. Миллера. – М.: Сов. радио, 1976. – 320 с.
3. Кейджян Г.А. Прогнозирование надежности микроэлектронной аппаратуры на основе БИС. - М.: Радио и связь. - 1987. - 152с.
4. Электрофизическое диагностирование элементов радиоэлектронной аппаратуры / Бережной В.П., Юсов Ю.П., Ходневич С.П. и др. Под ред. В.П. Бережного. – М.: ЦНИИ «Электроника», 1990. – 304 с.
5. Иванов В.А. Функциональная устойчивость систем. Новое видение системной проблемы // Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика: Тез. докл. 2-ой международной конференции. – Рязань, 1998. – С. 76-78.
6. Пряников В.С. Прогнозирование отказов полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1978. – 112 с.
7. Mishanov R.O., Piganov M.N. Technology of diagnostic for non-destructive control of the bipolar integrated circuits // Sense. Enable. Spitse: proceedings 2nd international scientific symposium. - Russia, St. Peterburg, 2015.-P. 38-41.
8. Сергеев В.А., Юдин В.В. Контроль качества цифровых интегральных микросхем по параметрам матрицы тепловой связи// Известия ВУЗов. Электроника.- 2009. № 6. - С.72-78.
9. Piganov M.N., Tyulevin S.V., Erantseva E.S., Mishanov R.O. Apparatus diagnostic for non-destructive control chip CMOS-Type // European science and technology: materials of the VIII international research and practice conference. – Germany: Munich, 2014. – P. 398-401.
10. Watchik R., Bucelot T., Li G. // J. Appl. Phys.- 1998. №9. - P. 4734-4740.
11. Jonson J.B. The shotiky effect in box frequency circuit // Phys. rev, 1925. v. 26. – P. 71-85.
12. Mishanov R., Piganov M. Individual forecasting of quality characteristics by an extrapolation method for the stabililrons and the integrated circuits// The experience of designing and application of CAD systems in Microelectronics (CADSM 2015): Proceeding XIII international conference.- Ukraine, Lviv, 2015.-P. 242- 244.
13. Piganov M., Tyulevin S., Erantseva E. Individual prognosis of quality indicators of space equipment elements // The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics (CADSM 2015): Proceeding XIII international conference.- Ukraine, Lviv, 2015.-P. 367- 371.
14. Мишанов Р.О., Пиганов М.Н. Разработка прогнозной модели качества полупроводниковых приборов методом экстраполяции // Известия Самарского научного центра Российской академии наук.-2014. Том 6, №4(3).- С. 594-599.
15. Пиганов М.Н., Тюлевин С.В. Прогнозирование надежности



радиоэлектронных средств //Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Информатика.-Телекоммуникации. Управление». - 2009, вып. 1. – С. 175-182.

16. ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. – Минск: ИПК «Издательство стандартов», 1996.

17. Стандарт МЭК. Публикация 812. Техника анализа надежности систем. Метод анализа вида и последствий отказов. – М.: Издательство стандартов, 1987.

18. ГОСТ В27814-88. Изделия электронной техники. Порядок проведения работ по обеспечению длительной работоспособности изделий в радиоэлектронной аппаратуре.

19. Межведомственный руководящий документ. Положение об испытательном техническом центре для комплектации электрорадиоизделиями высоконадежной аппаратуры. Редакция 1997 г. – М.: ИТЦ «Циклон», 1997.

20. Ройзен В.З. Электромагнитные малогабаритные реле / В.З. Ройзен. Л: Энергоатомиздат, Ленинг. отд-ние, 1986.

21. Бердичевский Б.Е. Неразрушающий контроль элементов и узлов радиоэлектронной аппаратуры / Б.Е. Бердичевский М: Советское радио, 1976.- 296 с.

22. Руководство по оценке правильности применения электрорадиоизделий и средств измерений в аппаратуре военного назначения / Под общ. ред. Р.П.Покровского. – М.: Военное изд-во, 1982. – 114 с.

23. Абрамов О.В., Розенбаум А.Н. Прогнозирование состояния технических систем.- М.: Наука, 1990.

24. Рабочая книга по прогнозированию/ Редкол.: И.В. Бестужев – Лада(отв. ред.). – М.: Мысль, 1982. - С. 3-273.

25. Гаскаров Д.В., Голинкевич Т.А., Мозгалевский А.В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Сов. Радио. – 1974. – 224с.

26. Пестряков В.Б., Андреева В.В. Индивидуальное прогнозирование состояния РЭА с использованием теории распознавания образов: Учебное пособие. – Куйбышев. 1980. – 82 с.

27. Тюлевин С.В., Пиганов М.Н. Структурная модель индивидуального прогнозирования параметров космической аппаратуры // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – Самара, 2008, вып.1. – С. 92-96.

Глава 2:

1. Решенкин А.С. Оперативная оценка технического состояния ферромагнитных конструкций. //Контроль. Диагностика. 2005. № 4. С. 22.

2. Решенкин А.С. Магнитошумовой контроль ферромагнитных деталей. //Проблемы машиностроения и надежности машин. 2005, № 3, С. 82-87.

3. ГОСТ 5639-82

4. Лахтин Ю.М. Основы металловедения. М.: Металлургия. 1988, - 320 с.

5. Решенкин А.С., Шаповалов А.П. Статистическая оценка параметров микроструктуры конструкционных сталей. //Заготовительные производства в



машиностроении, №1, 2007, с.44-46.

6. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия. 1976, - 271 с.

7. Котельников В.П. Предельное распределение суммы коррелированных случайных величин. – В сб.: Третья Всероссийская школа-коллоквиум по стохастическим методам. Тезисы докладов. М.: ТВП. 1996, с. 91-92.

8. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами. / Под. ред. М. Абрамовица, И. Стиган. М.: Наука. 1979, - 832 с.

9. Решенкин А.С., Гончаров А.В., Тихомиров А.Г. Обоснование применения SN-распределения для анализа параметров микроструктуры конструкционных сталей //Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 1. С. 38-40.

10. Решенкин А.С. Контроль твердости термообработанных углеродистых сталей по характеристикам магнитных шумов // Ремонт, восстановление, модернизация №1, 2003. - С.45

11. Goncharov A.V., Kostoglotov A.A., Reshenkin A.S., Tikhomirov A.G. Control of heat treatment of steel parts //Nauka i studia. 2016. Т. 3. С. 929-934.

12. Бичель И.А., Махмудчин Т.Ш., Решенкин А.С. Опытное определение эмиссионных характеристик магнитного шума и твердости углеродистых сталей после термической обработки // Технология металлов, №11, 2003. С.29

13. Гутлев И.Б., Решенкин А.С. Методика расчета информативных параметров магнитного шума. //Грузовик. 2007. № 5. С. 12-16.

14. Решенкин А.С. Опытное определение эмиссионных характеристик магнитного шума и твердости углеродистых сталей после термообработки. //Машиностроитель, № 7, 2002.

15. Решенкин А.С. Стохастическое моделирование эмиссионных характеристик магнитного шума //Контроль. Диагностика. 2007. № 9. С. 74-76.

16. Бабков В.В., Решенкин А.С. Моделирование процессов диагностирования ферромагнитных конструкций магнитошумовым методом неразрушающего контроля //Контроль. Диагностика. 2008. № 4. С. 17-21.

Глава 3:

1. Общая эффективность оборудования / Пер. с англ. — М.: Институт комплексных стратегических исследований, 2007. — 120 стр.

2. Шарян Э.Г. Основные преимущества развития производства автокомпонентов в России // "Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров": материалы Международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров (17 ноября 2010г.). – Москва, 2010. – С. 362-366.

3. Amen M (2001) Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing: a comparison on solution quality and computing time. Int J Prod Econ 69(3):255–264.

4. Bangsow Steffen. Manufacturing Simulation with Plant Simulation and SimTalk. / Steffen Bangsow — Berlin Heidelberg: Springer-Verlag GmbH, 2010. —



297 p.

5. Bouslah B. Optimal production control policy in unreliable batch processing manufacturing systems with transportation delay / B. Bouslah , A. Gharbi , R. Pellerin, A. Hajji // International Journal of Production Research. – 2013. Vol. 51, № 1. – P. 264-280.
6. Erel E, Sabuncuoglu I, Sekerci H (2005) Stochastic assembly line balancing using beam search. *Int J Prod Res* 43(7):1411–1426.
7. Florian M., Kemper J., Sihn W., Hellingrath B. Concept of transport-oriented scheduling for reduction of inbound logistics traffic in the automotive industries // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2011. Vol. 4, Issue 3, pp. 252-257.
8. Gendreau M., Potvin J. Tabu Search // Handbook of Metaheuristics: International Series in Operations Research & Management Science. – 2010. Vol. 146 – pp. 41-59.
9. L. Yilmaz, W. K. V. Chan, I. Moon, T. M. K. Roeder, C. Macal, and M. D. Rossetti, eds. Simulation model to control risk levels on process equipment through metrology in semiconductor manufacturing // Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference. - 2015. – pp. 2941-2952.
10. Li D., Zhang C., Shao X., Lin W. A multi-objective TLBO algorithm for balancing two-sided assembly line with multiple constraints // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2016. Volume 27, Issue 4, pp 725-739.
11. Makarova I., Khabibullin R., Belyaev E., Mavrin V., Verkin E. Creating a safe working environment via analyzing the ergonomic parameters of workplaces on an assembly conveyor. // Proceedings of 2015 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management. IEEE IESM — Seville, 2015. — P. 947-954.
12. Muchiri P. Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion / P. Muchiri, L. Pintelon // International Journal of Production Research. – 2008. Vol.46, № 13. – P. 3517-3535.
13. Padrón M, de los A. Irizarry M, Resto P, HP M (2009) A methodology for cost-oriented assembly line balancing problems. *J Manuf Technol Manag* 20(8):1147–1165.
14. Paweł Fuc1 & Przemysław Kurczewski1 & Anna Lewandowska2 & Ewa Nowak3 & Jarosław Selech4 & Andrzej Ziolkowski. An environmental life cycle assessment of forklift operation: a well-to-wheel analysis // *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 21, Iss. 4. 2016, Pp. 1-14.
15. Wu B., Sarker B.R. Optimal manufacturing and delivery schedules in a supply chain system of deteriorating items / B. Wu, B.R. Sarker // International Journal of Production Research. – 2013. Vol. 51, № 3. – P. 798-812.
16. Wudhikarn R. Improving overall equipment cost loss adding cost of quality // International Journal of Production Research – 2012. Vol.50, № 12. – P. 3434-3449
17. Zammori Fr. Stochastic overall equipment effectiveness. / Fr. Zammori; M. Braglia, M. Frosolini // International Journal of Production Research. – 2011. Vol. 49, № 21. – P. 6469-6490.



Глава 4:

- [1] Араб-Оглы Э. Кибернетика и моделирование социальных процессов// Кибернетика ожидаемая. Кибернетика неожиданная. — М.: Наука, 1968. — С. 152–167.
- [2] Винер Н. Кибернетика: или управление и связь в животном и машине. — М.: Советское радио, 1968. — 326 с.
- [3] Винер Н. Я – математик. М: Наука, 1967. – 356 с.
- [4] Флоренсов А.Н. О кибернетических основаниях глобальных моделей реальности// Научные ответы на вызовы современности: техника и технологии: монография / [авт. Кол.: Тарасов В.В., Кача Г.П., Бородин А.В. и др.] – Одесса: КУПРИЕНКО СВ, 2016. – 177 с. С. 130 – 157.
- [5] Эшби У. Р. Введение в кибернетику. М.: Изд-во ИЛ, 1959. – 432 с.
- [6] Малый энциклопедический словарь. / Репринтной воспроизведение издания Брокгауза-Ефрана. – М.: ТЕРРА, 1997. Т. 3. – 560 с.
- [7] Кнабе Г.С. Корнелий Тацит (Время, Жизнь, Книги). – М.: Наука, 1981. – 208 с., С.86
- [8] Флоренсов А.Н. Исследование оснований цивилизаций методами теоретической информатики. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. – 292 с.
- [9] Флоренсов А.Н. Кибернетические основания национальной специализации // Информационно-коммуникационные технологии в управлении : монография / [авт. кол. : А.А. Косолапов, А.В. Кувшинов, А.П. Нырков и др.]. – Гл. 3. – С. 71 – 91. – Одесса: КУПРИЕНКО СВ, 2015. – 245 с. С. 71 – 91.
- [10] Хол К. Огненный цикл / Хол Клемент. – М.: Мир, 1970.
- [11] Ключевский В.О. Русская история. Полный курс лекций в трех книгах. Кн. 1. – М.: Мысль, 1994. – 572 с.

Глава 5:

1. Misiunas, D. Monitoring and asset condition assessment in water supply systems: PhD thesis / Lund Univ. – Lund, 2005. – pp. 349.
2. Dermile, R. Model-based estimation of ultrasonics echoes part I: Analysis and algorithms. / R. Dermile, J. Saniie. // IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control. – 2001. – pp. 787–802.
3. Dermile, R. Model-based estimation of ultrasonics echoes part II: Nondestructive evaluation applications. / R. Dermile, J. Saniie. // IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control. – 2001. – pp. 803 – 811.
4. Лэмб, Г. Динамическая теория звука. / Г. Лэмб. – М.: Физматгиз, 1960. – 372с.
5. Бреховских Л.М. Акустика слоистых сред. / Л.М. Бреховских, О.А. Годин – М.: Наука, 1989. – 416с.
6. Talrnant, M. Rétrodiffusion d'une impulsion ultrasonore brève par une coque cylindrique à paroi mince: Ph.D. thesis. / University of Paris. – Paris. VII, 1987.
7. Крылов, В.В. Основы теории излучения и рассеяния звука. / В.В. Крылов. – М.: МГУ, 1989. – 122с.
8. Kausel, E. Fundamental solutions in elastodynamics. / Cambridge University



Press. – 2006. – pp. 262.

9. Yang, C. Prestressing Concrete Cylinder Pipe Monitoring Based on WSN. / C. Yang, Y. Liu, J. Yu // Journal of Information and Communication Technology. – 2009. – 2(2) – pp. 58 – 62.

10. Zibrov, V.A. Remote ultrasound monitoring of underground water mains. / V.A. Zibrov, O.V. Sokolovskaya, N.M. Zibrova, I.A. Zanina // Life Sci J. –2014. – 11(10). – pp. 548–551.

11. Сапронов А.А., Зибров В.А., Занина И.А., Соколовская О.В. Исследование процесса передачи информации по акустическому каналу в водопроводе [Текст] // Энергосбережение и водоподготовка, 2012. – №4. – С.52–54.

12. Подводные электроакустические преобразователи. Расчет и проектирование [Текст]: справочник / под ред. Богородского В.В. – Л.: Судостроение, 1983. – 248с.

13. Римский-Корсаков, А.Д. Акустические подводные низкочастотные излучатели [Текст] / А.Д. Римский-Корсаков и др. – Л.: Судостроение, 1988. – 132с.

14. Тарасов С.П., Зибров В.А. Организация акустического канала передачи данных в продуктопроводе [Текст] // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск «Экология 2011 – море и человек», 2011. – №9(122). – С.57–62.

15. IEEE Standard on Piezoelectricity (ANSI/IEEE Standard 176–1987, 1988).

16. Goldberg, R.L. Modeling of piezoelectric multilayer ceramics using finite element analysis / R.L. Goldberg, M.J. Jurgens, D.M. Mills, C.S. Henriquez, D. Vaughan, S.W. Smith // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr. 44, 1997. – pp. 1204–1214.

17. Sanchez, A. Acoustic transducer design / A. Sanchez, N. Aid, R. Coates // in 3rd European Conference on Underwater Acoustics Proc. – Heraklion, Crete, Greece, 1996. – pp. 995–1000.

18. Сапронов, А.А., Зибров, В.А. Электродинамическое моделирование пьезоэлектрического датчика для мониторинга магистральных водопроводных сетей [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012, - №4 (часть 2). – Режим доступа:, <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1431>(доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

19. Dubus, B. Analysis of mechanical limitations of high power piezoelectric transducers using finite element modeling / B. Dubus, J.C. Debus, J.N. Decarpigny, D. Boucher // Ultrasonics 29, 1991. – pp. 201–207.

Глава 6:

1. Баадер В. Биогаз: теория и практика / В. Баадер, Е. Доне, М. Бренндерфер. - М.: Колос. – 1982. – 570 с.

2. Бульбашев А.П., Гаспарьян Н.А., Ковшов С.В., Никулин А.Н., Смирнов Ю.Д., Шувалов Ю.В. Рациональная организация добычи полезных ископаемых в карьерах со сложными условиями труда горнорабочих. - СПб: МАНЭБ, 2009.



- 464 с.

3. Игонин А.М. Дождевые черви: как повысить плодородие почв в десятки раз, используя дождевого червя-«старателя». Ковров: «Маштекс». 2002. 192 с.

4. Ковшов С.В. Проблема отходов органического происхождения и вермитехнология как вариант ее решения // Записки горного института. Т. 181. СПб., 2009. С. 217-219.

5. Российский статистический ежегодник. – М.: Росстат, 2016. – 275 с.

Глава 7:

1. De Kock, A. J. R. The Elimination of vacansy-cluster Formation in Dislocation-free silicon crystals [Текст] A. J. R. De Kock // Electrochem.Soc. - 1971. - 118. - №11. - Р. 1851-1856.

2. Веселовская, Н. В. Дефекты типа кластеров в монокристаллах кремния [Текст] / Н. В. Веселовская, Э. Г. Шейхет, К. Н. Неймарк, Э. С. Фалькевич // Рост и легирование полупроводниковых кристаллов и пленок, Ч. 2 Новосибирск: Наука, 1977. – С. 284-287.

3. Sitnikova, A. A., Electron-Micro-scopic Study of Microdefects in Silicon Single Crystals Grown at High Speed [Текст] / A. A. Sitnikova, L. M. Sorokin, I. E. Talanin, E. S. Falkevich // Phys. Stat. Sol. - 1984.- V.81.- N2.- P. 433-438.

4. Petroff, P. M. Characterization of swirl defects in floatingzone silicon crystals [Текст] / P. M. Petroff, A. J. R. De Kock // Crystal Growth. - 1975. - 30. - №1. - Р. 117-124.

5. Foll, H. Formation and nature of swirl defects in silicon [Текст] / H. Foll, B. O. Kolbesen // Appl. Phys. - 1975. - V. 8. - P. 319-331.

6. Ситникова, А. А. Исследование природы микродефектов в бездислокационных монокристаллах кремния [Текст] / А. А. Ситникова, Л. М. Сорокин, И. Е. Таланин, К. Л. Малышев, Э. Г. Шейхет, Э. С. Фалькевич // Физика твердого тела. - 1986. - Т. 28. - В. 6. - С. 1829-1833.

7. Таран, Ю. Н. Полупроводниковый кремний: теория и технология производства [Текст] / Ю. Н. Таран, В. З. Куцова, И. Ф. Червоный, Е. Я. Швец, Э. С. Фалькевич // Запорожье, ЗГИА. - 2004. – 344 с. - Библиогр.: с. 317-342. – 300 экз. – ISBN 966-7101-41-4.

8. Рейви, К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии [Текст] / К. Рейви; пер. с англ. В.В. Высоцкой, П.П. Поздевав, Т.М. Ткачевой и О.П. Федоровой; под ред. С.Н. Горина // М.: Мир, 1984. – 470 с. - Библиогр.: с. 425-454. – 3300 экз. – ISBN отсутствует.

9. Abe, T. H. Swirl defects in float-zoned silicon crystals [Текст] / T. H. Abe, H. Yarada, J. Chikava // Physica, 1983. – DC116, 1-3. – Р. 139-147.

10. Осовский, М. И. Образование свирл-дефектов в бездислокационных монокристаллах кремния [Текст] / М. И. Осовский, И. Ф. Червоный // Цветные металлы, 1986. – 133. – С. 8-13.

11. Гладкий, В. В. Влияния тепловых условий на плотность микродефектов в слитках кремния в процессе выращивания [Текст] / В. В. Гладкий, А. В. Вашерук, О. А. Петрова, Т. Ю. Баштовой // Вісник КДПУ ім. Михайла Остроградського, 2009, випуск 6. – Ч. 1. – С. 24-27.



12. Gosele, U. The role of carbon and point defects in Silicon [Текст] / U. Gosele // Mat. Res. Soc. Symp. - 1986. - vol. 59. - P. 419-431.
13. Довганюк, В. В. Трансформации в микродефектной структуре монокристаллов Cz-Si после облучения высокоэнергетическими электронами по данным рентгеновской дифрактометрии [Электронная версия] / В. В. Довганюк, В. Б. Молодкин, В. П. Кладько, Е. Н. Кисловский, Т. В. Литвинчук, С. И. Олиховский, И. М. Фодчук // Режим доступа: http://x-ray.net.ua/downloads/prints/papers/xray_285.pdf. Выборка 15.01.2017
14. Бугай, О. А. Нейтронне трансмутаційне легування - новий метод одержання напівпровідників кремнію з підвищеною однорідністю [Текст] / О.А. Бугай, Э. С. Фалькевич, В. А. Гірій // Вісник АН УРСР, 1983. - №9. - С. 5-11.
15. Lark-Horowitz, K. Nuclear-bombarded semiconductors in semiconductor materials [Текст] / K. Lark-Horowitz // Proc. Conf. Univ. Reading. - London-Butterworths.- 1951.- P. 47-50.
16. Куцова, В.З. Структура, механічні та електрофізичні властивості монокристалічного кремнію під дією постійного магнітного поля [Текст] / В. З. Куцова, О. А. Носко, В. А. Тутик, А. М. Сулай // Металлургическая и горнорудная промышленность, 2015. - № 1(292). – С. 73-79.
17. Червоний, І. Ф. Напівпровідниковий кремній: теорія і технологія виробництва. Монографія [Текст] / І. Ф. Червоний, В. З. Куцова, В. І. Пожусв, Є. Я. Швець, О. А. Носко, С. Г. Єгоров, Р. М. Воляр; Вид. друге, допрац., переробл.; під ред. доктора технічних наук, професора Червоного І. Ф. - Запоріжжя: ЗДІА, 2009. - 488 с. – Бібліогр.: с. 446-484. – 300 прим. - ISBN 978-966-8462-24-5
18. Voronkov, V. V. The mechanism of swirl defects formation in silicon [Текст] / V. V. Voronkov // Crystal Growth. - 1982. - V. 59. - № 3. - P. 625-643.
19. Таланин, И.Е. Микродефекты в бездислокационных монокристаллах кремния [Текст] / И. Е. Таланин // Запорожье: ЗГИА, 1996.- 80 с. – Библиогр.: с. 76-78. – 500 экз. – ISBN 966-7101-100-2.
20. Сорокин, Л. М. Механизм образования микродефектов при выращивании бездислокационных монокристаллов кремния [Текст] / Л. М. Сорокин, А. А. Ситникова, И. Ф. Червонный, Э. С. Фалькевич // Физика твердого тела. - 1991. - т.33. - №11. - С. 3229-3233.
21. Ситникова, А.А. Исследование природы микродефектов в бездислокационных монокристаллах кремния [Текст] / А. А. Ситникова, Л. М. Сорокин, И. Е. Таланин // Физика твердого тела.- 1986. - Т.28. - В.6. - С. 1829-1833.
22. Talanin, V. I. A Selective Review of the Simulation of the Defect Structure of Dislocation-Free Silicon Single Crystals [Текст] / V. I. Talanin, I. E. Talanin // The Open Condensed Matter Physics Journal, 2011. – V. 4 – P. 8-31.
23. Червоный, И. Ф. Явление туннельной кристаллизации полупроводниковых материалов (эффект Червоного) [Текст] / Ю. В. Реков, И. Ф. Червоный, Е. Я. Швец, О. П. Головко, Ю. В. Головко, С. Г. Егоров // Научные открытия - 2013. Сборник кратких описаний научных открытий, научных идей, научных гипотез. – М.: РАЕН, 2014 – С. 31–33.



24. Червонный, И. Ф. Исследование микронеоднородности распределения примеси в монокристаллах кремния [Текст] / И. Ф. Червонный, О. П. Головко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2015. - № 6/5(78) С. 41-41
25. Шаскольская, М. П. Кристаллография [Текст] / М. П. Шаскольская // М.: Высш. Школа, 1976. - 391 с. – Библиогр.: с. 384. – 24000 экз. – ISBN отсутствует.
26. Воронков, В. В. Влияние скорости роста и температурного градиента на тип микродефектов в бездислокационном кремнии [Текст] / В. В. Воронков, Г. И. Воронкова, Н. В. Веселовская, М. Г. Веселовская, И. Ф. Червонный // Кристаллография, 1984. - Вып. 6. - С. 1176-1181.

Глава 8:

1. Михалевський Д. В. Оцінка параметрів безпровідного каналу передачі інформації стандарту 802.11 Wi-Fi / Д. В. Михалевський. – Східно - Європейський журнал передових технологій. – 2014. – № 6/9 (72). – С. 22-25.
2. Michalevskiy D. V. The research of wi-fi channel for multimedia traffic / D. V. Michalevskiy, V. E. Mondlyak, R. O. Krasota // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2014. – №2. – С. 173 – 177.
3. Михалевський Д.В. Особливості технології MIMO у стандарті 802.11 / Д.В. Михалевський, О.С. Городецька. – Научные труды SWorld. – Выпуск 3(44). Том 1. – 2016. – С. 49-54
4. Информационно-коммуникационные технологии в управлении: монография / [авт. кол. Косолапов А. А., Кувшинов А. В., Нірков А. П, Михалевский Д. В. и др.]. – Одесса: Куприенко СВ, 2015, – 245 с.
5. Михалевський Д.В. Дослідження впливу довжини пакетів верхніх рівнів на ефективну швидкість передачі для стандарту Wi-Fi / Д. В Михалевський, М. Д. Гузь, Р. О. Красота // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2014. – №4. – С. 189 – 192.
6. Wescott D. A. CWAP Certified Wireless Analysis Professional Official Study Guide: Exam PW0-270 / D. A. Wescott, D. D. Coleman, P. Mackenzie, B. Miller. – Wiley Technology Pub., 2011. – 712 р.
7. Михалевський Д. В. Оцінка ефективної швидкості передачі інформації для сімейства стандартів 802.11x у діапазоні 2.4 ГГц / Д. В. Михалевський, О. С. Городецька. – Сборник научных трудов Sword. – Выпуск 3(40). Том 3. Иваново: Научный мир, 2015. – С.43-47.
8. Михалевський Д. В. Оцінка розподілу потужності сигналу передавача стандарту 802.11 у приміщенні / Д. В. Михалевський, М. Д. Гузь // Сборник научных трудов Sword. – 2015. – №1(38) Том 3. – С. 48-52.
9. Михалевський Д. В. Оцінка розподілу потужності сигналу для сімейства стандартів 802.11x у діапазоні 2.4 ГГц / Д. В. Михалевський, В.В. Номировська, О.М. Постернак // Сборник научных трудов Sword. – 2015. – №2(39) Том 4. – С. 32-35.
10. Khalid F. Advances in MIMO techniques for mobile communications – A survey // F. Khalid, J. Speidel, / Int. J. Commun. Netw. Syst. Sci., vol. 3, no. 3, pp.



213-252, Mar. 2010.

11. Training protocols for multi-user MIMO wireless LANs // M. X. Gong, E. Perahia, R. Want, S. Mao / *Proc. IEEE Int. Symp. PIMRC*, pp. 1218-1223, 2010.
12. Михалевський Д.В. Дослідження впливу руху абонентів на ефективну швидкість передачі інформації у мережах стандарту 802.11 / Д.В. Михалевський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2016. – №3. – С. 172 – 176.
13. Perahia E. Next Generation Wireless LANs: Throughput, Robustness and Reliability in 802.11n / E. Perahia, R. Stacey. – Cambridge University Press, 2008. – 416p.
14. Foschini G.J. On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas / G.J. Foschini, M.J. Gans // *Wireless Personal Communications*. – 1998. – №6. – Pp. 311–335.
15. Бакулин М.Г. Технология МIMO: принципы и алгоритмы / М.Г. Бакулин, Л.А. Варукина Л.А., Крейиделин В.Б. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 244с.
16. A CSMA/CA MAC protocol for multi-user MIMO wireless LANs // M.X. Gong, E. Perahia, R. Stacey, R. Want, and S. Mao / in *Proc. IEEE GLOBECOM 2010*, Miami, FL, Dec. 2010, pp.1.6.
17. Научные ответы на вызовы современности: техника и технологии. В двух книгах. К. 2.: монография / [авт. кол. Агеева Н.М.Львович И.Я. Шиян П.Л. Михалевский Д. В. и др.]. – Одесса: Куприенко СВ, 2016, – 189 с.
18. Reverse Direction Transmission in Wireless Networks: Review // Ali Ahmad Milad, Zul Azri Bin Muhamad Noh, Abdul Samad Shibghatullah , Mustafa Almahdi Algaet. – Middle-East Journal of Scientific Research. – 2013. – №18 (6). – Pp. 767-778.

Глава 9:

1. Мультиколінеарність. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki> .
2. Большаков А.А. Методы обработки многомерных данных и временных рядов / А.А.Большаков. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007.- 522 с.
3. Минаев Ю.Н. Методы и алгоритмы идентификации и прогнозирования в условиях неопределенности в нейросетевом логическом базисе / Ю.Н.Минаев, О.Ю.Филимонов, Бенамеур Лияс. – М.: Горячая линия-Телеком, 2003.- 205 с.
4. Гутак О.В. Аналіз мультиколінеарності критеріїв оптимальності процесу буріння нафтових і газових свердловин долотами типу PDC / О.В.Гутак // Нафтогазова енергетика. – 2010, № 1(12). – С.98-101.
5. Гутак О.В. Аналіз з'язків показників ефективності процесу буріння на засадах системного підходу / О.В.Гутак, Г.Н.Семенцов // Нафтогазова енергетика. – 2009, № 2(11). – С.94-99.
6. Бунчак З. Електробур. Парадокси і реальність / З.Бунчак, О.Дудар, О.Кекот, О.Турянський. – Електроінформ. – 2003. – № 4. – С. 8-11.
7. Балденко Ф.Д. Автоматизированные системы управления режимом бурения скважин забойными двигателями / Ф.Д.Балденко, А.П.Шмидт // Бурение и нефть. – 2003. – № 4. – С. 14-17.



8. Діхтяренко К.В. Перспектива відродження електробуріння / К.В.Діхтяренко, В.П.Червінський // Нафта і газ України: матеріали 9-ої міжнар. наук.-практич. конф. «Нафта і газ України – 2013», м. Яремча, 4-6 вересня 2013 р. – Л.: «Центр Європи», 2013. – С.59-60.

9. Наконечний С. І.Економетрія: Підручник. / С.І.Наконечний, Т.О.Терещенко, Т.П.Романюк– Вид. 3-те, доп. та перероб. – К.: КНЕУ, 2004. – 520 с.

Глава 10:

1.Гуторов Ю.А., Шакурова А.Ф. Основы технологии гидроразрыва пластов в нефтяных и газовых скважинах // Уфа, УГТНУ, 2009. – 199 с.

2. Проскурин В.А. Обоснование применимости и оценка эффективности технологии многостадийного ГРП на месторождениях ОАО "Славнефть-Мегионнефтегаз"/В. А. Проскурин // Нефтепромысловое дело, 2013. т.№ 10.- С.87-89.

3.Муслимов Р.Х., Галеев Р.Г., Сулейманов Э.И., Волков Ю.А. Проблемы совершенствования научных основ разработки нефтяных месторождений./Тезисы научно-практической конференци. «Проблемы развития нефтяной промышленности Татарстана на поздней стадии освоения запасов»./ Альметьевск.- 1994.-С. 18-23.

4. Мухаметшин В.Ш. Оценка коэффициента продуктивности залежей по косвенным данным на стадии составления первых проектных документов Нефтегазовое дело, 2011, № 3, Т. 9, с. 11-12

5. Sogo Shiozawaa, Mark McClurea. Simulation of proppant transport with gravitational settling and fracture closure in a three-dimensional hydraulic fracturing simulator// Volume 138, February 2016, Pages 298–314

6. Стабинскас, А. П. Оценка эффективности работы скважин после проведения гидравлического разрыва пласта [Текст] / /А. П. Стабинскас Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2014. № 1 (95). С. 10-19.

7. Jianchun Guo, Songgen He, Yan Deng, Zhihong Zhao. New stress and initiation model of hydraulic fracturing based on nonlinear constitutive equation// Volume 27, Part 2, November 2015, Pages 666–675.

8. Jinzhou Zhaoa, Xuan Pua, Yongming Lia, Xianjie Heb. A semi-analytical mathematical model for predicting well performance of a multistage hydraulically fractured horizontal well in naturally fractured tight sandstone gas reservoir// Journal of Natural Gas Science and Engineering. Available online 8 April 2016

9. Bin Qian, Congbin Yin, Juhui Zhu. Research and practice of the impulse sand fracturing technology Natural Gas Industry B// Volume 2, Issue 4, October 2015, Pages 334–340.

10. Branko Damjanac, Peter Cundall. Application of distinct element methods to simulation of hydraulic fracturing in naturally fractured reservoirs. Volume 71, January 2016, Pages 283–294.

11.Масленников В. В. Системный геофизический контроль разработки крупных газовых месторождений: монография / В.В. Масленников, В.В.



Ремизов. - Москва: Недра, 1993. - 303 с. : ил., табл. - ISBN 5-247-03203-9 : Б. ц. Библиогр.: с. 295-299

12. Гидроразрыв пласта / Учебно-методический модуль № 1. Томск, 2002. – 35 с.

13. Гуторов Ю.А., Габдрахманова К.Ф., Ларин П.А Теория вероятностей и математическая статистика в примерах и задачах по разработке нефтяных месторождений. (учебное пособие допущено УМО РАЕ по классическому университетскому и техническому образованию), Уфа:, УГНТУ,2013, 134 с.



МОНОГРАФИЯ

НАУКА И ИННОВАЦИИ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ: ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

Книга 2

Авторы:

Веркин Е.Н. (3), Габдрахманова К.Ф. (10.), Галиакбаров Р.Н. (3),
Головко А.К. (7), Данилів А.Р. (9), Зибров В.А. (5),
Зиброва Н.М. (5), Ковшов С.В. (6), Копистинський Л.О. (9),
Кочковая Н.В. (2), Маврин В.Г. (3), Макарова И.В. (3),
Михалевський Д.В. (8), Поляков А.Л. (3), Решенкин А.С. (2),
Семенцов Г.Н. (9), Сидоркина Н.М. (2), Строителева Н.И. (7),
Тихомиров Д.А. (2), Тюлевин С.В. (1.), Флоренсов А.Н. (4.),
Червоный И.Ф. (7), Шубенкова К.А. (3)

Научные достижения Авторов монографии были также рассмотрены и
рекомендованы для издания на международном научном Симпозиуме
«Наука и инновации в современном мире»
(14-21 февраля 2017 г.) на сайте www.sworld.education

Монография включена в РИНЦ SCIENCE INDEX

Формат 60x84/16. Усл.печ.лист. 10,17

Тираж 500 экз. Зак. №C17-1.

Подписано в печать: 15.03.2017

Издано:
КУПРИЕНКО СЕРГЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ
А/я 38, Одесса, 65001
e-mail: orgcom@sworld.education
www.sworld.education



Свидетельство субъекта издательского дела ДК-4298

*Изатель не несет ответственности за достоверность
информации и научные результаты, представленные в монографии*

Отпечатано с готового оригинал-макета ФЛП Москвин А.А./ Цифровой типографии “Copy-Art”
г. Запорожье, пр. Ленина 109