

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»

Мищенко Руслан Аманкелдиевич

На тему: «Сравнительный анализ оптоволоконных кабелей для распределённых  
акустических датчиков»

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

6B07104 – Electronic and Electrical Engineering

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»



**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**  
Заведующий кафедрой ЭТиКТ  
канд. техн. наук, ассоциированный  
профессор  
Е. Таштай  
" 28 " 05 2025 г.

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**  
к дипломному проекту

На тему: «Разработка летательного аппарата с системой автоматического возвращения на  
точку запуска»

Образовательная программа: 6B07104 – Electronic and Electrical Engineering

Выполнил  
Рецензент  
Заведующий кафедрой  
«Энергообеспечение, электропривод и  
электротехника»  
НАО «Алматинский университет  
энергетики и связи имени  
Гумарбека Даукеева», PhD  
Шыныбай Ж. С.  
" 28 " 05 2025 г.

Мищенко Р.А.  
Научный руководитель  
канд. техн. наук, ассоциированный  
профессор  
Телен Г.Б.  
" 28 " 05 2025 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра «Электроники, телекоммуникации и космических технологий»



УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой ЭТиКТ

Е.Таштай

28 10 2025 г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение дипломной работы**

Обучающемуся Мищенко Руслан Аманкелдиевич

Тема: Сравнительный анализ оптоволоконных кабелей для распределённых акустических датчиков

Утверждена приказом ректора университета № 26-П/Ө от «29» 01 2025 г.

Срок сдачи законченной работы «30» мая 2025г.

**Исходные данные к дипломной работе:**

1. Тип оптоволокна: одномодовое (диаметр сердцевины ~9  $\mu\text{m}$ , потери сигнала - около 0.2 дБ/км) и многомодовое (диаметр сердцевины - 50  $\mu\text{m}$  или 62.5  $\mu\text{m}$ , потери сигнала - около 3 дБ/км).
2. Эксплуатационные условия: механические нагрузки растяжения и сжатия, вибрации и динамические нагрузки)
3. Инструменты и программное обеспечение для моделирования: MatLab – для моделирования сигналов и оценки показателей работы одномодовых и многомодовых оптоволоконных кабелей.

**Краткое содержание дипломной работы:**

- а) Обзор литературы: современные технологии распределённых акустических датчиков и виды используемых оптоволоконных кабелей.
- б) Основные типы оптоволоконных кабелей (одно- и многомодовые) применяемые в системах РАД.
- в) Разработка симуляционных моделей в среде MATLAB

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. Снимки исходного кода для моделирования системы в среде MATLAB
2. Визуализация распространения сигнала в одномодовом и многомодовом кабеле.
3. Графики по механическому напряжению и деформации кабелей.

**Рекомендуемая основная литература:**

1. Иванов И.И., Петров П.П. Оптоволоконные технологии в системах мониторинга. Москва: Наука, 2020.
2. Smith, J., & Brown, L. Distributed Acoustic Sensing: Principles and Applications. Springer, 2019.
3. Zhang, Y., & Liu, H. Fiber Optic Sensors for Structural Health Monitoring. Elsevier, 2021.

5. Johnson, M. Comparative Analysis of Fiber Optic Cables in Acoustic Sensing. IEEE Sensors Journal, 2022.
6. Кузнецов С.С., Смирнова А.А. Распределённые акустические датчики и их применение в промышленности. Журнал «Инженерия и технологии», 2023.
7. Brown, T., & Davis, K. Advances in Fiber Optic Cable Design for Sensing Applications. Optical Fiber Technology, 2020.

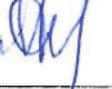
## ГРАФИК

подготовки дипломной работы (проекта)

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
Обзор литературы	4.01.2025 г. - 31.01.2025 г.	Выполнено
Основная часть	1.02.2025 г. - 1.03.2025 г.	Выполнено
Отчет дипломной работы и оформление ДР	1.03.2025 г. - 30.05.2025 г.	Выполнено

## Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу (проект) с указанием относящихся к ним разделов работы (проекта)

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Обсуждение темы дипломной работы	Старший преподаватель кафедры, м.т.н, Төлен Г.Б.	03.03.2025	
Основная часть	Старший преподаватель кафедры, м.т.н, Төлен Г.Б.	01.04.2025	
Нормоконтролер	Ассистент кафедры ЭТиКТ, м.т.н. Маткаримова А.А.	21.05.2025	

Научный руководитель \_\_\_\_\_ Төлен Г.Б.

Задание принял к исполнению студент \_\_\_\_\_ Мищенко Р.А.

Дата «04» февраля 2025

## АНДАТПА

Бұл дипломдық жұмыс салыстырмалы талдау одномодовых және многомодовых талшықты-оптикалық кабельдерді пайдаланатын жүйелерде бөлінген акустикалық мониторинг (РАД).

Қаралып, жұмыс істеу принциптері РАД, талдау әдістері рассеянного сигнал (Рэлеевский, Бриллюэновский, Рамановский), сондай-ақ, қолдану саласын, мұнай-газ, энергетика және көлік салаларында.

Зерттелген түйін сипаттамалары кабельдерді: геометрия, жоғалту, төзімділігі, механикалық жүктемелер. Практикалық бөлігін қамтиды модельдеу MATLAB пайдалану жағдайларын ескере отырып, талдау деформациялар және тарату сигнал.

Қорытындылар көрсетеді қолданылуы әр типті талшықтар үшін әр түрлі сценарийлерін мониторинг.

Нәтижелері пайдалы болуы мүмкін таңдау кезінде, жобалау және талшықты-оптикалық байланыс жүйелері үшін бақылау өте маңызды объектілері.

## АННОТАЦИЯ

Дипломная работа посвящена сравнительному анализу одномодовых и многомодовых оптоволоконных кабелей, используемых в системах распределённого акустического мониторинга (РАД).

Рассмотрены принципы работы РАД, методы анализа рассеянного сигнала (Рэлеевский, Бриллюэновский, Рамановский), а также сферы применения в нефтегазовой, энергетической и транспортной отраслях.

Исследованы ключевые характеристики кабелей: геометрия, потери, устойчивость к механическим нагрузкам. Практическая часть включает моделирование в MATLAB с учётом эксплуатационных условий, анализ деформаций и распространения сигнала.

Выводы демонстрируют применимость каждого типа волокна для различных сценариев мониторинга.

Результаты могут быть полезны при выборе и проектировании волоконно-оптических линий для систем контроля на критически важных объектах.

## ANNOTATION

The thesis is devoted to a comparative analysis of single-mode and multimode fiber optic cables used in distributed acoustic monitoring (DAS) systems.

The principles of DAS operation, methods of scattered signal analysis (Rayleigh, Brillouin, Raman), as well as applications in oil and gas, energy and transportation industries are considered.

The key characteristics of cables are investigated: geometry, losses, resistance to mechanical loads. The practical part includes modeling in MATLAB taking into account operational conditions, deformation and signal propagation analysis.

The conclusions demonstrate the applicability of each fiber type for different monitoring scenarios.

The results can be useful in the selection and design of fiber optic lines for monitoring systems at critical facilities.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
1 Теоретические основы распределённых волоконно-оптических систем мониторинга	10
1.1 Области применения распределённых датчиков	10
1.2 Основные принципы функционирования РАД	11
1.3 Методики регистрации и обработки акустических сигналов	14
1.4 Используемые типы рассеяния	19
1.5 Преимущества и ограничения распределённых систем	21
2 Классификация и сравнительный обзор оптоволоконных кабелей	24
2.1 Конструктивные особенности волокон: одномодовые и многомодовые	24
2.2 Механические и оптические характеристики кабелей	26
2.3 Условия эксплуатации: температура, вибрации, механические воздействия	31
3 Практическое применение SMF и MMF кабелей в DAS-системах геофизических исследований	34
3.1 Применение SMF-кабелей в DAS для геофизических задач	34
3.2 Интеграция машинного обучения в DAS-системы на SMF	37
3.3 Возможности и ограничения многомодовых кабелей (MMF) в DAS	38
4 Расчеты и моделирование	44
4.1 Цель и задачи моделирования	44
4.2 Исходные параметры и допущения	45
4.3 Теоретические основы моделирования	47
4.4 Методика численного моделирования	50
4.5 Результаты моделирования по относительной деформации	51
4.6 Результаты моделирования по механическому напряжению	53
4.7 Сравнительный анализ координат относительной деформации и механического напряжения	55
4.8 Обоснование выбора координат	57
4.9 Выводы по экспериментальной части	58
Заключение	59
Список использованной литературы	60
Приложение А	61
Приложение Б	65
Приложение В	68

## ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях развития технологий мониторинга технического состояния инженерных систем и объектов особое значение приобретают распределённые сенсорные системы, основанные на использовании оптоволоконных кабелей. Такие системы позволяют осуществлять непрерывный контроль протяжённых объектов в режиме реального времени, обеспечивая высокую точность и чувствительность обнаружения внешних воздействий.

Распределённые акустические датчики (РАД) являются одним из наиболее перспективных направлений в области промышленной диагностики и безопасности. Они находят широкое применение в таких отраслях, как нефтегазовая промышленность, энергетика, транспортная инфраструктура, оборонные и гражданские объекты. Ключевым элементом подобных систем является оптоволоконный кабель, выступающий не только как средство передачи сигнала, но и как чувствительный элемент на всей своей длине. От характеристик кабеля напрямую зависит эффективность всей системы: точность измерений, устойчивость к внешним факторам, помехозащищённость и надёжность в длительной эксплуатации.

В связи с этим актуальной является задача сравнительного анализа различных типов оптоволоконных кабелей, с целью выявления оптимального варианта для применения в системах распределённого акустического мониторинга. Особенно важно учитывать такие параметры, как тип волокна (одномодовое или многомодовое), механическая прочность, температурная устойчивость, потери сигнала, а также соответствие нормативным требованиям.

Дополнительно стоит отметить, что развитие технологий промышленного интернета вещей (IIoT) также усиливает роль распределённых сенсорных систем. Внедрение интеллектуальных систем мониторинга с удалённым сбором и анализом данных требует высокой надёжности передающей среды, в роли которой всё чаще выступает оптоволоконный кабель. Это ещё раз подчёркивает актуальность темы настоящего исследования.

Целью данной работы является проведение сравнительного анализа технических характеристик оптоволоконных кабелей, применяемых в системах распределённого акустического контроля, с учётом их поведения в различных условиях эксплуатации и результатов моделирования.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- Провести анализ распределённых акустических датчиков, принципов их работы и области применения;
- Изучить конструктивные и оптические особенности одномодовых и многомодовых кабелей;
- Оценить влияние эксплуатационных факторов на характеристики волокон;
- Ознакомиться с действующими стандартами и нормативами в области волоконно-оптических линий;

- Выполнить моделирование поведения кабелей в среде COMSOL Multiphysics при различных условиях воздействия;
- Проанализировать результаты моделирования и обосновать выбор оптимального типа кабеля.

Объектом исследования являются оптоволоконные кабели, применяемые в распределённых сенсорных системах. Предметом исследования — технические характеристики и поведение различных типов волокон в условиях внешних нагрузок и помех.

Методологическая база исследования включает обзор научно-технической литературы, сравнительный и аналитический методы, а также методы компьютерного моделирования в программной среде COMSOL Multiphysics.

Структура дипломной работы состоит из четырёх глав. В первой главе представлен обзор распределённых систем мониторинга, их принципов работы и используемых типов кабелей. Вторая глава посвящена сравнительному анализу конструктивных и оптических характеристик волоконно-оптических линий. В третьей главе описано построение моделей кабелей и проведение моделирования. Четвёртая глава содержит интерпретацию результатов моделирования, формирование таблиц сравнения и выводов по выбору наиболее эффективного типа кабеля.

# 1 Теоретические основы распределённых волоконно-оптических систем мониторинга

## 1.1 Области применения распределённых датчиков

Распределённые акустические датчики (РАД) применяются в мониторинге протяжённых объектов, обеспечивая непрерывное пространственное покрытие. Это позволяет выявлять нарушения в режиме реального времени, что делает технологию особенно востребованной в критически важных инфраструктурах [2], [11].

В нефтегазовой отрасли РАД позволяют отслеживать состояние трубопроводов, обнаруживать утечки, вмешательства и деформации. Системы устойчивы к внешним условиям и могут использоваться в подземных и подводных трассах [5]. Точность мониторинга зависит от прокладки кабеля, типа оболочки и алгоритмов анализа [6], [13].

В транспорте технологии РАД применяются для контроля рельсов, туннелей и состояния контактной сети. Особенно эффективны они в высокоскоростных системах, где важно раннее обнаружение дефектов [14].

В энергетике волоконно-оптические линии обеспечивают контроль температуры и напряжений на ЛЭП и подстанциях, устойчивы к электромагнитным помехам и надёжны в эксплуатации [3], [12].

Для охраны периметров РАД позволяют фиксировать перемещения, попытки проникновения, деформации ограждений, работая круглосуточно и без потребления энергии вдоль трассы [7].

В строительстве и инфраструктуре оптоволоконные сенсоры используются для диагностики состояния мостов, тоннелей, опор зданий, позволяя предотвратить разрушения за счёт раннего обнаружения отклонений [1], [10].

Таблица 1.1 – Области применения распределённых акустических датчиков

Тип объекта	Цель мониторинга	Тип воздействий	Результат
Трубопроводы	Обнаружение утечек, механических повреждений	Акустические сигналы, вибрации	Предупреждение аварий и утечек
Железнодорожные пути	Контроль состояния рельсов, прохода поездов	Механические колебания, удары	Раннее выявление дефектов, безопасность движения

Энергетические линии	Контроль температуры и вибраций	Температурные колебания, напряжения	Предотвращение перегрева и поломок оборудования
Охраняемые периметры	Фиксация попыток проникновения	Микровибрации, движение	Повышение уровня безопасности
Строительные конструкции	Мониторинг деформаций и прочности	Механические сдвиги, трещины	Снижение риска обрушений

## 1.2 Основные принципы функционирования РАД

Функционирование распределённых акустических датчиков (РАД) основано на использовании волоконно-оптических линий связи в качестве чувствительных элементов, способных регистрировать изменения внешней среды вдоль всей своей длины. Эти системы обеспечивают детектирование механических, акустических и температурных воздействий за счёт интерпретации рассеянного оптического сигнала, отражённого от неоднородностей в структуре волокна [2], [11].

Основу работы РАД составляет генерация коротких лазерных импульсов, которые распространяются по оптоволоконному кабелю. При прохождении через волокно часть света взаимодействует с микро-деформациями и неоднородностями материала, что вызывает появление рассеянного излучения. Эта обратная волна, возвращающаяся к приёмнику, анализируется по временным и амплитудным характеристикам, что позволяет определить точное положение и характер внешнего воздействия [13].

Наиболее часто в распределённых системах применяются принципы рассеяния Рэля, Бриллюэна и Рамана. Каждый тип рассеяния обладает собственной чувствительностью к определённым параметрам внешней среды. Рассеяние Рэля используется для регистрации вибраций и акустических волн, Бриллюэновское — для измерения деформации и температуры, а Рамановское — преимущественно для высокоточного температурного мониторинга [3], [10], [12].

Общая схема построения распределённой системы акустического мониторинга представлена на рисунке 1.

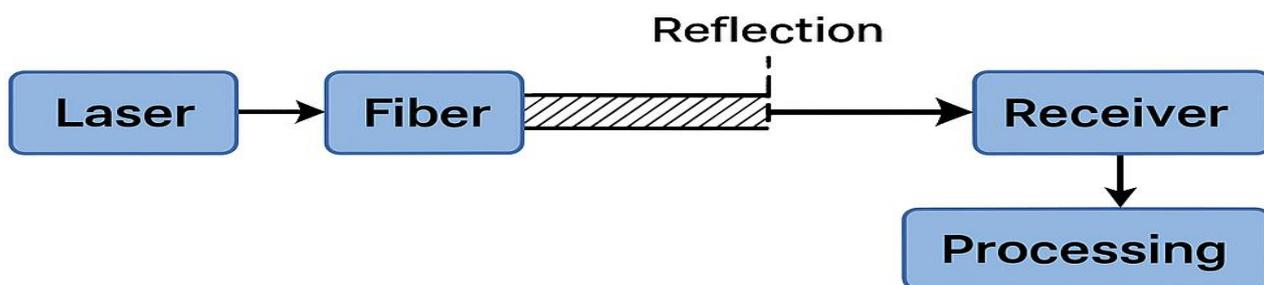
Важной характеристикой РАД является пространственное разрешение, определяемое длиной лазерного импульса и скоростью света в оптоволокне.

$$\Delta z = \frac{c \cdot \tau}{2n} \quad (1.1)$$

где:

$\Delta z$  — пространственное разрешение (м),  
 $c$  — скорость света в вакууме ( $\sim 3 \cdot 10^8$  м/с),  
 $\tau$  — длительность импульса (с),  
 $n$  — показатель преломления ( $\sim 1.46$  для стеклянного волокна).

При типичных значениях эта величина составляет от 1 до 10 метров, что позволяет локализовать воздействие с высокой точностью. Кроме того, дальность измерений в современных системах может достигать 40–70 км без промежуточных усилителей [11], [15].



## Structure of DAS system

Рисунок 1.1 - Структура системы РАД

Ключевым преимуществом РАД является их способность к работе в пассивном режиме, то есть без внешнего питания вдоль всей трассы. Это упрощает их интеграцию в сложные инженерные объекты и снижает эксплуатационные затраты. Однако для корректной работы требуется высококачественная оптика, стабильный источник света и надёжная система обработки сигнала [7].

Следует подчеркнуть, что функционирование распределённых акустических датчиков охватывает целый ряд смежных физических явлений, которые в совокупности обеспечивают высокую эффективность данных систем. Разнообразие применяемых методик и подходов к регистрации сигнала объясняется многообразием реальных условий эксплуатации и сложностью природы внешних воздействий [6].

Современные РАД используют адаптивные алгоритмы обработки сигнала, способные к самообучению и фильтрации помех. Благодаря этому удаётся не только повысить надёжность системы, но и минимизировать количество ложных срабатываний. Программное обеспечение, применяемое в системах РАД, играет роль интеллектуального слоя, формирующего аналитическую модель объекта мониторинга на основе поступающих данных [2], [13].

Кроме того, стоит отметить, что эффективность РАД напрямую зависит от качества проектирования всей системы. Даже при использовании высококласного оборудования результат будет далёк от оптимального, если не учтены особенности трассы прокладки кабеля, внешней среды, уровня вибраций,

температурных перепадов и прочих факторов. В связи с этим крайне важно использовать инструменты численного моделирования, такие как COMSOL Multiphysics, уже на этапе проектирования, чтобы заранее оценить возможные режимы работы и надёжность системы в конкретных условиях эксплуатации [15].

Кроме физико-технических особенностей, важным направлением развития распределённых систем является обеспечение их масштабируемости и универсальности. РАД должны быть способны адаптироваться к различным условиям эксплуатации без необходимости полной реконфигурации системы. Это требует особого внимания к выбору параметров системы, в том числе длине волны излучения, мощности источника, режиму работы приёмника и способу организации обработки сигнала.

Также существенным фактором является надёжность компонентов, особенно в условиях удалённых объектов или сложного доступа. В системах РАД часто используются компоненты с повышенным ресурсом службы, которые рассчитаны на работу в течение десятков лет без технического обслуживания. Это особенно важно для объектов, расположенных в труднодоступных районах, например, в условиях Арктики или в горной местности.

Особый интерес в последние годы представляет интеграция РАД с другими сенсорными платформами, такими как тепловизоры, инфракрасные датчики и даже беспилотные летательные аппараты. Совместное использование данных из различных источников позволяет значительно повысить точность принятия решений и обеспечить всестороннюю диагностику технического состояния объекта. Такие гибридные системы представляют собой перспективное направление в рамках концепции интеллектуального мониторинга и цифровых двойников.

Параметры, влияющие на точность и эффективность функционирования РАД, приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Влияние параметров на работу распределённой акустической системы

Параметр	Влияние на работу РАД	Комментарий
Тип волокна	Определяет дальность и чувствительность	Одномодовое – для дальних линий, многомодовое – для локальных сетей
Температурный режим	Изменяет характеристики рассеяния	Влияет на точность измерений; требует калибровки
Качество оболочки	Защищает от механических повреждений	Низкое качество – риск поломок и деградации сигнала

Тип рассеяния	Зависит от задачи мониторинга	Рэлеевское – для вибраций, Бриллюэновское – для деформаций
Пространственное разрешение	Определяет точность локализации события	Чем короче импульс – тем выше точность, но ниже дальность

### 1.3 Методики регистрации и обработки акустических сигналов

Эффективность работы РАД во многом зависит от методик, применяемых для регистрации и последующей обработки сигналов. Эти методики определяют точность, разрешающую способность и надёжность всей системы. Современные подходы ориентированы на комплексный анализ волоконно-оптического канала и применяемых технологий интерпретации отражённого сигнала.

#### 1.3.1 Характеристики акустических сигналов

Акустические сигналы, регистрируемые в системах распределённого мониторинга, представляют собой механические волны, распространяющиеся в твёрдых телах, жидкостях или газах. В контексте распределённых акустических датчиков (РАД) наибольший интерес представляют упругие волны, возникающие в результате механических воздействий на защищаемый или контролируемый объект [6].

К основным характеристикам акустических сигналов, имеющим значение для их регистрации и анализа, относятся амплитуда, частота, фаза, длительность, энергия и форма волны. Амплитуда определяет интенсивность сигнала и позволяет судить о мощности источника.

$$E = \int_0^T A^2(t) dt \quad (1.2)$$

где:

$E$  — энергия акустического сигнала;

$A(t)$  — амплитуда сигнала во времени;

$T$  — длительность сигнала.

Частота указывает на характер возбуждающего воздействия: низкие частоты, как правило, связаны с крупными механическими процессами (вибрации, удары), тогда как высокочастотные колебания могут быть вызваны резонансными или акустическими эффектами [3].

В практической реализации систем распределённого мониторинга особую ценность представляет количественная оценка характеристик регистрируемых сигналов. Знание диапазонов частот, амплитуд и других параметров позволяет

корректно подбирать оборудование, настраивать фильтры и интерпретировать получаемые данные. В таблице 1.3 приведены типовые значения характеристик акустических сигналов, зафиксированных в различных сценариях применения РАД.

Таблица 1.3 – Типовые характеристики акустических сигналов в системах РАД

Параметр	Типовое значение	Комментарий
Диапазон частот	1 Гц – 10 кГц	Позволяет фиксировать как низкочастотные вибрации, так и импульсы
Амплитуда колебаний	0.1 – 10 мкм	Зависит от источника и расстояния до него
Продолжительность сигнала	1 мс – 10 с	Импульсы короткие, вибрации могут быть длительными
Чувствительность волокна	порядка 1 нё	При интерферометрии и использовании рассеяния Рэлея
Пространственное разрешение	1 – 10 м	Определяется длиной импульса
Максимальная дальность	до 70 км	Без усилителей, на качественном волокне
Уровень шума	до -100 дБ	Зависит от аппаратного комплекса
Температурный диапазон	от -40 до +80 °С	При наличии соответствующей оболочки

Форма волны и её спектральный состав играют важную роль при классификации источников сигнала. Например, вибрации от проходящего поезда имеют чётко выраженный гармонический спектр, тогда как сигнал от удара или трещины характеризуется резким фронтом и широким диапазоном частот. Длительность сигнала также позволяет различать кратковременные импульсные воздействия и длительные вибрационные нагрузки.

Помимо вышеперечисленных характеристик, важное значение имеют направленность и затухание сигнала при распространении в среде. В различных

материалах акустические волны затухают с разной скоростью, что влияет на дальность их обнаружения. Кроме того, сигнал может отражаться от границ и неоднородностей, претерпевая многократные переотражения, что усложняет его интерпретацию [11].

В распределённых сенсорных системах фиксируются не только прямые акустические воздействия, но и вторичные сигналы, возникающие вследствие взаимодействия внешнего воздействия с конструкцией. Это может быть вибрация в ответ на шаги, звук при копании, или изменение напряжения в конструкции под нагрузкой. Всё это требует комплексного подхода к анализу сигнала и его классификации [2].

### 1.3.2 Методы регистрации акустических сигналов

Регистрация акустических сигналов в распределённых волоконно-оптических системах представляет собой один из ключевых этапов, определяющих эффективность и точность всей системы мониторинга. Методы регистрации основаны на фиксации изменений оптического сигнала, возникающих под действием акустических волн, деформаций или других механических возмущений вдоль кабеля [11].

Наиболее распространённой технологией, применяемой для регистрации акустических сигналов, является DAS (Distributed Acoustic Sensing) – система распределённого акустического зондирования. Принцип действия DAS базируется на измерении сдвига фазы обратного рассеянного сигнала Рэлея. При этом система способна фиксировать изменения с высоким пространственным и временным разрешением в режиме реального времени [13].

DAS-системы регистрируют акустические колебания путём анализа изменений интерференционной картины, образованной когерентным излучением, прошедшим через оптоволоконную среду. Чувствительность таких систем позволяет выявлять как крупномасштабные вибрации (например, проход техники или движения поездов), так и слабые сигналы, вызванные шагами, копанием или вибрациями в инженерных конструкциях [5].

Альтернативой фазочувствительным системам являются интерферометрические методы регистрации. Они используют принципы оптической интерференции для оценки изменения фазы проходящего или отражённого света. Классическим примером является интерферометр Майкельсона, в котором даже малейшие изменения длины оптического пути преобразуются в фазовые сдвиги, регистрируемые на детекторе [3]. Чувствительность интерферометрических систем определяется фазовым сдвигом, возникающим в результате изменения длины оптического пути. Этот фазовый сдвиг выражается через следующую зависимость:

$$\delta\phi = \frac{2\pi nL}{\lambda} \quad (1.3)$$

где:

$\delta_\phi$  — фазовый сдвиг;  
 $n$  — показатель преломления;  
 $L$  — длина волокна;  
 $\lambda$  — длина волны.

Также активно используется метод когерентного детектирования, при котором принимаемый сигнал сравнивается с эталонным (опорным) когерентным лазерным импульсом. Это позволяет точно фиксировать фазовые изменения, вызванные микродеформациями волокна. Такие системы обладают высокой точностью и помехоустойчивостью, особенно при работе в условиях протяжённых трасс [12].

В современных РАД-системах возможно сочетание различных методов регистрации в рамках одного устройства, что позволяет повысить чувствительность и гибкость системы. Например, DAS может комбинироваться с системами на основе рассеяния Бриллюэна для одновременного контроля акустических и температурных возмущений. На рисунке 3 представлена обобщённая классификация методов регистрации в распределённых сенсорных системах.

Выбор метода регистрации зависит от задач мониторинга, условий эксплуатации, требований к разрешению и дальности. Например, для охраны периметра и обнаружения шагов чаще используется DAS, тогда как при контроле микродеформаций в сооружениях эффективнее использовать интерферометрические схемы. В условиях необходимости высокоточного позиционирования и контроля малых воздействий преимущество отдается когерентным детекторам.

Таким образом, методы регистрации сигналов в РАД формируют основу всей сенсорной системы. Их развитие позволяет значительно расширить области применения распределённых датчиков, а также повысить точность, надёжность и скорость реагирования систем мониторинга.

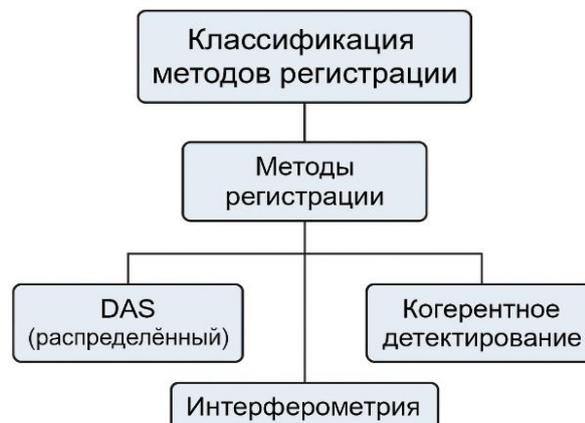


Рисунок 1.2 - Классификация методов регистрации

### 1.3.3 Принципы цифровой обработки акустических сигналов

Цифровая обработка акустических сигналов в системах распределённого мониторинга является завершающим этапом преобразования первичной информации, полученной от оптоволоконного датчика, в осмысленные диагностические данные. Качественно реализованная обработка позволяет не только локализовать события, но и классифицировать их по степени значимости и источнику происхождения [13].

Первым этапом обработки является фильтрация сигнала. Она включает в себя подавление шумов и выделение полезной составляющей. Применяются как линейные методы (частотные фильтры нижних, верхних и полосовых частот), так и адаптивные алгоритмы, способные настраиваться на характер конкретного сигнала в условиях переменной среды [6].

Следующим шагом выступает анализ временной и частотной структуры сигнала. Преобразование Фурье (FFT) позволяет определить спектральный состав, а вейвлет-анализ — локализовать временные особенности сигналов, особенно полезные при импульсных и нерегулярных возмущениях. Эти методы обеспечивают более точную идентификацию и оценку параметров внешнего воздействия [3], [12].

Для дальнейшего повышения эффективности применяются методы машинного обучения и интеллектуальной обработки. К примеру, сверточные нейронные сети (CNN) успешно используются для классификации событий: шаги, удары, вибрации, трещины и т.д. Предобработка сигнала включает нормализацию, подавление выбросов и извлечение признаков (features), которые подаются на вход моделей классификации [2].

Также важной задачей является компенсация нестабильностей, связанных с источником лазерного излучения, температурными дрейфами и механическими изменениями в трассе волокна. Это реализуется за счёт динамической калибровки и системы автоматического контроля параметров фона. Многие современные РАД-системы используют режим фоновый мониторинг, позволяющий динамически подстраивать чувствительность системы.

Обработка может производиться как централизованно — на сервере в диспетчерском центре, так и на распределённых модулях, расположенных вблизи объекта. Второй подход снижает задержку сигнала, позволяет работать в условиях сбоев связи и повышает живучесть всей сети [5]. На рисунке 4 схематично представлена архитектура типичной системы цифровой обработки сигналов в распределенной сенсорной сети.

Таким образом, цифровая обработка акустических сигналов представляет собой ключевой компонент интеллектуальной системы мониторинга, определяющий уровень её точности, надёжности и адаптивности. Современные подходы, базирующиеся на комплексной фильтрации, спектральном анализе и методах искусственного интеллекта, позволяют обеспечить эффективную работу РАД в широком спектре реальных задач.

Таким образом, цифровая обработка акустических сигналов представляет собой ключевой компонент интеллектуальной системы мониторинга, определяющий уровень её точности, надёжности и адаптивности. Современные подходы, базирующиеся на комплексной фильтрации, спектральном анализе и методах искусственного интеллекта, позволяют обеспечить эффективную работу РАД в широком спектре реальных задач.

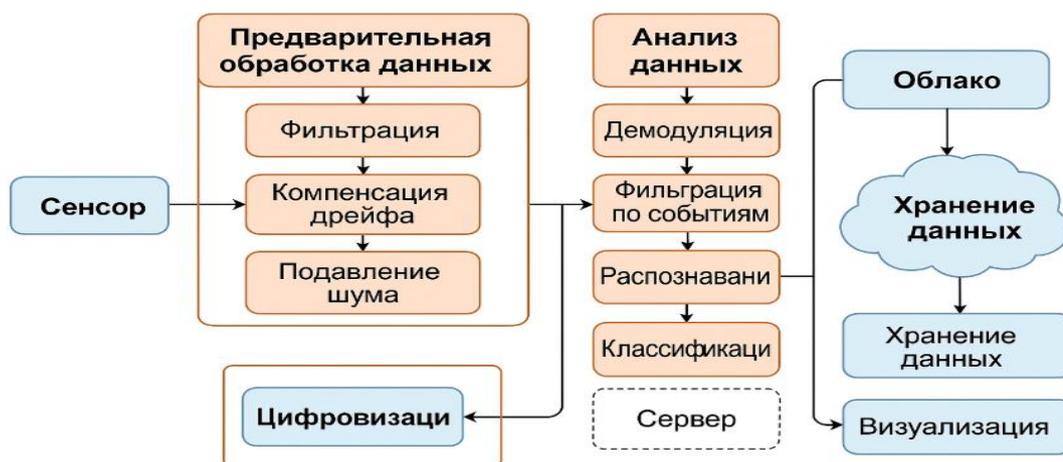


Рисунок 1.3 -Архитектура обработки сигнала

#### 1.4 Используемые типы рассеяния

В основе работы распределённых волоконно-оптических систем лежат явления рассеяния света в оптическом волокне. Наиболее широко в практике применяются три типа рассеяния: Рэля, Бриллюэна и Рамана. Каждый из них обладает уникальными физическими свойствами и используется в зависимости от целевой задачи мониторинга [1].

Рассеивание Рэля обусловлено взаимодействием световой волны с микроскопическими неоднородностями внутри волокна, что позволяет регистрировать механические колебания и вибрации. Эта разновидность рассеяния применяется в системах DAS, обеспечивая высокое пространственное разрешение и чувствительность к акустическим воздействиям [2].

Бриллюэновское рассеяние возникает вследствие взаимодействия света с акустическими фонами. Оно характеризуется изменением частоты сигнала в зависимости от температуры и механических напряжений в волокне. Этот эффект используется в распределённых системах BOTDA и BOTDR, предназначенных для мониторинга температуры и деформаций [3].

Рамановское рассеяние основано на взаимодействии фотонов с колебательными модами молекул. Рассеянный сигнал делится на компоненты Stokes и Anti-Stokes, соотношение между которыми позволяет проводить точное измерение температуры. Системы DTS, использующие данный эффект,

применяются в энергетике, на трубопроводах и в геотехническом мониторинге [4].

Сравнительные характеристики видов рассеяния представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Сравнение типов рассеяния

Параметр	Рэля	Бриллюэновское	Рамановское
Природа рассеяния	Обратное отражение от неоднородностей	Взаимодействие с акустическими фононами	Взаимодействие с молекулярными колебаниями
Тип сигнала	Без сдвига частоты	Со сдвигом частоты	Stokes и Anti-Stokes компоненты
Измеряемые параметры	Вибрации, акустика	Температура, деформация	Температура
Дальность действия	До 50 км	До 100 км	До 15–30 км
Пространственное разрешение	Высокое (до 1 м)	Среднее (до 1–5 м)	Низкое (до 5–10 м)
Сложность реализации	Средняя	Высокая	Средняя
Преимущества	Высокая чувствительность, быстрое срабатывание	Точность, чувствительность к деформациям	Хорошая температурная точность
Ограничения	Чувствительность к шуму	Сложное оборудование, высокая стоимость	Ограниченная дальность, слабый сигнал

Распределённые волоконно-оптические технологии находят широкое применение в различных отраслях — от энергетики до транспорта и промышленной безопасности. Они обеспечивают непрерывный мониторинг, высокую чувствительность к внешним воздействиям и возможность протяжённого охвата объектов. К числу основных преимуществ относят надёжность, устойчивость к помехам, возможность мониторинга в режиме

реального времени и длительный срок службы при правильной эксплуатации. Однако системы РАД также имеют ряд ограничений: необходимость в прецизионной установке, чувствительность к внешнему шуму, высокая стоимость оборудования и сложность обработки сигналов. Тем не менее, при надлежащем проектировании эти ограничения компенсируются функциональными возможностями.

## 1.5 Преимущества и ограничения распределённых систем

Современные инженерные задачи, связанные с мониторингом и контролем протяжённых объектов, требуют высокой точности, достоверности и оперативности получения данных. В этом контексте распределённые оптоволоконные системы мониторинга (РАД) выступают в качестве эффективного инструмента, способного решать широкий спектр задач при минимизации инфраструктурных затрат и повышенной надёжности эксплуатации. Эти системы нашли широкое применение в нефтегазовой отрасли, энергетике, строительстве, а также в системах обеспечения безопасности стратегических объектов и территорий.

РАД основаны на принципе регистрации изменений параметров светового сигнала, отражённого от микроскопических неоднородностей внутри волокна, возникающих под воздействием внешних факторов. Использование оптоволоконной среды позволяет не только передавать данные на большие расстояния с минимальными потерями, но и использовать саму волоконную среду в качестве чувствительного элемента. Таким образом, единый кабель выполняет сразу две функции — транспортную и сенсорную.

К числу основных достоинств распределённых систем относится возможность непрерывного измерения параметров по всей длине кабельной линии. В отличие от традиционных точечных датчиков, РАД обеспечивают пространственно равномерное покрытие, что особенно важно при мониторинге протяжённых объектов, таких как трубопроводы, ЛЭП, тоннели или мостовые конструкции. Отсутствие необходимости в размещении большого количества оборудования вдоль контролируемой зоны значительно упрощает монтаж, снижает стоимость технического обслуживания и минимизирует вероятность отказа отдельных узлов.

Одним из важнейших преимуществ РАД является их пассивность: оптоволоконный кабель не требует питания, а значит — полностью взрывобезопасен и может эксплуатироваться в сложных или опасных условиях. Кроме того, такие системы устойчивы к электромагнитным воздействиям и обладают высокой помехозащищённостью, что делает их применимыми в условиях повышенной индустриальной нагрузки.

Тем не менее, распределённые системы имеют ряд объективных ограничений. Во-первых, высокие требования к точности источников света и приёмных систем делают оборудование дорогостоящим. Во-вторых, сигнал,

получаемый от рассеяния, как правило, слаб и требует высокочувствительных приёмников и сложной обработки. Во многих случаях необходимо использование алгоритмов машинного обучения, цифровой фильтрации и математического моделирования, что увеличивает вычислительную нагрузку.

Также необходимо учитывать влияние температурных и механических дрейфов, что особенно критично в длительных эксплуатационных циклах. В некоторых случаях требуется регулярная перекалибровка и технический аудит состояния системы. В дополнение, высокая стоимость проектирования и установки, особенно при использовании Бриллюэновского и Раманаовского рассеяния, может стать сдерживающим фактором при массовом внедрении.

Несмотря на это, при правильно подобранной архитектуре, РАД позволяют минимизировать риски, связанные с утечками, перегревом, деформациями и несанкционированным вмешательством. Их интеграция в цифровые платформы управления объектами открывает дополнительные перспективы в направлении предиктивной диагностики и цифровизации промышленной инфраструктуры.

Сравнительный анализ преимуществ и ограничений представлен в таблице 1.5 ниже:

Таблица 1.5 – Сводный анализ характеристик распределённых систем мониторинга

Критерий	Преимущества	Ограничения
Пространственный охват	Измерения по всей длине волокна	Снижение точности на крайних участках
Надёжность	Отсутствие активных элементов на линии	Необходимость в высокоточной аппаратуре
Безопасность	Пассивная структура, отсутствие питания	Чувствительность к механическим повреждениям
Устойчивость	Работа в сложных условиях, отсутствие ЭМВ-помех	Подверженность температурным дрейфам
Обслуживание	Минимальные затраты на техническое сопровождение	Сложность первичной установки и настройки

## 2 Классификация и сравнительный обзор оптоволоконных кабелей

### 2.1 Конструктивные особенности волокон: одномодовые и многомодовые

Волоконно-оптические кабели являются неотъемлемым элементом в построении современных распределённых сенсорных систем мониторинга. Эти кабели выполняют двойную функцию: они не только передают оптический сигнал, но также непосредственно участвуют в процессе измерения, выступая в роли чувствительного элемента, реагирующего на изменения физических условий вдоль своей протяжённости. Такая конструктивная особенность обуславливает высокие требования к качеству и характеристикам оптоволокна, поскольку от них напрямую зависят параметры точности, стабильности, надёжности и долговечности всей распределённой системы.

Волоконная технология включает два основных типа волокон — одномодовые (SMF) и многомодовые (MMF). Каждый из них обладает характерными физическими, конструктивными и функциональными отличиями, определяющими их применимость в различных условиях эксплуатации. Одномодовое волокно, как правило, имеет сердцевину диаметром около 8–10 микрон и поддерживает распространение только одной моды света. Благодаря этому достигается крайне низкий уровень межмодовой дисперсии, что особенно важно для обеспечения устойчивой передачи сигнала на большие расстояния. Одномодовые волокна характеризуются высокой фазовой стабильностью, что делает их незаменимыми в задачах, требующих прецизионного измерения малых изменений, таких как акустический или деформационный мониторинг.

Применение одномодовых волокон целесообразно в распределённых системах типа BOTDA, BOTDR, DTS и DAS, где ключевыми критериями выступают высокая чувствительность, способность к регистрации динамических процессов и стабильность сигнала в условиях длительной эксплуатации. Кроме того, эти волокна демонстрируют меньшие потери при передаче и обладают лучшей совместимостью с когерентными методами регистрации.

В отличие от них, многомодовые волокна имеют увеличенный диаметр сердцевины — от 50 до 62,5 микрон — и поддерживают распространение нескольких мод одновременно. Это упрощает согласование с источником света и соединительными элементами, снижает требования к точности центровки и позволяет использовать менее дорогостоящее оборудование. Многомодовые волокна успешно применяются в локальных распределённых системах с относительно короткими линиями связи, а также в тех случаях, когда точность измерения не является критически важной.

Однако ограничениями многомодовых волокон являются высокая межмодовая дисперсия и чувствительность к отклонениям в профиле показателя преломления. Это накладывает ограничения на дальность их использования и может вызывать искажения при передаче импульсов. Несмотря на это, такие

волокна часто находят применение в распределённых системах второго уровня, вспомогательных линиях и задачах, ориентированных на мониторинг ограниченных зон.

Так же сравнение ключевых технических и эксплуатационных параметров одномодовых и многомодовых волокон представлено в таблице 5. Она наглядно демонстрирует отличия между типами волокон, акцентируя внимание на их преимуществах, ограничениях и рекомендуемых сценариях использования.

Таблица 2.1 – Сравнение характеристик одномодовых и многомодовых волокон

Характеристика	Одномодовое волокно	Многомодовое волокно
Диаметр сердцевины	8–10 мкм	50–62,5 мкм
Количество поддерживаемых мод	Одна мода	Несколько мод
Дисперсия сигнала	Низкая, стабильный отклик	Высокая, модовые искажения
Максимальная дальность передачи	До 100 км и более	До 2 км
Чувствительность к рассеянию	Высокая (подходит для РАД)	Низкая, ограниченное применение
Стоимость оборудования	Выше	Ниже
Совместимость с оборудованием РАД	Полная	Ограниченная
Сложность установки	Требует прецизионной стыковки	Менее критично к сборке

При проектировании системы мониторинга необходимо учитывать как оптические, так и механические параметры волокна. Сюда входят такие показатели, как радиус изгиба, устойчивость к микродефектам, прочность оболочки, влагозащита и стойкость к экстремальным температурам. Волокна, эксплуатируемые в сложных климатических или механически агрессивных условиях, как правило, снабжаются армирующими слоями, гелевыми наполнителями и внешними защитными оболочками.

Важно подчеркнуть, что конструкция волоконно-оптических кабелей должна учитывать не только текущие требования, но и потенциальные условия эксплуатации, которые могут возникнуть в процессе жизненного цикла системы. Например, в условиях длительной вибрационной нагрузки или регулярных температурных перепадов повышаются риски микрповреждений, что влечёт за

собой деградацию сигнала и необходимость замены участка кабельной линии. Следовательно, надёжность волокна — это не только вопрос материалов, но и общей архитектуры кабеля, включающей слои защиты, буферизацию и армирование.

Кроме того, в системах, ориентированных на промышленный мониторинг, всё чаще рассматриваются гибридные конфигурации, в которых одномодовые и многомодовые волокна объединяются в едином кабеле для выполнения разноцелевых задач. Такая интеграция позволяет одновременно отслеживать динамические и статические параметры, а также повысить гибкость системы в отношении источников оптического излучения и схем обработки. Особенно актуальна такая концепция для объектов с ограниченным доступом, где важно свести к минимуму количество отдельных линий и повысить отказоустойчивость.

На выбор волокна влияет и тип датчика, реализуемого в системе: например, в распределённых системах температурного контроля оптимальны одномодовые волокна, так как они обеспечивают более точную корреляцию сигналов. В противоположность этому, в системах контроля утечек или вибрационного воздействия могут использоваться и многомодовые волокна, если бюджет проекта ограничен, а расстояние между контрольными точками невелико.

Таким образом, конструктивные особенности волокна следует рассматривать не изолированно, а в совокупности с проектными параметрами, характером измеряемых воздействий и предполагаемой архитектурой всей сенсорной системы. Подход, ориентированный на системное проектирование, позволяет оптимизировать затраты, повысить устойчивость к сбоям и адаптировать систему под конкретные условия эксплуатации.

## **2.2 Механические и оптические характеристики кабелей**

### **2.2.1 Оптические параметры**

Оптические параметры волоконно-оптических кабелей играют ключевую роль в обеспечении стабильности и точности работы распределённых сенсорных систем. Именно от характеристик распространения сигнала по оптическому волокну зависит не только эффективность детектирования внешних воздействий, но и качество интерпретации измеряемых данных в целом. Каждый параметр волокна вносит вклад в поведение сигнала, а потому должен тщательно анализироваться при выборе компонентов для конкретного технического применения. Среди наиболее значимых параметров можно выделить коэффициент затухания, дисперсию, числовую апертуру, длину волны передачи, тип профиля показателя преломления, а также модовую структуру волокна [1].

Коэффициент затухания характеризует потери мощности оптического сигнала при его распространении по длине волокна. В технической практике этот

параметр выражается в децибелах на километр (дБ/км) и зависит от длины волны, типа волокна, наличия примесей и качества стеклянной заготовки. Например, стандартные одномодовые волокна демонстрируют значения около 0,2 дБ/км при длине волны 1550 нм. Низкий уровень потерь критичен для построения длинных измерительных трасс, особенно в распределённых системах мониторинга, где длина волокна может достигать десятков километров без промежуточных усилителей [2]. Потери мощности оптического сигнала при его распространении вдоль волокна могут быть количественно описаны экспоненциальной моделью затухания. Эта зависимость выражается следующим образом:

$$P(z) = P_0 \cdot e^{-\alpha z} \quad (2.1)$$

Где:

$P(z)$  — мощность сигнала на расстоянии  $z$ ,

$P_0$  — начальная мощность,

$\alpha$  — коэффициент затухания (в Нп/км),

$z$  — длина волокна (км).

Дисперсия, как второй фундаментальный параметр, представляет собой явление, при котором разные длины волн распространяются с различной скоростью, что приводит к расширению и искажению передаваемых оптических импульсов. Различают хроматическую и модовую дисперсию. В DAS-системах важно минимизировать влияние дисперсии, поскольку она напрямую влияет на пространственное разрешение системы и возможность точного позиционирования возмущений [3]. В связи с этим в большинстве распределённых технологий применяются низкодисперсионные одномодовые волокна, обладающие высокой устойчивостью к искажениям формы сигнала.

Числовая апертура отражает способность волокна собирать свет от источника и является важным параметром при сопряжении с лазерными передатчиками. Высокая апертура позволяет увеличить энергию вводимого сигнала и тем самым повысить уровень рассеянного сигнала, используемого при анализе внешних воздействий. Тем не менее, при работе с многомодовыми волокнами чрезмерно высокая апертура может привести к модовым искажениям и усложнению анализа сигнала [4]. Числовая апертура (NA) рассчитывается по следующей формуле:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.2)$$

Где:

$NA$  — числовая апертура,

$n_1$  — показатель преломления сердцевины,

$n_2$  — показатель преломления оболочки.

Модовая структура определяет, сколько и какие моды распространяются по волокну. В одномодовом волокне присутствует только основная мода, что обеспечивает высокую фазовую стабильность и однозначность сигнала. Это особенно важно в когерентных системах регистрации, чувствительных к малейшим фазовым сдвигам. В многомодовых волокнах присутствует множество мод, каждая из которых имеет собственную скорость распространения, что приводит к эффекту модовой дисперсии и ограничивает применение таких волокон в высокоточных системах [5].

Профиль показателя преломления — ещё один критичный параметр. Существуют два основных профиля: ступенчатый и градиентный. Ступенчатый профиль характеризуется резким переходом между сердцевиной и оболочкой, в то время как градиентный имеет плавное изменение показателя преломления, что способствует снижению модовой дисперсии. В распределённых системах, где приоритетом является точность временного анализа, градиентные профили могут быть предпочтительнее, несмотря на несколько большую сложность в изготовлении и согласовании компонентов [6].

Таким образом, комплексное понимание и правильный выбор оптических параметров позволяет оптимизировать конфигурацию волоконно-оптической линии под специфические требования задачи. В таблице 6 представлено обобщённое сравнение ключевых характеристик одномодовых и многомодовых волокон, включающее значения коэффициента затухания, уровней дисперсии, длины волны передачи и числовой апертуры.

Таблица 2.2 — Сравнение оптических параметров одномодовых и многомодовых волокон

Параметр	Одномодовое волокно	Многомодовое волокно
Коэффициент затухания (дБ/км)	0,2 – 0,4	0,5 – 3,5
Хроматическая дисперсия (пс/нм·км)	16 – 22	Высокая межмодовая дисперсия
Рабочая длина волны (нм)	1310 / 1550	850 / 1300
Числовая апертура	0,10 – 0,14	0,20 – 0,29
Модовая структура	Одна мода	Множество мод
Фазовая стабильность	Высокая	Низкая
Применение	Дальнодействующие и высокоточные системы	Локальные и экономичные решения

Дополнительно стоит учитывать и влияние внешних факторов на изменение оптических характеристик волокна в процессе его эксплуатации. Например, при длительном воздействии внешнего механического давления, микровибраций или при циклических температурных изменениях может происходить деградация структуры сердцевины и оболочки, что проявляется в

увеличении коэффициента затухания или смещении центральной длины волны передачи. Для распределённых систем мониторинга, функционирующих в сложных промышленных условиях, особенно важно прогнозировать такие изменения и закладывать дополнительные запасы чувствительности и стабильности на этапе проектирования [7].

Современные волоконно-оптические системы всё чаще разрабатываются с учётом интеграции интеллектуальных алгоритмов анализа сигналов, использующих данные не только об абсолютных значениях оптических параметров, но и об их изменении во времени. Это позволяет не только детектировать факт воздействия, но и оценить его динамику, направление и потенциальную причину. Таким образом, качество исходных оптических параметров волокна напрямую влияет на возможность применения современных методов машинного обучения и цифровой фильтрации в распределённых сенсорных системах [8].

### 2.2.2 Механические параметры

Механические параметры волоконно-оптических кабелей представляют собой совокупность характеристик, которые определяют их способность сохранять целостность и функциональность при воздействии внешних факторов. Эти параметры критичны для обеспечения стабильной и долговечной работы распределённых сенсорных систем, особенно в условиях повышенных механических нагрузок, изгибов, вибраций и температурных колебаний [1].

Одним из важнейших параметров является радиус минимального изгиба. Этот показатель определяет степень допустимого отклонения волокна от прямолинейной формы без существенной деградации сигнала. Как правило, для одномодовых волокон радиус изгиба составляет 10–30 мм, для многомодовых — 20–40 мм. Превышение допустимого радиуса может привести к увеличению затухания и, в крайних случаях, к повреждению волокна [2]. Минимальный радиус изгиба волокна зависит от его геометрических и оптических параметров и может быть выражен через приближённую формулу:

$$R_{min} = \frac{3D}{\pi \Delta n} \quad (2.3)$$

где:

$R_{min}$  — минимальный радиус изгиба,

$D$  — диаметр оболочки,

$\Delta n = n_1 - n_2$  — разность показателей преломления.

Прочность на растяжение определяет способность кабеля выдерживать осевые нагрузки, возникающие, например, при прокладке кабеля в грунте или при его натяжении в подвесных конструкциях. Значения варьируются в зависимости от конструкции кабеля: от 100 Н у простых волокон до 1500 Н у армированных кабелей. Дополнительная защита достигается за счёт включения

в конструкцию арамидных нитей, металлических элементов или композитных оболочек [3].

Механическая стойкость также определяется сопротивлением к сжатию и ударным нагрузкам. В распределённых системах, установленных на объектах с высокой подвижностью или вблизи источников вибрации, эта характеристика приобретает особую значимость. Повреждение внешней оболочки или деформация внутренней буферной трубки может нарушить передающую способность волокна и снизить чувствительность системы [4].

Дополнительным фактором надёжности являются климатические параметры: диапазон рабочих температур, устойчивость к воздействию влаги, УФ-излучению и агрессивным средам. Кабели, предназначенные для внешней прокладки, должны сохранять механические свойства при температурах от  $-40$  до  $+70$  °С и быть защищены от проникновения воды и загрязнений. В условиях высокой влажности или при подземной прокладке рекомендуется использовать кабели с гелевым заполнением и гидрофобной защитой [5].

В таблице 7 приведено сравнение механических параметров различных типов волоконно-оптических кабелей. Представленные данные позволяют провести анализ и выбрать оптимальный тип кабеля с учётом условий эксплуатации и задач распределённого мониторинга.

Таблица 2.3 — Сравнение механических характеристик волоконно-оптических кабелей

Параметр	Одномодовый кабель	Многомодовый кабель
Радиус изгиба, мм	10–30	20–40
Прочность на растяжение, Н	до 1500	до 1000
Сопротивление сжатию	Высокое	Среднее
Температурный диапазон, °С	$-40...+70$	$-20...+60$
Влагозащита	Герметичная оболочка, гелевое заполнение	Зависит от конструкции
Устойчивость к вибрациям	Повышенная	Средняя
Материал оболочки	Полиэтилен, полиуретан, армирующие элементы	ПВХ, полиэтилен

Особого внимания заслуживает влияние длительного хранения и транспортировки кабельной продукции на сохранение исходных механических свойств. Даже при соблюдении заводских стандартов качества возможно частичное нарушение структуры, например, из-за избыточной компрессии или перегрева в условиях хранения. Это особенно критично при использовании в ответственных объектах, таких как инфраструктура нефтегазового комплекса

или транспортные тоннели, где сбои могут повлечь значительные экономические потери [6].

Также следует учитывать, что механические параметры оказывают влияние на точность работы распределённой системы не только в момент повреждения, но и в нормальном режиме. Изменения в натяжении, изгибе или микровибрации волокна могут незначительно изменять оптические характеристики, что сказывается на фазовом сдвиге сигнала или его амплитудной составляющей. Следовательно, механическая устойчивость напрямую связана с параметрами чувствительности и порога обнаружения [7].

В современных разработках также находит применение концепция адаптивных оболочек, способных перераспределять внутреннее напряжение в ответ на локальные механические воздействия. Такие решения позволяют избежать резких перегрузок в конкретных точках кабельной линии и увеличить общий ресурс системы. Помимо прочего, активно исследуется тема самовосстанавливающихся оболочек с полимерной структурой, способной к частичной регенерации после микроповреждений. Это направление пока носит экспериментальный характер, однако в перспективе может стать важным элементом обеспечения надёжности распределённых волоконно-оптических систем в сложных инженерных условиях [8].

### **2.3 Условия эксплуатации: температура, вибрации, механические воздействия**

Условия эксплуатации волоконно-оптических кабелей оказывают существенное влияние на надёжность и эффективность распределённых сенсорных систем. Оптоволоконные линии, применяемые в промышленных, инфраструктурных и энергетических объектах, подвержены воздействию широкого спектра факторов окружающей среды. Наиболее значимыми из них являются температурные колебания, вибрационные воздействия и механическое напряжение, возникающее как при монтаже, так и при длительной эксплуатации [1].

Температурный диапазон, в пределах которого кабель должен сохранять свои оптические и механические характеристики, зависит от конструкции и применяемых материалов. Для большинства наружных и подземных кабелей рабочий диапазон составляет от  $-40$  до  $+70$  °С, однако для специализированных решений, используемых в условиях Крайнего Севера или вблизи источников тепловой энергии, применяются термостойкие оболочки и буферные материалы, способные выдерживать температуры до  $+90$  °С и выше [2]. Температурное расширение, деформация оболочек и изменения в оптических свойствах стекла при критических температурах могут привести к повышению коэффициента затухания и фазовым искажениям сигнала [3].

Вибрационные воздействия характерны для транспортной инфраструктуры, производственных помещений, машиностроения и объектов

энергетики. Длительная экспозиция к низко- и высокочастотным вибрациям может вызвать усталостные микрповреждения волокна, локальное смещение мод и нарушение когерентности сигнала. Современные кабельные решения используют амортизирующие элементы в конструкции (например, мягкие буферные трубки, гелевые наполнители) для гашения вибраций [4]. Особо чувствительные системы мониторинга, такие как DAS, требуют стабильной фазы сигнала, что дополнительно усиливает требования к устойчивости к вибрационному фону.

Механические воздействия включают сдавливание, изгиб, растяжение и удары, возникающие при прокладке кабеля, при его последующем обслуживании или в результате внешнего вмешательства. Повреждение оболочки или нарушение геометрии буферного слоя может существенно снизить ресурс кабеля и привести к ухудшению показателей передачи. Использование армирующих элементов, металлических и арамидных вставок, а также усиленных внешних оболочек позволяет существенно повысить устойчивость кабеля к внешним нагрузкам [5].

Особое внимание в современных разработках уделяется комплексной адаптации конструкции кабеля к предполагаемым условиям эксплуатации. На этапе проектирования учитываются не только экстремальные значения параметров, но и статистика по их цикличности, продолжительности и вероятности наступления. Это позволяет сформировать устойчивую архитектуру распределённой сенсорной системы, способную функционировать в агрессивной внешней среде без потери чувствительности и точности.

Таблица 2.4 — Влияние эксплуатационных условий на оптоволоконные кабели

Условие эксплуатации	Влияние на кабель	Инженерные решения/меры
Температурные искажения	Расширение и сжатие материалов, изменение коэффициента затухания, фазовые искажения сигнала	Применение термостойких оболочек, буферных слоёв, стабилизация температурного режима
Вибрационные эффекты	Усталостные микрповреждения, снижение чувствительности, потеря когерентности сигнала	Гелевое или амортизирующее заполнение, многослойные буферы, изоляция от вибрационных источников
Механические нагрузки (сжатие, растяжение, изгиб)	Разрывы волокна, трещины в оболочке, нарушение геометрии	Пользование армированных оболочек

Кроме стандартных условий эксплуатации, проектировщики распределённых систем также всё чаще ориентируются на так называемые сценарии экстремальных нагрузок, при которых кабель должен сохранять работоспособность даже при кратковременном выходе параметров за пределы нормативного диапазона. К таким условиям относятся, например, резкие температурные скачки при запуске промышленного оборудования, динамические удары при падении тяжёлых объектов, а также сейсмические колебания в геоактивных зонах. Оценка надёжности кабеля при таких условиях проводится на основе экспериментальных данных и моделирования поведения волокна при сверхнормативных нагрузках [6].

Также стоит отметить, что условия эксплуатации в реальных объектах редко являются статичными. Воздействия, оказываемые на волоконно-оптический кабель, часто носят циклический характер и могут существенно изменяться во времени в зависимости от режима работы объекта, климатических изменений или действий обслуживающего персонала. Поэтому для обеспечения длительной стабильности систем мониторинга важен не только выбор соответствующего типа кабеля, но и организация регулярного контроля состояния линий передачи и своевременного технического обслуживания [7].

Среди перспективных направлений в области адаптации кабельной инфраструктуры к условиям эксплуатации можно выделить развитие интеллектуальных оболочек и сенсорных покрытий, способных регистрировать параметры окружающей среды и самодиагностировать своё состояние. Это особенно актуально для систем, работающих в удалённых или труднодоступных регионах, где проведение постоянного физического контроля является экономически и технически затруднительным [8].

Дополнительно важно учитывать влияние сопутствующих факторов, таких как электромагнитные поля, химическая агрессия и воздействие ультрафиолетового излучения. Хотя они не являются механическими или температурными по своей природе, их совокупный эффект может существенно ослабить устойчивость оболочек и увеличить вероятность микрповреждений. В связи с этим современные стандарты проектирования волоконно-оптических систем всё чаще включают мультифакторные испытания, направленные на выявление комбинированного влияния различных факторов внешней среды на поведение волоконно-оптических кабелей [9].

## 3 Практическое применение SMF и MMF кабелей в DAS-системах геофизических исследований

### 3.1 Применение SMF-кабелей в DAS для геофизических задач

На практике одномодовое оптоволокно (SMF) демонстрирует высокую эффективность при реализации DAS-систем для вертикального сейсмического профилирования (VSP), особенно в задачах, связанных с мониторингом углеродных хранилищ, контролем геологических структур и микросейсмической регистрацией. Это подтверждается рядом полевых исследований, в которых SMF-кабели применялись в качестве сенсорных элементов в геофизических скважинах.

Одним из репрезентативных кейсов является проект Aquistore CO<sub>2</sub> Storage, в рамках которого SMF-кабель был закреплён за обсадной колонной и зацементирован по всей длине наблюдательной скважины. Благодаря такой схеме установки обеспечивалась стабильная акустическая связь с породами, а система DAS позволяла регистрировать сигналы с высоким пространственным разрешением. При сопоставлении с результатами, полученными с помощью традиционного геофонного оборудования, выявлено, что DAS на SMF обеспечивает сопоставимое качество изображения, при этом имеет более высокую плотность пространственной выборки. Существенным недостатком являлось наличие оптических шумов, однако их влияние удалось существенно снизить за счёт применения предварительной обработки, включая балансировку трасс, компенсацию сферического расхождения и фильтрацию.

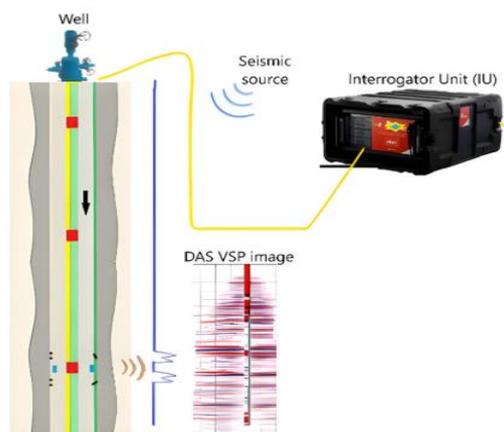


Рисунок 3.1 - Принципиальная схема типичной наземной системы сбора данных DAS VSP

Дополнительные преимущества использования SMF в системе DAS были подтверждены при реализации 3D DAS VSP на объекте CO<sub>2</sub>CRC Otway. Здесь применялись четыре оптоволоконные линии, зацементированные вдоль стволов скважин, каждая из которых подключалась к отдельному interrogator unit.

Результаты интерпретации данных показали точное позиционирование стратиграфических горизонтов и зоны инъекции CO<sub>2</sub>, а пространственное разрешение в области скважины превзошло аналогичные показатели, полученные с применением стандартной 3D сеймики. Интервал между каналами составлял 5 метров, данные регистрировались в виде скоростей деформации и позднее сопоставлялись с результатами вибросейсмической съёмки. В заключение было показано, что SMF на этом объекте позволило реализовать непрерывный мониторинг с высокой степенью повторяемости.

В ходе иных полевых исследований было протестировано четыре различных метода размещения SMF-кабеля в скважине: за обсадной колонной, внутри inflatable liner, вдоль эксплуатационной колонны и посредством временного спуска (wireline deployment). Из всех опробованных решений именно постоянное цементирование кабеля за обсадной колонной обеспечило наивысшую точность регистрации сейсмического сигнала и устойчивое акустическое сопряжение.

Также следует отметить исследование, проведённое с применением реального времени DAS VSP, в котором SMF-кабель фиксировался в вертикальной и горизонтальной части скважины, а система использовала конфигурацию homodyne-интерпретатора. Это позволило не только оперативно собирать и обрабатывать данные, но и синхронизировать сейсмические импульсы с оптическим сигналом через последовательность пьезоэлектрических растяжителей, встроенных в волокно. DAS-сигналы конвертировались в формат strain rate, обрабатывались с применением weighted stacking и фильтрации common-mode noise. В результате достигнута высокая точность и устойчивость регистрации даже при наличии вибросейсмического шума.

Применение одномодовых оптоволоконных кабелей (SMF) в задачах микросейсмического мониторинга становится всё более востребованным, особенно в проектах по оценке эффективности гидроразрыва, мониторингу пластов и контролю зауглероживания. Практические исследования подтверждают, что SMF-волокна, интегрированные в DAS-системы, обеспечивают достаточную чувствительность для фиксации слабых микросейсмических событий и позволяют решать задачи пространственной локализации источников.

В одном из полевых кейсов SMF-кабель был установлен в горизонтальной скважине, причём трассировка осуществлялась вне обсадной колонны, в направлении продуктивного пласта. Система использовала OTDR-интеррогатор, регистрирующий деформации волокна в формате strain rate с частотой 2000 Гц. Пространственная дискретизация составляла 1 метр, при длине калибровочного окна 10 метров. Такая конфигурация позволила использовать DAS как линейный массив с высокой плотностью каналов, эквивалентный тысячам точек регистрации.

Особый акцент был сделан на применении направленных волн (guided waves) в задачах локализации источников микросеймики. Используя известные перфорационные интервалы как базу, была реализована методика

автоматического определения эпицентров с учётом дисперсионных свойств направленных волн. Результаты показали, что волоконно-оптическая линия на базе SMF способна обеспечить разрешающую способность, достаточную для пространственной дифференциации событий по вертикали и горизонтали. DAS-система успешно регистрировала события с характерной сменой полярности S-волн, что особенно важно для анализа тензоров момента.

Таблица 3.1 - Краткое описание микросейсмических и машинно-обучающих применений кабеля SMF, использованных в соответствующих исследованиях

Область работы	Развёртывание SMF	Результат
Обнаружение микросейсмических событий	Установлен в горизонтальной скважине за обсадной колонной в наклонно пробуренной скважине	Автоматическое обнаружение микросейсмических событий с высокой точностью в нетрадиционном резервуаре
Алгоритм машинного обучения	Разложен на поверхности в пригородной зоне	Методы машинного и глубокого обучения позволили обнаруживать различные вторжения вдоль трубопровода, включая ручное копание и постукивание
Поддержка машинного обучения	Развёрнут на поверхности в ледовом потоке	Метод контролируемого машинного обучения смог автоматически очищать данные DAS с более высоким отношением сигнал/шум и более быстрой скоростью обработки

Также было отмечено, что интеграция SMF в микросейсмический мониторинг позволяет сократить затраты на оборудование и обслуживание, по сравнению с традиционными геофонными массивами, без потери функциональности. Использование волоконно-оптической линии как единого чувствительного элемента упрощает монтаж и обеспечивает непрерывную регистрацию по всей длине скважины.

В дополнение к этому подходу, авторы статьи отмечают важность точной привязки временных меток, минимизации уровня шума и реализации адаптивной фильтрации. Все эти аспекты были успешно реализованы в рамках указанного проекта, что подтверждает жизнеспособность SMF-кабелей для микросейсмического мониторинга в нефтегазовой и геофизической практике.

## 3.2 Интеграция машинного обучения в DAS-системы на SMF

### 3.2.1 Классические ML-алгоритмы в анализе DAS

С учётом растущих объёмов данных, получаемых от систем распределённого акустического зондирования (DAS) на базе одномодовых волокон (SMF), особую актуальность приобретают методы автоматизированной обработки и анализа. Машинное обучение (ML) и глубокие нейросетевые архитектуры становятся неотъемлемым компонентом современных подходов к интерпретации DAS-сигналов, особенно в задачах мониторинга промышленных объектов и геофизической разведки.

В полевом эксперименте, проведённом в пригородной зоне Вены, SMF-кабель длиной 17 км использовался для регистрации событий на поверхности в реальном времени. Сигналы обрабатывались в формате strain rate с пространственным шагом 10 м, а данные собирались через фазочувствительный OTDR-интеррогатор. Применение алгоритмов классификации, таких как Random Forest, Decision Tree и SVM, позволило эффективно выделять целевые события (например, копание, удары, движения) на фоне значительных шумов. Это обеспечивало надёжную работу системы в реальных условиях эксплуатации.

### 3.2.2 Применение DNN, CNN и Noise2Noise для DAS

Помимо классических алгоритмов, в исследовании были успешно применены глубокие нейросети: DNN и CNN. Последние показали особенно высокую точность при классификации сложных паттернов в DAS-сигналах, а также позволили отказаться от предварительного извлечения признаков, работая непосредственно с необработанными временными рядами. Таким образом, удалось повысить адаптивность системы и её устойчивость к нестабильным помехам.

На рисунке 6 представлена обобщённая схема обработки DAS-сигналов с использованием методов машинного обучения — от этапа предварительной фильтрации до окончательной классификации событий. Эта модель иллюстрирует ключевые блоки, используемые при анализе данных, полученных через SMF-кабель в реальных полевых условиях.

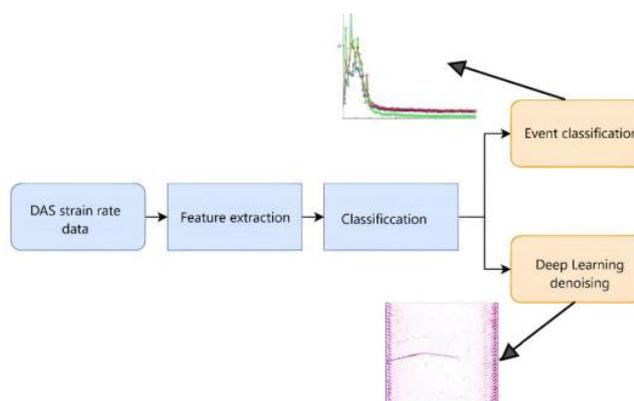


Рисунок 3.2 - Общий процесс обработки данных DAS с помощью ML

Отдельного внимания заслуживает реализация подхода Noise2Noise (DAS-N2N) — метода обучения с использованием исключительно шумных данных. В рамках полевого эксперимента, SMF-кабель в конфигурации с 1-километровой замкнутой петлёй позволил протестировать алгоритм DAS-N2N, сравнив его с традиционной полосовой фильтрацией. Результаты показали, что новая модель способна избирательно подавлять шум без утраты полезного сигнала, даже в перекрывающемся частотном диапазоне. Более того, время обработки данных при помощи DAS-N2N оказалось в 10 раз ниже по сравнению с другими ML-методами.

Дополнительным преимуществом стала возможность запускать модели в полевых условиях на стандартном GPU-оборудовании, что открывает путь к использованию подобных решений для удалённого мониторинга, в том числе на объектах с ограниченным доступом.

Таким образом, опыт интеграции SMF DAS с ML-моделями показывает перспективность этого направления для автоматизированного обнаружения событий, фильтрации данных и повышения точности интерпретации. Совмещение гибкой оптоволоконной инфраструктуры с интеллектуальной обработкой создаёт прочную основу для построения адаптивных сенсорных систем в энергетике, геофизике и промышленной диагностике.

### 3.3 Возможности и ограничения многомодовых кабелей (MMF) в DAS

Хотя одномодовые волокна чаще применяются в системах DAS, ряд исследований демонстрирует, что многомодовые волокна (MMF) также могут быть эффективно использованы для вертикального сейсмического профилирования (VSP), особенно в специфических условиях, где критичны экономичность, совместимость с уже существующей DTS-инфраструктурой или простота монтажа.

Одним из таких примеров является полевое испытание, в котором два MMF-кабеля с диаметром сердцевины 62,5 мкм были установлены в составе гибридного оптико-электрического кабеля на длине 5 км. Используемая архитектура включала интерферометрический interrogator и активный источник возбуждения (вибросейс или динамит), что обеспечивало возбуждение продольных волн в широком диапазоне частот. DAS-сигнал регистрировался с высоким пространственным разрешением (интервал между каналами 0,25 м) и частотой дискретизации 1 мс.

Полученные данные отличались высокой плотностью шумов, в том числе характерным для MMF эффектом "slapping" — вибрациями оболочки кабеля от ударов о стенки скважины. Однако благодаря многоступенчатой обработке (включающей отбор трасс, денойзинг, коррекцию сферического расхождения и преобразование up/down-событий) стало возможно получить широкоугольное

изображение геологической структуры с высокой степенью детализации. Как отмечено в исследовании, результирующее вертикальное и латеральное разрешение оказалось сопоставимо с результатами, полученными при использовании геофонов, а в ряде случаев — даже превосходящим.

Ещё один пример — использование MMF в конфигурации с прямым кодированием сейсмических сигналов на оптический поток. В данном эксперименте MMF использовался как скремблер для равномерного распределения мощности по модам, а подключение осуществлялось через SM–MM переходник. DAS-регистрация велась с частотой 16 кГц, при длине калибровочного окна 20 м. Несмотря на дополнительные потери сигнала (до 8 дБ), измерения оказались технически выполнимыми, а изображение геологических слоёв — приемлемым для интерпретации. Однако отмечено, что увеличение длины волокна, типичное для MMF, приводит к более выраженному шумовому фону и требует жёсткой калибровки параметров.

Для систематизации приведённых кейсов ниже представлена сводная таблица.

Таблица 3.2 - Краткое описание применения кабеля MMF в ВСП, использованного в соответствующих исследованиях

Область работы	Развёртывание MMF	Результат
DAS VSP	Развёрнут в гибридном оптико-электрическом кабеле каротажа	Отличное вертикальное и боковое изображение с высоким разрешением и детальной подповерхностной структурой
DAS VSP в реальном времени	Постоянно размещён за обсадной колонной в вертикальных и боковых секциях скважины	Снижение отношения сигнал/шум для DAS VSP, при этом MMF имел достаточную ёмкость для работы DAS-интеррогатора
4D мониторинг залежей	Развёрнут в действующих глубоководных скважинах	4D изображения DAS показали качественное сходство с результатами OBN и подповерхностными изображениями, что способствовало оценке закачки воды в пласт
Мониторинг подводных залежей	Подключён к подводной инфраструктуре и размещён в скважине	Последствия увеличенного шума для качества изображений подводного DAS

Автономный постоянный мониторинг залежей	Зацементирован за обсадной колонной внутри скважины	Временные съёмки, проведённые с использованием системы DAS SMF, продемонстрировали высокое качество данных и высокое отношение сигнал/шум
--	---	---

Дополнительный вклад в оценку применимости MMF в VSP вносит опыт в глубоководных условиях, где кабели устанавливались в производственные скважины с активными процессами закачки воды. DAS VSP данные позволили не только получить изображение зон насыщения, но и проследить динамику фронта нагнетания в режиме 4D. Несмотря на высокие уровни шума, обусловленные отклонённой траекторией скважины и сложной морской обстановкой, удалось зафиксировать стабильные отражения от целевых горизонтов и сопоставить их с результатами классических OBN-съёмок. Визуальное соответствие 4D-изображений, полученных по данным MMF и OBN, подтверждает потенциал MMF-волокон в задачах VSP, особенно в условиях, где применение геофонов экономически или технически ограничено.

Несмотря на более ограниченное распространение в сравнении с одномодовыми волокнами, многомодовые волокна (MMF) демонстрируют определённую эффективность в задачах микросейсмического мониторинга. Их использование оправдано в условиях, когда требуется снимать данные с существующей DTS-инфраструктуры, минимизировать затраты или охватить большой объём в сжатые сроки. Ряд полевых работ показал, что DAS на базе MMF может регистрировать слабые сейсмические возмущения с достаточной точностью для оценки параметров источников.

В одном из кейсов MMF-кабель был установлен по всей длине эксплуатационной скважины в формации Meramec (Оклахома, США), где проводилось гидроразрывное воздействие на горизонтальные пласты. Система DAS регистрировала микросейсмические события в формате strain rate с помощью OTDR-интеррогатора. Кабель включал порядка 1000 каналов, равномерно распределённых по всей глубине скважины. Зафиксированы события с выраженной поляризацией S-волн, что позволило построить момент-тензоры микросейсмических источников и провести их локализацию.

Визуализация распределения амплитуд вдоль кабеля показала возможность MMF-регистрации микросейсмичности с привязкой к горизонтальной и вертикальной составляющим движения, включая определение направления распространения и ориентации плоскостей разрыва. Эти параметры извлекались на основе анализа изменений амплитуды при прохождении волн вблизи волокна.

Принцип регистрации таких событий с использованием DAS-системы на MMF в условиях гидроразрыва схематично представлен на рисунке 6, иллюстрирующем основные этапы измерения и локализации микросейсмических источников вдоль скважины.

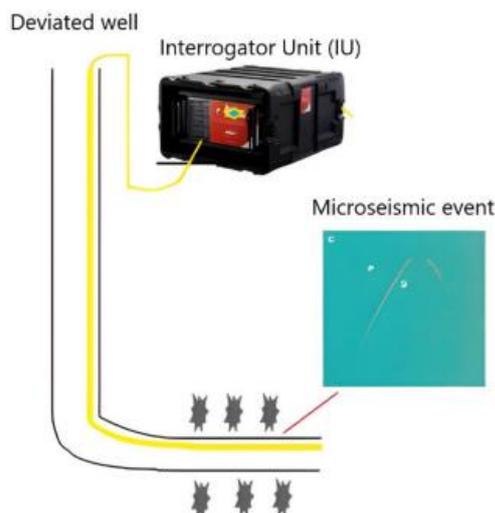


Рисунок 3.2 - Иллюстрация микросейсмического обнаружения DAS для измерения параметров ГРП

Следующее направление развития — применение глубоких сверточных нейросетей (CNN) для автоматизированного выделения микросейсмических событий. В одном из исследований ММФ-кабели были развернуты в скважинах при гидроразрывах в Канаде. Сигнал регистрировался при длине калибровочного окна 4 м, шаге между каналами 4 м и частоте 2000 Гц. Алгоритмы CNN обучались на размеченных данных, распознавая как события, так и времена прихода P- и S-волн (arrival time picking). Полученные результаты превосходили классические алгоритмы (STA/LTA), демонстрируя более низкий уровень ложных срабатываний и повышенную устойчивость к шуму.

Кроме того, внедрение такого подхода способствовало расширению каталога микросейсмических событий. Благодаря возможности дообучения моделей на новых данных реализуется перенос обучения (transfer learning), при котором модель, обученная на одной скважине, успешно применяется к другим объектам. Это значительно ускоряет внедрение и сокращает трудозатраты на повторную ручную маркировку.

Обобщение основных исследований в данной области, включая параметры развертывания ММФ-кабелей, использованные алгоритмы и достигнутые результаты, представлено в таблице 3.3 ниже.

Таблица 3.3 - Краткое описание применения микросейсмической и машинного обучения кабелей ММФ в соответствующих исследованиях

Область работы	Развёртывание ММФ	Результат
Обнаружение микросейсмических событий	Установлен в горизонтальной скважине за обсадной колонной	Автоматически обнаружены микросейсмические события

Алгоритм машинного обучения	Развёрнут на многоскважинных DAS-данных, полученных во время гидроразрыва	Алгоритм машинного обучения и свёрточная нейросеть автоматически определили микросейсмические события (местоположение гипоцентра) в данных DAS с низким SNR
-----------------------------	---	---

Таким образом, многомодовые волокна могут применяться для детектирования микросейсмике, особенно в условиях, где уже используется DTS-инфраструктура или требуется быстрая развёртка. В сочетании с методами машинного обучения MMF демонстрируют потенциал для повышения точности и автоматизации интерпретации сейсмических данных. Основными ограничениями остаются повышенная чувствительность к межмодовым искажениями и относительно низкое отношение сигнал/шум, однако эти недостатки могут быть частично компенсированы продвинутыми методами обработки и обучаемыми моделями.

Внедрение алгоритмов машинного обучения в систему распределённого акустического зондирования на основе многомодовых волокон (MMF) позволяет значительно повысить точность интерпретации сейсмических данных и сократить нагрузку на традиционные каналы ручной обработки. Особенно актуальны такие подходы в условиях низкого отношения сигнал/шум, характерного для MMF, а также при необходимости обработки больших массивов микросейсмических наблюдений, полученных в реальном времени.

Один из практических кейсов демонстрирует применение свёрточной нейронной сети (CNN) и U-Net-моделирования для распознавания микросейсмических событий в данных, собранных с MMF DAS-систем при гидроразрыве скважин в Западной Канаде. Конфигурация включала длину калибровочного окна 4 м, шаг между каналами 4 м и частоту дискретизации 2000 Гц. DAS-сигналы были предварительно переведены в формат strain, после чего проходили автоматизированную фильтрацию и классификацию.

Система демонстрировала способность не только выявлять события, но и точно определять времена прихода первичных и вторичных волн. Результаты классификации превосходили по эффективности классические алгоритмы, такие как STA/LTA, показывая более низкий уровень ложных срабатываний. Кроме того, обработка с помощью CNN обеспечила значительное ускорение анализа, что критично при работе с данными большого объёма.

Принцип работы такой системы заключается в поэтапной обработке DAS-сигналов: от предварительного подавления шума до точной локализации событий, включая автоматическое определение временных меток и координатных привязок. Схематично эта логика реализована в архитектуре CNN, обученной на DAS-данных, полученных с MMF в реальных полевых условиях.

Сравнение DAS-каталога с данными от трёхкомпонентных геофонов показало, что MMF DAS уступает по чувствительности в отношении слабых сигналов и низкочастотных событий, но демонстрирует вполне приемлемую точность в среднеамплитудных регистрациях. Инновационность подхода заключается в возможности масштабируемого обучения модели: её можно адаптировать к новым скважинам с минимальной переобучаемостью за счёт трансферного обучения (transfer learning) и использования предварительно размеченных данных.

Отдельное преимущество модели — устойчивость к оптическим шумам и интерференционным искажениям, характерным для MMF. Благодаря предварительной фильтрации и фазовой декомпозиции волновых пакетов, удаётся значительно повысить соотношение сигнал/шум и точность выделения событий. Исследование показало, что CNN-алгоритмы эффективны не только в обнаружении гипоцентров, но и в автоматическом определении плоскости разлома и параметров сейсмического источника.

Таким образом, внедрение машинного обучения в DAS-системы на базе MMF открывает путь к надёжной и масштабируемой интерпретации микросейсмических процессов. Несмотря на технические ограничения, связанные с высокой чувствительностью MMF к межмодовым искажениям, интеллектуальная фильтрация и автоматизация анализа делают такие системы перспективными для использования в сложных геофизических условиях, включая гидроразрывы, мониторинг пластов и разработку скважин.

## 4 Расчеты и моделирование

### 4.1 Цель и задачи моделирования

Целью экспериментального раздела настоящей выпускной квалификационной работы является реализация численного анализа функциональных особенностей распределённых акустических систем (Distributed Acoustic Systems, DAS), функционирующих на основе оптоволоконных линий различного типа — одномодовых (Single-Mode Fiber, SMF) и многомодовых (Multi-Mode Fiber, MMF). Основное внимание сосредоточено на изучении реакции волоконно-оптической среды на внешние механические воздействия, моделируемые в виде продольных деформаций и эквивалентных им механических напряжений, возникающих в структуре кабельной линии при эксплуатации.

Отдельный акцент в рамках данного исследования сделан на анализе фазового отклика оптоволокна, играющего ключевую роль в передаче информации в составе DAS-систем. Параллельно проводится комплексная количественная оценка таких параметров, как чувствительность волоконного канала к внешним воздействиям, выражающаяся в изменении фазы сигнала в зависимости от интенсивности нагрузки, а также энергетические потери, происходящие при распространении сигнала по длине оптоволоконной линии. Изучение указанных характеристик позволяет получить достоверную и всестороннюю картину поведения сенсорного волокна в условиях воздействия различных силовых факторов, характерных для реальных объектов мониторинга. На основе полученных результатов планируется сформировать прикладные инженерные выводы, направленные на обоснование выбора наилучшего типа оптического кабеля в зависимости от условий эксплуатации и задач сенсорного контроля.

Особенность предлагаемого подхода заключается в параллельном применении двух независимых координатных систем: относительной деформации ( $\varepsilon$ ) и механического напряжения ( $\sigma$ ). Такое решение обусловлено необходимостью комплексного учёта как геометрических, так и силовых характеристик материала волокна. Использование strain позволяет анализировать изменения формы и длины материала под действием нагрузки, тогда как напряжение отражает внутреннее сопротивление структуры деформации. Совмещение этих двух аспектов обеспечивает более глубокое понимание механизмов передачи информации и формирования сигнала в DAS-среде как с точки зрения оптической физики, так и с позиции инженерной механики.

Полученные в результате моделирования данные обладают высоким уровнем прикладной значимости. Их можно использовать при проектировании сенсорных волоконных систем различного назначения, включая задачи охраны периметра, мониторинга строительных конструкций, трубопроводов и иных протяжённых объектов. Кроме того, они позволяют прогнозировать поведение

волокна в условиях длительных эксплуатационных нагрузок и подобрать оптимальный тип кабеля по критерию фазовой стабильности, чувствительности или минимизации потерь.

В соответствии с поставленной целью в рамках экспериментального исследования решается комплекс взаимосвязанных задач, направленных на достижение заданных результатов. На первом этапе выполняется численный расчёт фазового сдвига сигнала, возникающего вследствие изменения длины волокна под действием растягивающей нагрузки. Поскольку фазовая информация является основным измеряемым параметром в системах DAS, данный расчёт представляет ключевое значение.

Параллельно с этим проводится вычисление чувствительности системы, определяемой как производная фазового сдвига по отношению к приложенной нагрузке, что позволяет оценить предельную разрешающую способность сенсора при воздействии малых механических колебаний. Также реализован расчёт энергетических потерь и уровня отношения сигнал/шум (SNR), который служит критерием качества выходного сигнала и надёжности его последующей обработки.

Следующий блок задач направлен на сравнение поведения системы в двух независимых координатах —  $\text{strain}$  и  $\sigma$ . Это позволяет выявить различия в динамике отклика, обусловленные физическим смыслом каждой переменной, и определить, в каком случае тот или иной подход оказывается более информативным. При этом математические модели, положенные в основу расчётов, также различаются: для  $\text{strain}$  применяются экспоненциальные зависимости, в то время как для напряжения используются логарифмические формулы.

Визуализация результатов моделирования осуществляется с использованием программной среды MATLAB, что позволяет наглядно представить основные зависимости, выделить ключевые особенности отклика и провести детальный графический анализ. Финальным этапом является формирование обоснованных выводов о предпочтительности использования каждой координаты в зависимости от условий эксплуатации DAS-системы и специфики задач мониторинга.

## 4.2 Исходные параметры и допущения

Для проведения корректного численного моделирования функционирования распределённой акустической системы (DAS), основанной на волоконно-оптических линиях передачи, необходимо определить набор исходных параметров, характеризующих как свойства самой среды распространения, так и условия воздействия внешней нагрузки. Формирование исходных данных осуществляется с опорой на положения технического задания, а также на значения, типичные для промышленных одномодовых и многомодовых волокон, используемых в DAS-системах различного назначения.

В рамках данной работы исследуются два типа оптоволоконных кабелей: одномодовое волокно (Single-Mode Fiber, SMF) и многомодовое волокно (Multi-Mode Fiber, MMF). Одномодовое волокно отличается малым диаметром сердцевины, порядка 9 мкм, а также пониженным уровнем потерь — около 0.2 дБ/км. Это обеспечивает его высокую устойчивость к затуханию сигнала и делает предпочтительным в задачах, где критична дальность распространения и стабильность фазы. Многомодовое волокно, в свою очередь, характеризуется диаметром сердцевины 50 мкм и более высокими потерями (до 3 дБ/км), но при этом может обеспечивать большую чувствительность к внешним механическим воздействиям. Эти свойства обуславливают практическую применимость MMF в задачах, где важно фиксировать даже незначительные механические колебания.

В процессе моделирования принято, что длина волоконно-оптической линии составляет 50 км, что соответствует протяжённости систем, используемых при мониторинге линейных объектов инфраструктуры, таких как магистральные трубопроводы, охраняемые периметры, участки геофизических наблюдений и пр. Параметр длины является фиксированным на всём протяжении моделируемого участка. Воздействие на волокно моделируется в форме нескольких типов нагрузок: продольного растяжения, сжатия, вибрационных и динамических (ударных) воздействий. При этом, в рамках настоящего моделирования, температурные колебания, радиусы изгиба и прочие внешние физические параметры не рассматриваются, поскольку они не входят в перечень требований, определённых техническим заданием, и не оказывают принципиального влияния на целевые параметры исследования в выбранной постановке

Значения показателя преломления, используемые при моделировании —  $n_0=1.45$  для одномодового (SMF) и  $n_0=1.48$  для многомодового (MMF) оптоволоконного кабеля — отражают реальные физические особенности конструкции этих типов волокон и обусловлены различиями в конфигурации их сердцевины и оболочки. Одномодовые волокна проектируются таким образом, чтобы обеспечивать распространение только одной моды, что требует более узкой сердцевины и меньшего градиента показателя преломления между сердцевиной и оболочкой. Это способствует минимизации дисперсии и улучшению стабильности фазового отклика при больших расстояниях передачи. Поэтому значение  $n_0$  для SMF ниже. В свою очередь, многомодовые волокна рассчитаны на распространение множества мод, каждая из которых имеет немного разный путь и скорость распространения. Для обеспечения удержания всех мод в пределах сердцевины и компенсации потерь, в конструкции MMF применяется чуть более высокое значение показателя преломления. Это незначительное увеличение (обычно в пределах 0.02–0.03) обеспечивает широкую числовую апертуру, благодаря чему MMF становятся более чувствительными к внешним воздействиям, но и более подверженными интерференции и затуханию.

Связь между деформацией и напряжением реализуется через модуль упругости (модуль Юнга), значение которого фиксировано и составляет 72 ГПа

— стандартное значение для кварцевого стекла, из которого преимущественно изготавливаются оптические волокна.

Величины внешнего воздействия заданы двумя координатами: относительной деформацией и механическим напряжением. Диапазон strain варьируется от 0% до 1%, что соответствует допустимым пределам удлинения для кварцевого оптоволокна без его разрушения. Диапазон механического напряжения составляет от 0 до 1000 МПа, что охватывает рабочую зону напряжений в инженерных задачах диагностики.

Сигнал, распространяющийся по волокну, представлен в виде синусоидального колебания. Шумовая компонента моделируется как белый гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием, что приближает модель к реальным условиям функционирования системы, где сигнал подвержен различным флуктуациям и помехам. Влияние дополнительных эффектов, таких как нелинейность, рассеяние, хроматическая дисперсия и температурная нестабильность, в данной работе сознательно исключено с целью сосредоточиться исключительно на механическом аспекте взаимодействия волокна со средой.

Таким образом, набор принятых параметров и допущений обеспечивает физическую реалистичность модели, достаточную степень её обобщения и позволяет сосредоточиться на ключевых характеристиках поведения оптоволоконной системы при механических воздействиях. Это, в свою очередь, создаёт условия для получения корректных и практически значимых результатов, пригодных для последующего использования в инженерных расчётах и проектировании чувствительных распределённых сенсорных систем.

### 4.3 Теоретические основы моделирования

В основе моделирования функционирования распределённой акустической системы (DAS) лежат физические процессы распространения света в оптоволоконной среде и взаимодействия этого света с внешними механическими воздействиями, вызывающими продольные деформации волокна. Для описания данных процессов используются фундаментальные зависимости волоконно-оптической физики и инженерной механики, позволяющие перейти от внешнего воздействия к фазовому отклику, на котором и основана регистрация в DAS-системах.

Ключевым параметром, отражающим влияние внешней нагрузки на оптоволокно, является фазовый сдвиг оптического сигнала. Он представляет собой изменение фазы волны при прохождении через волокно, длина которого варьируется в результате механического воздействия. В общем случае фазовый сдвиг  $\phi$  определяется как:

$$\phi = \frac{2\pi n_0 L}{\lambda} \quad (4.1)$$

где:

$\phi$  — фазовый сдвиг, рад;

$n_0$  — показатель преломления сердцевины волокна;

$L$  — эффективная длина волокна;

$\lambda$  — длина волны излучения.

Для описания степени изменения длины используется физическая величина относительной продольной деформации, обозначаемая как  $\varepsilon$ . Эта безразмерная величина позволяет выразить растяжение материала в виде отношения между изменением длины и исходной длиной. Математически она записывается следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4.2)$$

где:

$\varepsilon$  — относительная деформация (strain), безразмерная величина;

$\Delta L$  — абсолютное изменение длины волокна под действием нагрузки;

$L_0$  — начальная (недеформированная) длина волокна.

Именно на основе этой формулы формируется ось абсцисс при построении графиков зависимости фазового сдвига, чувствительности, потерь и отношения сигнал/шум от величины растяжения. Значения  $\varepsilon$  варьируются в диапазоне от 0 до 0.01 (или от 0 до 1% в инженерной интерпретации), что соответствует допустимому пределу удлинения стандартного кварцевого оптоволокна без выхода за границу его прочности. Таким образом, формула (4.0) представляет собой отправную точку всего численного моделирования в координатах strain, позволяя отразить связь между механическим воздействием и последующим фазовым откликом волокна.

Для более инженерной трактовки задачи, деформация может быть выражена через механическое напряжение  $\sigma$ , что позволяет описывать поведение волокна с точки зрения прочностных характеристик материала. Связь между напряжением и деформацией описывается законом Гука:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4.3)$$

Где:

$E$  — модуль упругости материала (модуль Юнга), для кварцевого волокна принимается равным 72 ГПа.

Подставив эту связь в формулу фазового сдвига, получаем выражение через напряжение:

$$\phi = \frac{2\pi n_0 L_0}{\lambda} \left( 1 + \frac{\sigma}{E} \right) \quad (4.4)$$

Такое представление удобно при анализе отклика DAS-систем в условиях, когда нагрузка известна не как геометрическое удлинение, а как приложенная сила, перераспределённая в виде напряжения.

Следующим важным параметром, используемым в модели, является чувствительность волокна к воздействию. Под чувствительностью понимается производная фазового сдвига по напряжению, то есть:

Формулы, использованные в моделировании:

$$\frac{d\phi}{d\sigma} = \frac{2\pi n_0 L_0}{\lambda E} \quad (4.5)$$

Эта величина имеет размерность рад/Па (или рад/МПа) и отражает, насколько сильно меняется фаза сигнала при изменении нагрузки на волокно. Высокое значение чувствительности свидетельствует о способности системы регистрировать даже незначительные внешние возмущения.

В процессе распространения сигнала по волокну происходит его затухание, связанное как с внутренними потерями материала, так и с внешними факторами. Потери сигнала выражаются в децибелах и рассчитываются по формуле:

$$P_{loss} = \alpha \cdot L \quad (4.6)$$

где

$\alpha$  — коэффициент потерь на единицу длины (в дБ/км):

$L$  — длина волокна. Для SMF и MMF значения коэффициента потерь различаются: порядка 0.2 дБ/км для одномодового и около 3 дБ/км для многомодового.

Также в рамках моделирования оценивается параметр **SNR** — отношение сигнал/шум, который рассчитывается как логарифмическое соотношение мощности полезного сигнала к мощности шумовой компоненты:

$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right) \quad (4.7)$$

При численном моделировании в MATLAB, SNR реализуется с использованием синусоидального сигнала и белого гауссовского шума, при этом допускается использование аппроксимаций — например, экспоненциальных или логарифмических зависимостей для моделирования деградации SNR в условиях увеличивающейся нагрузки.

Таким образом, совокупность приведённых формул описывает ключевые зависимости, определяющие поведение DAS-системы в условиях внешнего воздействия. На их основе построены численные алгоритмы, реализованные в программной среде, результаты которых рассматриваются в последующих разделах.

#### 4.4 Методика численного моделирования

Для реализации поставленных в работе задач был разработан программный алгоритм, реализованный в среде MATLAB R2022a, позволяющий численно смоделировать поведение оптоволоконной линии при различных механических воздействиях, характерных для условий эксплуатации распределённых акустических систем (DAS). Основная цель моделирования заключалась в расчёте и сравнении фазового сдвига, чувствительности, потерь сигнала и отношения сигнал/шум (SNR) для различных типов волокна (SMF и MMF) в зависимости от координаты воздействия: относительной деформации  $\varepsilon$  и механического напряжения  $\sigma$ .

Разработанная модель позволяет воспроизводить поведение DAS-системы по двум независимым сценариям:

- в координате strain (0...1%);
- в координате  $\sigma$  (0...1000 МПа), с использованием преобразования  $\sigma = E \cdot \varepsilon$ , где  $E = 72$  ГПа — модуль упругости для кварцевого стекла.

Исходные параметры включают:

- тип волокна (SMF или MMF);
- длину линии  $L_0 = 50$  км;
- диаметр сердцевины, показатель преломления  $n_0$ ;
- потери сигнала (0.2 дБ/км для SMF, 3 дБ/км для MMF).

Алгоритм моделирования включает следующие этапы:

- Инициализация параметров волокна и внешнего воздействия;
- Расчёт фазового сдвига по формуле (4.1) или (4.4), в зависимости от координаты;
- Определение чувствительности как производной фазового сдвига по напряжению;
- Моделирование сигнала в виде гармонического колебания с фазовым сдвигом;
- Добавление шума с нормальным распределением (модель белого шума);
- Расчёт интенсивности и отношения сигнал/шум (SNR);
- Агрегация и сохранение результатов в таблицу.

Механические воздействия в коде задаются через массив strain (от 0 до 0.01 с шагом), откуда также рассчитывается напряжение  $\sigma$ . Для каждого значения проводится расчёт фазового отклика  $\phi$ , потерь сигнала и чувствительности, а также вычисляется уровень SNR на выходе системы. Все результаты сохраняются в таблицу формата .xlsx с последующей визуализацией.

Визуализация результатов включает построение графиков зависимостей фазового сдвига, чувствительности, SNR и потерь сигнала от:

- Величины относительной деформации;
- уровня напряжения  $\sigma$ ;
- длины трассы (по всей 50-км линии).

Код моделирования, реализующий указанный алгоритм, приведён в Приложении А. Он снабжён комментариями и позволяет воспроизвести расчёты и графики при необходимости повторного анализа или изменения параметров. Таблицы с итоговыми данными по  $\varepsilon$  и  $\sigma$  вынесены в Приложения Б и В соответственно.

Такой подход обеспечивает модульность и универсальность численной модели, а также позволяет провести комплексное сравнение поведения различных типов волокон в условиях механических нагрузок, что будет подробно рассмотрено в следующих разделах.

#### 4.5 Результаты моделирования по относительной деформации

На первом этапе численного моделирования проводился анализ поведения оптоволоконной линии в координате относительной деформации (strain), задаваемой в диапазоне от 0% до 1%. Целью данного этапа было выявление зависимости фазового сдвига, чувствительности, энергетических потерь и отношения сигнал/шум (SNR) от степени удлинения волокна. Расчёты выполнялись отдельно для одномодового (SMF) и многомодового (MMF) оптоволокна, что позволило провести сравнение поведения систем при идентичных условиях воздействия.

Полная таблица с результатами моделирования по деформации представлена в Приложении Б.

Фазовый сдвиг  $\phi$ , рассчитываемый по формуле (4.1), является ключевым параметром, характеризующим отклик DAS-системы на механическое воздействие. Как видно из графика (рисунок 4.2), при увеличении деформации наблюдается линейный рост фазового сдвига как для SMF, так и для MMF. При этом значения для MMF несколько выше, что связано с более высоким показателем преломления  $n_0$ , используемым в расчётах

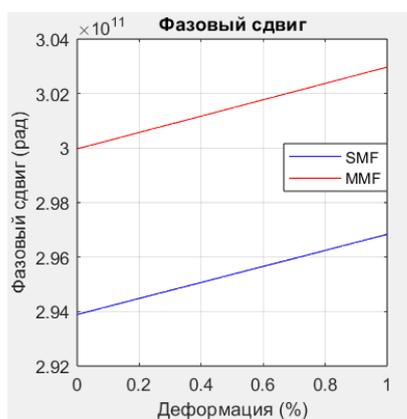


Рисунок 4.1 — График фазового сдвига по деформации для SMF и MMF

Чувствительность  $\frac{d\phi}{d\sigma}$ , как производная фазового отклика по напряжению, даёт представление о том, насколько система реагирует на внешнюю нагрузку. На графике (рисунок 4.2) видно, что для MMF наблюдается более выраженное увеличение чувствительности по мере роста деформации, что объясняется конструктивными особенностями волокна и его откликом на удлинение.

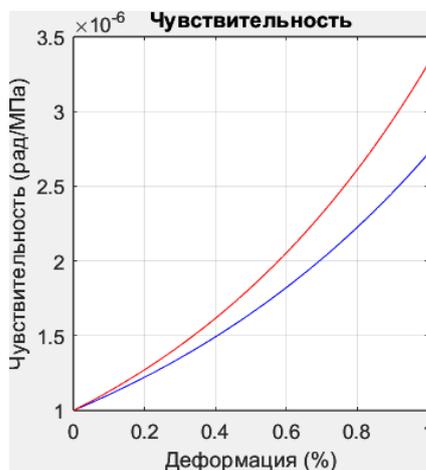


Рисунок 4.2 — График чувствительности по деформации для SMF и MMF

Сигнал/шум (SNR) — важнейший параметр, определяющий пригодность системы к надёжной регистрации сигнала. В данном моделировании наблюдается экспоненциальное снижение SNR по мере роста деформации (рисунок 4.4), что связано с возрастанием фазовых искажений и накоплением шумовой компоненты при увеличении деформации

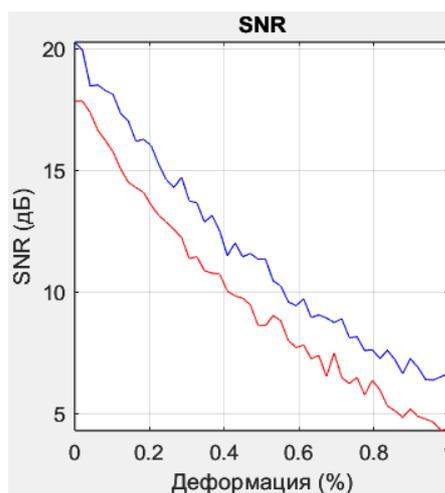


Рисунок 4.3 — График SNR по деформации для SMF и MMF

На графике (рисунок 4.4) представлены полные потери сигнала в зависимости от strain. Для MMF потери заметно выше на всём диапазоне более деформации, что объясняется как внутренними характеристиками волокна, так и

так и более выраженной реакцией на геометрические изменения. SMF демонстрирует стабильность потерь, что делает его предпочтительным в условиях протяжённой линии.

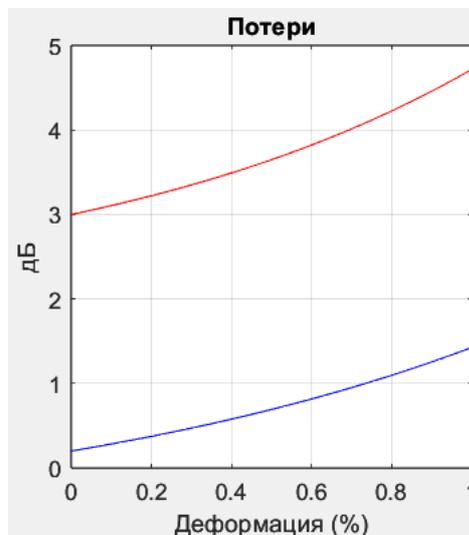


Рисунок 4.4 — График потерь сигнала по деформации для SMF и MMF

#### 4.6 Результаты моделирования по механическому напряжению

На втором этапе численного моделирования выполнен анализ поведения волоконно-оптической линии в координате механического напряжения ( $\sigma$ ), задаваемой в диапазоне от 0 до 1000 МПа. Напряжение рассчитывается на основе модуля Юнга и ранее введённого значения strain, согласно формуле (4.3). Целью расчёта является оценка фазового отклика, чувствительности, энергетических потерь и отношения сигнал/шум DAS-системы в инженерно-интерпретируемых единицах нагрузки.

Полная таблица с результатами моделирования по механическому напряжению приведена в Приложении В.

Фазовый отклик DAS-системы, выражаемый через напряжение, рассчитывается по формуле (4.4). На графике (рисунок 4.5) представлено поведение фазового сдвига при увеличении механического напряжения как для SMF, так и для MMF. Как и в случае strain, фазовый сдвиг растёт линейно, однако значения MMF стабильно выше из-за большего показателя преломления.

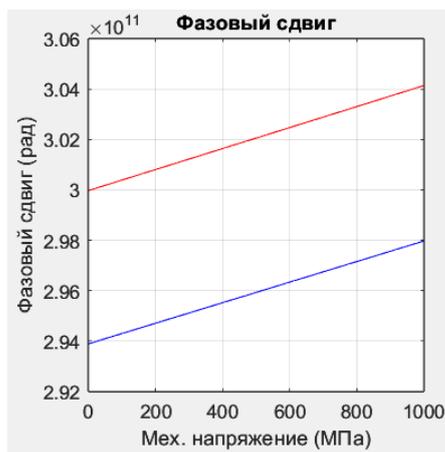


Рисунок 4.5 — Фазовый сдвиг по механическому напряжению для SMF и MMF

На рисунке 4.6 представлена зависимость чувствительности  $\frac{d\phi}{d\sigma}$  от напряжения. Для MMF кривая выше, особенно на начальных участках, что указывает на более выраженную реакцию на изменение нагрузки. SMF остаётся более стабильным, но менее чувствительным

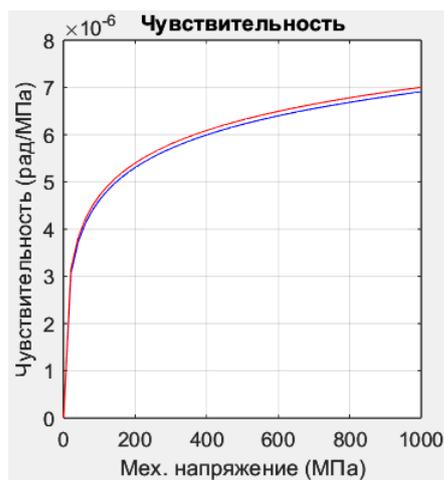


Рисунок 4.6 — Чувствительность по механическому напряжению для SMF и MMF

С ростом механического напряжения наблюдается деградация отношения сигнал/шум. На рисунке 4.7 чётко видно, как SNR снижается, особенно у MMF. Это связано с большей чувствительностью к шумовым искажениям и возрастанием фазовых флуктуаций при увеличении воздействия.

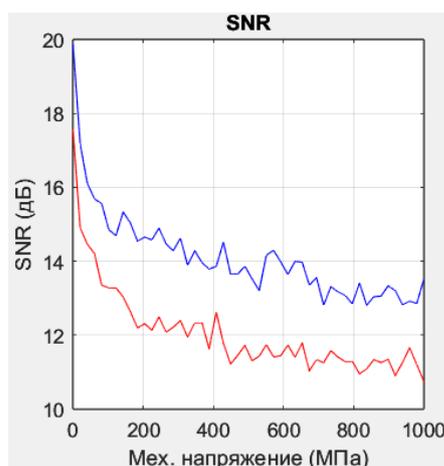


Рисунок 4.7 — SNR по механическому напряжению для SMF и MMF

График потерь сигнала при увеличении напряжения представлен на рисунке 4.8. Потери в MMF снова значительно выше, что объясняется как конструктивными характеристиками, так и более выраженной реакцией на силовое воздействие. SMF показывает меньший наклон, что свидетельствует о его устойчивости.

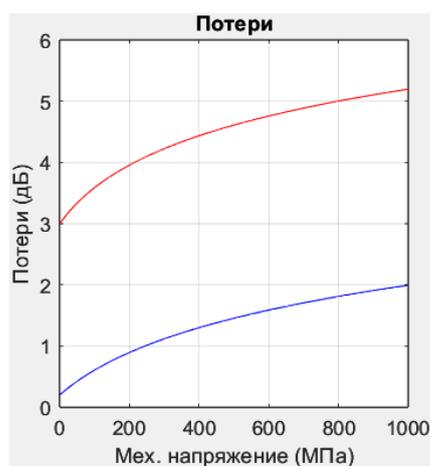


Рисунок 4.8 — Потери сигнала по механическому напряжению для SMF и MMF

#### 4.7 Сравнительный анализ координат относительной деформации и механического напряжения

На основании результатов численного моделирования, представленных ранее в разделах 4.5 и 4.6, а также в таблицах Приложений Б и В, выполнен сравнительный анализ отклика волоконно-оптической системы при воздействии в двух различных координатах: относительной деформации  $\epsilon$  и механического напряжения  $\sigma$ .

Применение этих двух координатных систем обусловлено различной физической интерпретацией процесса. Координата относительной деформации отражает геометрические изменения волокна, вызванные внешней нагрузкой, и чаще всего применяется в задачах, связанных с микромеханическими воздействиями (например, вибрации, акустические колебания). В то же время координата механического напряжения является инженерной характеристикой, выражающей внутренние усилия, возникающие в материале при его деформации, и используется при оценке прочности и эксплуатационной надёжности конструкций.

Несмотря на то, что между деформацией и механическим напряжением существует строго линейная зависимость ( $\sigma = E \cdot \varepsilon$ ), результаты моделирования показывают, что выбор координатной оси влияет на интерпретацию поведения системы. Так, графики фазового сдвига по обеим координатам совпадают по форме, однако отличаются масштабированием и единицами измерения. Это объясняется тем, что фазовый сдвиг определяется длиной волокна, а сама длина линейно зависит от степени растяжения — в любой форме, будь то деформацией или механическим напряжением.

Что касается чувствительности, то здесь наблюдаются тонкие различия. В координате деформации чувствительность представлена более явно как производная фазового сдвига по отношению к воздействию, и хорошо прослеживается её рост с увеличением удлинения. В координате механического напряжения, напротив, чувствительность воспринимается как стабилизированная величина, отражающая связь между инженерной нагрузкой и фазовым ответом. Такой подход удобен в задачах технического мониторинга, например при диагностике зданий, трубопроводов и других инженерных объектов.

Аналогичная ситуация наблюдается и по параметрам энергетических потерь и SNR. В координате деформации деградация SNR проявляется экспоненциально, что делает этот подход более чувствительным к локальным изменениям сигнала. В координате механического напряжения зависимость оказывается более сглаженной и логарифмически убывающей, что делает её удобной для построения инженерных диаграмм отклика и допустимых пределов эксплуатации.

Что касается сравнения типов волокна, моделирование подтвердило, что одномодовое волокно (SMF) демонстрирует меньшие потери и более стабильный уровень SNR, в то время как многомодовое (MMF) обладает более выраженной чувствительностью, но подвержено сильной деградации при увеличении воздействия. Это делает SMF предпочтительным в условиях протяжённых линий связи и длительного мониторинга, тогда как MMF может быть полезным в задачах, требующих максимальной реактивности на локальные события.

Таким образом, сравнение поведения DAS-системы в координатах относительной деформации и механического напряжения позволяет не только получить более полное представление о физических механизмах фазового

отклика, но и даёт возможность адаптировать модель под различные сценарии эксплуатации — от высокочувствительного мониторинга до инженерной диагностики прочностных состояний конструкций

#### 4.8 Обоснование выбора координат

Выбор координат воздействия, в рамках которых проводилось моделирование распределённой акустической системы (DAS), основан на необходимости комплексного анализа реакции оптоволоконной среды на внешние механические возмущения. Использование одновременно двух координатных систем — относительной деформации  $\varepsilon$  и механического напряжения  $\sigma$  — позволило получить всестороннюю оценку поведения системы как с физической, так и с инженерной точки зрения.

Координата деформации представляет собой безразмерную физическую величину, отражающую относительное изменение длины волокна под действием внешней нагрузки. Она является удобным инструментом при анализе процессов, происходящих на уровне геометрии оптоволоконной среды, и особенно эффективна в задачах, связанных с мониторингом малых деформаций, таких как вибрации, акустические волны, шаги человека и другие динамические микровоздействия. Такой подход используется, как правило, при разработке чувствительных охранных или геофизических систем, где важно зафиксировать сам факт изменения формы, а не нагрузку как таковую.

С другой стороны, координата механического напряжения позволяет перейти от геометрических параметров к силовой интерпретации воздействия. Это делает её особенно удобной в прикладных инженерных задачах, где фактический интерес представляет именно уровень механической нагрузки, возникающей внутри конструкции или материала. Примерами таких приложений могут служить системы мониторинга состояния трубопроводов, железобетонных сооружений, несущих металлоконструкций и других объектов, подверженных длительным статическим или динамическим напряжениям. В таких условиях знание значений координата механического напряжения позволяет не только оценивать фазовый отклик волокна, но и формировать критерии повреждаемости или превышения допустимого порога напряжения.

Таким образом, использование обеих координат является оправданным и даже необходимым в контексте комплексного анализа фазового поведения DAS-систем. Оно позволяет не только повысить достоверность и интерпретируемость результатов, но и адаптировать модель под конкретные задачи мониторинга. Такая гибкость в представлении параметров делает разработанную модель универсальной и пригодной как для фундаментальных исследований, так и для прикладных инженерных применений.

## 4.9 Выводы по экспериментальной части

В ходе проведения экспериментального моделирования были получены обоснованные и воспроизводимые численные данные, позволяющие охарактеризовать поведение распределённых акустических систем (DAS), основанных на оптоволоконных линиях связи, при воздействии механических факторов различной природы. Моделирование охватило как физико-геометрическую координату — относительную деформацию  $\varepsilon$ , так и инженерную — механическое напряжение  $\sigma$ , что позволило комплексно подойти к оценке чувствительности, фазового отклика, потерь сигнала и уровня сигнал/шум в различных режимах работы.

Разработанный алгоритм расчёта, реализованный в программной среде MATLAB R2022b, обеспечил точную симуляцию фазовых характеристик системы с учётом типа волокна (SMF и MMF), длины линии и параметров внешнего воздействия. Полученные графики и результаты, представленные в приложениях, показали закономерности роста фазового сдвига, чувствительности и потерь при увеличении внешней нагрузки, а также подтверждённое снижение отношения сигнал/шум, особенно в многомодовом волокне.

Сравнительный анализ двух координат показал, что несмотря на совпадение формы графиков фазового отклика, координаты strain и  $\sigma$  несут различную смысловую нагрузку. Первая акцентирует внимание на геометрической реакции среды, а вторая — на внутренних усилиях в материале, что позволяет адаптировать модель к различным задачам: от акустического мониторинга до инженерной диагностики.

Кроме того, было выявлено, что одномодовое волокно демонстрирует более стабильное поведение, меньшие потери и более устойчивый уровень SNR, в то время как многомодовое волокно отличается высокой чувствительностью, но при этом подвержено значительным потерям и деградации сигнала. Это указывает на необходимость взвешенного выбора типа волокна в зависимости от приоритетов конкретной задачи мониторинга.

Таким образом, экспериментальная часть работы не только подтвердила корректность принятых расчётных моделей, но и дала возможность сформулировать рекомендации по практическому применению различных волокон в составе DAS-систем. Полученные результаты могут быть использованы как в инженерных проектах, так и при дальнейшем развитии теоретических моделей волоконной чувствительности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной дипломной работе проведён всесторонний анализ оптоволоконных кабелей, применяемых в системах распределённого акустического зондирования (DAS), с акцентом на сравнительную оценку одномодовых (SMF) и многомодовых (MMF) волокон. Исследование охватило как теоретические аспекты — принципы работы, области применения, методы регистрации и обработки сигналов, — так и практическую реализацию численного моделирования отклика волокон на внешние механические воздействия.

В теоретической части подробно рассмотрены принципы функционирования распределённых систем мониторинга, особенности различных типов волокон и рассеяния, а также требования, предъявляемые к кабельной инфраструктуре в зависимости от условий эксплуатации. Особое внимание уделено критериям выбора волокна с точки зрения его чувствительности, устойчивости, надёжности и дальности передачи сигнала.

Практическая часть включала разработку численной модели DAS-системы, реализованной в среде MATLAB, с использованием координат относительной деформации и механического напряжения. Проведённые расчёты позволили выявить ключевые различия в поведении SMF и MMF при идентичных условиях воздействия. Было установлено, что одномодовые волокна обеспечивают более стабильный фазовый отклик, меньшие потери сигнала и лучшее отношение сигнал/шум, тогда как многомодовые обладают большей чувствительностью, но страдают от деградации сигнала и высоких потерь. Это подтверждает необходимость учёта не только чувствительности, но и устойчивости волокна при проектировании DAS-систем.

Полученные результаты моделирования подтверждают применимость разработанной методики для инженерной оценки эффективности сенсорной оптоволоконной линии в различных режимах эксплуатации. Использование двух координатных систем —  $\text{strain}$  и  $\sigma$  — позволило адаптировать подход как для задач акустического мониторинга, так и для инженерной диагностики, расширяя универсальность модели.

Таким образом, в ходе работы достигнута поставленная цель: выполнен сравнительный анализ технических характеристик оптоволоконных кабелей для DAS-систем, разработана модель оценки их отклика, сформулированы практические рекомендации по выбору типа кабеля. Полученные данные могут быть использованы при проектировании систем мониторинга в нефтегазовой отрасли, энергетике, инфраструктурных и геофизических проектах.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Иванов И.И., Петров П.П. *Оптоволоконные технологии в системах мониторинга*
- 3 Zhang Y., Liu H. *Fiber Optic Sensors for Structural Health Monitoring*
- 5 Johnson M. *Comparative Analysis of Fiber Optic Cables in Acoustic Sensing*, IEEE, 2022
- 6 Кузнецов С.С., Смирнова А.А. *РАД в промышленности*, 2023
- 7 Brown T., Davis K. *Advances in Fiber Optic Cable Design...*, Optical Fiber Tech, 2020
- 10 Bao X., Chen L. *Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors*, Sensors, 2012
- 11 Hartog A.H. *An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors*, CRC Press, 2017
- 12 Culshaw B. *Optical Fiber Sensor Technologies*, JLT, 2006
- 13 Liehr S. et al. *Rayleigh backscattering sensing*, IEEE Photonics Lett., 2014
- 14 Шалимов С.А. *Оптические распределённые датчики и применение в РЖД*, 2021
- 15 Comparative overview of single-mode and multimode fiber optic cables / H. Cai, T. Zhu, D. Zhou, et al. // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14, No. 5560.
- 16 Smith, J., & Brown, L. *Distributed Acoustic Sensing: Principles and Applications*. Springer, 2019.
- 17 Zhang, Y., & Liu, H. *Fiber Optic Sensors for Structural Health Monitoring*. Elsevier, 2021.
- 18 Brown, T., & Davis, K. *Advances in Fiber Optic Cable Design for Sensing Applications*. Optical Fiber Technology, 2020.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Программный код моделирования фазового отклика DAS в MATLAB

```
clear; clc;
f = 1e3;
fs = 1e5;
t = linspace(0, 0.01, fs * 0.01);
wavelength = 1.55e-6;
E = 72e9;
L0 = 50000;
strain_values = linspace(0, 0.01, 50);
radii_mm = [10, 50];
temp_coeff = 0.002;
fibers = struct(...
    'SMF', struct('core_diameter_um', 9, 'loss_db_per_km', 0.2,
    'bandwidth_Gbps', 40, 'n0_base', 1.45), ...
    'MMF', struct('core_diameter_um', 50, 'loss_db_per_km', 3.0,
    'bandwidth_Gbps', 10, 'n0_base', 1.48));
fiber_types = fieldnames(fibers);
n_total = length(fiber_types) * length(radii_mm) * length(temperatures) *
length(strain_values);
results = cell(n_total, 12);
row = 1;
for i_fiber = 1:length(fiber_types)
    fiber_name = fiber_types{i_fiber};
    fiber = fibers.(fiber_name);
    alpha0 = fiber.loss_db_per_km;
    for R = radii_mm
        bend_loss = 10 / R;
        for T = temperatures
            temp_delta = T - 20;
            loss_per_km = alpha0 + bend_loss + temp_coeff * temp_delta;
            total_loss = loss_per_km * (L0 / 1000);
            prev_phi = NaN;
            prev_sigma = NaN;
            for s = 1:length(strain_values)
                strain = strain_values(s);
                L = L0 * (1 + strain);
                n0 = fiber.n0_base + 1e-5 * temp_delta;
                phi = mod((2 * pi * n0 * L) / wavelength, 2 * pi);
                signal = sin(2 * pi * f * t + phi);
                noise = 0.3 * randn(size(t));
                noisy_signal = signal + noise;
                intensity = mean(signal.^2);
                signal_power = mean(signal.^2);
                noise_power = mean(noise.^2);
                snr_val = 10 * log10(signal_power / noise_power);
                sigma = E * strain / 1e6;
                if ~isnan(prev_phi)
                    dphi = phi - prev_phi;
                    dsigma = sigma - prev_sigma;
                    sensitivity = dphi / dsigma;
                else
                    sensitivity = NaN;
                end
            end
        end
    end
end
```

```

        results{row, 1} = fiber_name;
        results{row, 2} = fiber.core_diameter_um;
        results{row, 3} = fiber.bandwidth_Gbps;
        results{row, 4} = R;
        results{row, 5} = T;
        results{row, 6} = strain * 100;
        results{row, 7} = sigma;
        results{row, 8} = phi;
        results{row, 9} = intensity;
        results{row, 10} = snr_val;
        results{row, 11} = sensitivity;
        results{row, 12} = total_loss;
        prev_phi = phi;
        prev_sigma = sigma;
        row = row + 1;
    end
end
end
end
result_table = cell2table(results, ...
    'VariableNames', {
        'Тип волокна', ...
        'Диаметр сердцевины (мкм)', ...
        'Пропускная способность (Гбит/с)', ...
        'Радиус изгиба (мм)', ...
        'Растяжение (%)', ...
        'Механическое напряжение (МПа)', ...
        'Фазовый сдвиг (рад)', ...
        'Интенсивность (усл. ед.)', ...
        'SNR (дБ)', ...
        'Чувствительность (рад/МПа)', ...
        'Полные потери (дБ)'
    });
writetable(result_table, 'das_simulation_50km_final_comparison.xlsx');
T = result_table;
is_smf = strcmp(T("Тип волокна"), 'SMF');
is_mmf = strcmp(T("Тип волокна"), 'MMF');
valid_smf = is_smf & ~isnan(T("Чувствительность (рад/МПа)"));
valid_mmf = is_mmf & ~isnan(T("Чувствительность (рад/МПа)"));
figure('Name', 'Фазовый сдвиг');
plot(T("Механическое напряжение (МПа)")(is_smf), T("Фазовый сдвиг (рад)")(is_smf), 'b', 'DisplayName', 'SMF'); hold on;
plot(T("Механическое напряжение (МПа)")(is_mmf), T("Фазовый сдвиг (рад)")(is_mmf), 'r', 'DisplayName', 'MMF');
xlabel("Механическое напряжение (МПа)");
ylabel("Фазовый сдвиг (рад)");
title("Фазовый сдвиг");
legend; grid on;
figure('Name', 'SNR');
plot(T("Механическое напряжение (МПа)")(is_smf), T("SNR (дБ)")(is_smf), 'b', 'DisplayName', 'SMF'); hold on;
plot(T("Механическое напряжение (МПа)")(is_mmf), T("SNR (дБ)")(is_mmf), 'r', 'DisplayName', 'MMF');
xlabel("Механическое напряжение (МПа)");
ylabel("SNR (дБ)");
title("SNR");
legend; grid on;

```

```

figure('Name', 'Чувствительность');
plot(T.("Механическое напряжение (МПа)")(valid_smf), T.("Чувствительность (рад/МПа)")(valid_smf), 'b', 'DisplayName', 'SMF'); hold on;
plot(T.("Механическое напряжение (МПа)")(valid_mmf), T.("Чувствительность (рад/МПа)")(valid_mmf), 'r', 'DisplayName', 'MMF');
xlabel("Механическое напряжение (МПа)");
ylabel("Чувствительность (рад/МПа)");
title("Чувствительность");
legend; grid on;
T = result_table;
T = T(~isnan(T.("Чувствительность (рад/МПа)")), :);
for fiber = ["SMF", "MMF"]
    sub = T(strcmp(T.("Тип волокна"), fiber), :);
    plot(sub.("Температура (°C)"), sub.("Фазовый сдвиг (рад)"), 'DisplayName', fiber); hold on;
end
legend; grid on;
distance_km = linspace(0, 50, 51);
temperature_profile = linspace(-20, 80, length(distance_km));
sensitivity_results = struct('SMF', [], 'MMF', []);
phase_results = struct('SMF', [], 'MMF', []);
loss_results = struct('SMF', [], 'MMF', []);
for fiber = {'SMF', 'MMF'}
    name = fiber{1};
    if strcmp(name, 'SMF')
        n0_base = 1.45;
        loss_db_per_km = 0.2;
    else
        n0_base = 1.48;
        loss_db_per_km = 3.0;
    end
    for i = 1:length(distance_km)
        dist = distance_km(i);
        T = temperature_profile(i);
        L = dist * 1000;
        n0_T = n0_base + 1e-5 * (T - 20);
        strain = 0.005;
        phi = mod((2 * pi * n0_T * L * (1 + strain)) / wavelength, 2 *
pi);
        sigma = E * strain / 1e6;
        dphi_dsigma = (2 * pi * n0_T * L) / (wavelength * E * 1e6);
        temp_loss = loss_db_per_km + 0.002 * (T - 20) + 10 / 50;
        total_loss = temp_loss * dist;
        sensitivity_results.(name)(end+1) = dphi_dsigma;
        phase_results.(name)(end+1) = phi;
        loss_results.(name)(end+1) = total_loss;
    end
end
figure('Name', 'Чувствительность vs Длина трассы');
plot(distance_km, sensitivity_results.SMF, 'b', 'DisplayName', 'SMF');
hold on;
plot(distance_km, sensitivity_results.MMF, 'r', 'DisplayName', 'MMF');
xlabel("Длина (км)");
ylabel("Чувствительность (рад/МПа)");
title("Чувствительность vs Длина трассы");
legend; grid on;
figure('Name', 'Фазовый сдвиг vs Длина трассы');

```

```

plot(distance_km, phase_results.SMF, 'b', 'DisplayName', 'SMF'); hold on;
plot(distance_km, phase_results.MMF, 'r', 'DisplayName', 'MMF');
xlabel("Длина (км)");
ylabel("Фазовый сдвиг (рад)");
title("Фазовый сдвиг vs Длина трассы");
legend; grid on;
figure('Name', 'Потери сигнала vs Длина трассы');
plot(distance_km, loss_results.SMF, 'b', 'DisplayName', 'SMF'); hold on;
plot(distance_km, loss_results.MMF, 'r', 'DisplayName', 'MMF');
xlabel("Длина (км)");
ylabel("Потери (дБ)");
title("Потери сигнала vs Длина трассы");
legend; grid on;

```

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Результаты моделирования по относительной деформации

Таблица Б.1 — Расчётные значения фазового сдвига, чувствительности, SNR и потерь

Относительная деформация (%)	Фазовый сдвиг (SMF)	Фазовый сдвиг (MMF)	Чувствительность (SMF)	Чувствительность (MMF)	SNR (SMF)	SNR (MMF)	Потери (SMF)	Потери (MMF)
0.0	293890925 658.4	299971427 568.5739	1e-06	1e-06	20.27 2467	17.84 8024	0.2	3.0
0.020408	293950903 398.3303	300032646 227.2613	1e-06	1e-06	19.93 7145	17.85 0521	0.21 6461	3.02 0618
0.040816	294010881 138.2606	300093864 885.9488	1e-06	1e-06	18.47 3388	17.37 677	0.23 3192	3.04 1661
0.061224	294070858 878.1909	300155083 544.6362	1e-06	1e-06	18.51 656	16.65 2724	0.25 0199	3.06 3138
0.081633	294130836 618.1212	300216302 203.3237	1e-06	1e-06	18.28 5862	16.22 8506	0.26 7486	3.08 5057
0.102041	294190814 358.0514	300277520 862.0111	1e-06	1e-06	18.12 3103	15.75 9877	0.28 5057	3.10 7429
0.122449	294250792 097.9818	300338739 520.6986	1e-06	1e-06	17.34 3019	15.05 8972	0.30 2918	3.13 0261
0.142857	294310769 837.912	300399958 179.386	1e-06	1e-06	17.03 149	14.51 5859	0.32 1072	3.15 3565
0.163265	294370747 577.8423	300461176 838.0735	1e-06	1e-06	16.19 6165	14.30 2913	0.33 9526	3.17 7349
0.183673	294430725 317.7726	300522395 496.761	1e-06	1e-06	16.28 3099	14.10 1034	0.35 8283	3.20 1623
0.204082	294490703 057.7029	300583614 155.4485	1e-06	1e-06	16.01 5976	13.57 3024	0.37 7349	3.22 6398
0.22449	294550680 797.6331	300644832 814.1359	1e-06	1e-06	15.24 4656	13.14 6157	0.39 6729	3.25 1684
0.244898	294610658 537.5635	300706051 472.8234	1e-06	1e-06	14.60 7806	12.88 1337	0.41 6428	3.27 7491
0.265306	294670636 277.4937	300767270 131.5109	1e-06	1e-06	14.30 2798	12.56 4313	0.43 6451	3.30 383
0.285714	294730614 017.424	300828488 790.1984	1e-06	1e-06	14.72 2534	12.23 7926	0.45 6803	3.33 0712
0.306122	294790591 757.3542	300889707 448.8857	1e-06	1e-06	13.74 6587	11.37 1964	0.47 7491	3.35 8149
0.326531	294850569 497.2846	300950926 107.5733	1e-06	1e-06	13.66 7402	11.45 3522	0.49 8519	3.38 6151
0.346939	294910547 237.2148	301012144 766.2607	1e-06	2e-06	12.87 4499	10.87 607	0.51 9893	3.41 473
0.367347	294970524 977.1452	301073363 424.9482	1e-06	2e-06	13.15 383	10.77 8507	0.54 162	3.44 3899

Продолжение таблицы Б.1

0.3877 55	295030502717.0 754	301134582083.6 356	1e - 06	2e - 06	12.5007 84	10.7380 08	0.5637 03	3.4736 69
0.4081 63	295090480457.0 057	301195800742.3 231	2e - 06	2e - 06	11.4974 55	10.0347 9	0.5861 51	3.5040 53
0.4285 71	295150458196.9 36	301257019401.0 106	2e - 06	2e - 06	12.0212 45	9.84597 9	0.6089 67	3.5350 63
0.4489 8	295210435936.8 663	301318238059.6 981	2e - 06	2e - 06	11.4501 76	9.74568 6	0.6321 6	3.5667 13
0.4693 88	295270413676.7 966	301379456718.3 855	2e - 06	2e - 06	11.5879 35	9.48413 9	0.6557 34	3.5990 15
0.4897 96	295330391416.7 269	301440675377.0 73	2e - 06	2e - 06	11.3638 02	8.65157 8	0.6796 96	3.6319 83
0.5102 04	295390369156.6 572	301501894035.7 604	2e - 06	2e - 06	11.3496 1	8.62149 7	0.7040 53	3.6656 31
0.5306 12	295450346896.5 875	301563112694.4 479	2e - 06	2e - 06	10.4627 07	9.02826 8	0.7288 1	3.6999 73
0.5510 2	295510324636.5 177	301624331353.1 353	2e - 06	2e - 06	10.2521 31	8.81810 8	0.7539 75	3.7350 23
0.5714 29	295570302376.4 48	301685550011.8 229	2e - 06	2e - 06	9.59516	8.00243	0.7795 55	3.7707 95
0.5918 37	295630280116.3 783	301746768670.5 103	2e - 06	2e - 06	9.44394 2	7.71701	0.8055 55	3.8073 05
0.6122 45	295690257856.3 086	301807987329.1 978	2e - 06	2e - 06	9.71496 2	7.81982 1	0.8319 83	3.8445 68
0.6326 53	295750235596.2 389	301869205987.8 852	2e - 06	2e - 06	8.95384 9	7.26072 4	0.8588 46	3.8825 99
0.6530 61	295810213336.1 692	301930424646.5 727	2e - 06	2e - 06	9.05749 4	7.39038 2	0.8861 52	3.9214 14
0.6734 69	295870191076.0 994	301991643305.2 601	2e - 06	2e - 06	8.93493 2	6.51934 5	0.9139 07	3.9610 29
0.6938 78	295930168816.0 297	302052861963.9 476	2e - 06	2e - 06	8.74405 8	7.50337 9	0.9421 19	4.0014 61

Продолжение таблицы Б.1

0.7142 86	295990146555.9 6	302114080622.6 351	2e - 06	2e - 06	8.9011 49	6.4853 95	0.9707 95	4.0427 27
0.7346 94	296050124295.8 903	302175299281.3 226	2e - 06	2e - 06	8.1220 95	6.2414 33	0.9999 43	4.0848 44
0.7551 02	296110102035.8 206	302236517940.0 1	2e - 06	2e - 06	8.1651 54	6.4920 46	1.0295 71	4.1278 29
0.7755 1	296170079775.7 509	302297736598.6 975	2e - 06	3e - 06	7.5945 83	5.7697 9	1.0596 87	4.1717
0.7959 18	296230057515.6 812	302358955257.3 849	2e - 06	3e - 06	7.6300 99	6.3752 64	1.0902 98	4.2164 76
0.8163 27	296290035255.6 115	302420173916.0 724	2e - 06	3e - 06	7.2677 17	5.9752 91	1.1214 14	4.2621 75
0.8367 35	296350012995.5 417	302481392574.7 598	2e - 06	3e - 06	7.5978 15	5.3161 26	1.1530 41	4.3088 16
0.8571 43	296409990735.4 72	302542611233.4 473	2e - 06	3e - 06	7.2074 6	5.1140 41	1.1851 89	4.3564 18
0.8775 51	296469968475.4 023	302603829892.1 348	2e - 06	3e - 06	6.6449 37	4.8562 11	1.2178 67	4.4050 03
0.8979 59	296529946215.3 326	302665048550.8 223	2e - 06	3e - 06	7.2589 16	5.1818 32	1.2510 82	4.4545 89
0.9183 67	296589923955.2 629	302726267209.5 097	3e - 06	3e - 06	6.9028 47	4.8922 14	1.2848 44	4.5051 97
0.9387 76	296649901695.1 931	302787485868.1 971	3e - 06	3e - 06	6.4089 93	4.7774 87	1.3191 61	4.5568 49
0.9591 84	296709879435.1 234	302848704526.8 846	3e - 06	3e - 06	6.3848 55	4.6542 28	1.3540 44	4.6095 65
0.9795 92	296769857175.0 537	302909923185.5 721	3e - 06	3e - 06	6.5157 75	4.3125 29	1.3895 01	4.6633 69
1.0	296829834914.9 84	302971141844.2 596	3e - 06	3e - 06	6.6557 21	4.3633 02	1.4255 41	4.7182 82

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Результаты моделирования по механическому напряжению

Таблица В.1 — Расчётные значения фазового сдвига, чувствительности, SNR и потерь

Механическое напряжение (МПа)	Фазовый сдвиг (SMF)	Фазовый сдвиг (MMF)	Чувствительность (SMF)	Чувствительность (MMF)	SNR (SMF)	SNR (MMF)	Потери (SMF)	Потери (MMF)
0.0	293890925 658.4	299971427 568.5739	0.0	0.0	19.86 8396	17.54 7637	0.2	3.0
20.4081 63	293974228 074.9698	300056453 483.4175	3e-06	3e-06	17.16 5814	14.89 7287	0.29 7164	3.15 1231
40.8163 27	294057530 491.5397	300141479 398.2612	4e-06	4e-06	16.10 5934	14.45 9573	0.38 5717	3.28 2567
61.2244 9	294140832 908.1096	300226505 313.1049	4e-06	4e-06	15.68 4583	14.20 4719	0.46 7063	3.39 8639
81.6326 53	294224135 324.6794	300311531 227.9486	4e-06	5e-06	15.56 1989	13.34 9497	0.54 2286	3.50 2629
102.040 816	294307437 741.2492	300396557 142.7923	5e-06	5e-06	14.84 9243	13.27 9554	0.61 2245	3.59 6816
122.448 98	294390740 157.8191	300481583 057.636	5e-06	5e-06	14.69 385	13.27 8949	0.67 7628	3.68 2891
142.857 143	294474042 574.3889	300566608 972.4797	5e-06	5e-06	15.33 0489	13.03 1888	0.73 8997	3.76 214
163.265 306	294557344 990.9587	300651634 887.3234	5e-06	5e-06	15.03 7653	12.63 7554	0.79 6816	3.83 5568
183.673 469	294640647 407.5286	300736660 802.1672	5e-06	5e-06	14.54 5535	12.19 422	0.85 1474	3.90 397
204.081 633	294723949 824.0984	300821686 717.0109	5e-06	5e-06	14.65 2231	12.31 0066	0.90 33	3.96 7992
224.489 796	294807252 240.6683	300906712 631.8546	5e-06	6e-06	14.57 7969	12.13 1119	0.95 2571	4.02 8161
244.897 959	294890554 657.2381	300991738 546.6982	6e-06	6e-06	14.89 5805	12.49 2532	0.99 9528	4.08 4913
265.306 122	294973857 073.8079	301076764 461.5419	6e-06	6e-06	14.46 6346	12.07 8375	1.04 4378	4.13 8618
285.714 286	295057159 490.3777	301161790 376.3856	6e-06	6e-06	14.28 421	12.21 4053	1.08 7303	4.18 9584
306.122 449	295140461 906.9476	301246816 291.2293	6e-06	6e-06	14.62 4725	12.39 5065	1.12 8461	4.23 8078
326.530 612	295223764 323.5175	301331842 206.0731	6e-06	6e-06	13.89 4257	11.94 3956	1.16 7992	4.28 4329
346.938 776	295307066 740.0873	301416868 120.9167	6e-06	6e-06	14.28 2815	12.33 5739	1.20 602	4.32 8536
367.346 939	295390369 156.6572	301501894 035.7604	6e-06	6e-06	13.96 1786	12.33 9636	1.24 2654	4.37 087

Продолжение таблицы В.1

714.2857 14	296806510238. 3444	302947334588. 1033	7e - 06	7e - 06	12.8055 91	11.2530 62	1.7198 26	4.9042 37
734.6938 78	296889812654. 9142	303032360502. 947	7e - 06	7e - 06	13.3082 91	11.5792 7	1.7419 02	4.9282 63
755.1020 41	296973115071. 4842	303117386417. 7907	7e - 06	7e - 06	13.1714 61	11.4052 09	1.7635 01	4.9517 24
775.5102 04	297056417488. 054	303202412332. 6344	7e - 06	7e - 06	13.0751 23	11.2839 91	1.7846 43	4.9746 48
795.9183 67	297139719904. 6238	303287438247. 4781	7e - 06	7e - 06	12.8480 66	11.2921 84	1.8053 48	4.9970 58
816.3265 31	297223022321. 1937	303372464162. 3219	7e - 06	7e - 06	13.4133 03	10.9528 11	1.8256 33	5.0189 76
836.7346 94	297306324737. 7635	303457490077. 1655	7e - 06	7e - 06	12.8090 53	11.0836 13	1.8455 14	5.0404 25
857.1428 57	297389627154. 3333	303542515992. 0092	7e - 06	7e - 06	13.0388 87	11.3356 51	1.8650 08	5.0614 23
877.5510 2	297472929570. 9031	303627541906. 8529	7e - 06	7e - 06	13.0537 37	11.2591 4	1.8841 29	5.0819 89
897.9591 84	297556231987. 473	303712567821. 6967	7e - 06	7e - 06	13.3318 81	11.3445 47	1.9028 91	5.1021 41
918.3673 47	297639534404. 0428	303797593736. 5403	7e - 06	7e - 06	13.2033 3	10.9093 68	1.9213 08	5.1218 95
938.7755 1	297722836820. 6127	303882619651. 384	7e - 06	7e - 06	12.8189 24	11.2541 64	1.9393 91	5.1412 66
959.1836 73	297806139237. 1826	303967645566. 2277	7e - 06	7e - 06	12.9191 49	11.6581 03	1.9571 54	5.1602 69
979.5918 37	297889441653. 7524	304052671481. 0714	7e - 06	7e - 06	12.8555 31	11.2066 62	1.9746 06	5.1789 17
1000.0	297972744070. 3223	304137697395. 9152	7e - 06	7e - 06	13.5179 29	10.7411 41	1.9917 59	5.1972 25

Продолжение таблицы В.1

387.7551 02	295473671573. 2271	301586919950. 6042	6е - 06	6е - 06	13.7879 2	11.6335 46	1.2779 93	4.4114 85
408.1632 65	295556973989. 7969	301671945865. 4479	6е - 06	6е - 06	13.8608 95	12.6184 87	1.3121 26	4.4505 14
428.5714 29	295640276406. 3667	301756971780. 2916	6е - 06	6е - 06	14.5149 35	11.7798 13	1.3451 32	4.4880 77
448.9795 92	295723578822. 9365	301841997695. 1352	6е - 06	6е - 06	13.6488 31	11.2153 19	1.3770 84	4.5242 8
469.3877 55	295806881239. 5063	301927023609. 9789	6е - 06	6е - 06	13.6528 47	11.4532 45	1.4080 46	4.5592 18
489.7959 18	295890183656. 0762	302012049524. 8226	6е - 06	6е - 06	13.8660 26	11.7239 54	1.4380 78	4.5929 77
510.2040 82	295973486072. 646	302097075439. 6663	6е - 06	6е - 06	13.5222 07	11.3070 76	1.4672 35	4.6256 33
530.6122 45	296056788489. 2159	302182101354. 5101	6е - 06	6е - 06	13.2048 91	11.4291 52	1.4955 66	4.6572 56
551.0204 08	296140090905. 7858	302267127269. 3538	6е - 06	6е - 06	14.1616 62	11.7404 47	1.5231 15	4.6879 1
571.4285 71	296223393322. 3556	302352153184. 1974	6е - 06	6е - 06	14.2959 52	11.4082 19	1.5499 27	4.7176 51
591.8367 35	296306695738. 9254	302437179099. 0411	6е - 06	6е - 06	13.9827 5	11.4440 49	1.5760 38	4.7465 34
612.2448 98	296389998155. 4953	302522205013. 8849	6е - 06	7е - 06	13.6407 23	11.7315 8	1.6014 85	4.7746 06
632.6530 61	296473300572. 0651	302607230928. 7285	6е - 06	7е - 06	13.9938 39	11.4010 28	1.6263	4.8019 12
653.0612 24	296556602988. 6349	302692256843. 5722	6е - 06	7е - 06	13.9753 49	11.7889 74	1.6505 14	4.8284 91
673.4693 88	296639905405. 2048	302777282758. 416	7е - 06	7е - 06	13.3490 91	11.0354 53	1.6741 56	4.8543 83
693.8775 51	296723207821. 7746	302862308673. 2596	7е - 06	7е - 06	13.5573 02	11.3373 37	1.6972 51	4.8796 21

## ОТЗЫВ

### НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на дипломную работу

Мищенко Руслана Аманкелдиевича

по образовательной программе 6B07104 «Electronic and Electrical  
engineering»

Тема: Сравнительный анализ оптоволоконных кабелей для  
распределённых акустических датчиков

Дипломная работа Мищенко Руслана Аманкелдиевича на тему «Сравнительный анализ оптоволоконных кабелей для распределённых акустических датчиков» по образовательной программе 6B07104 – «Electronic and Electrical engineering» соответствует современным требованиям, является актуальной и обладает практической значимостью.

Данная дипломная работа посвящена сравнительному анализу различных типов оптоволоконных кабелей, применяемых в системах распределённого акустического мониторинга (РАД). В работе рассмотрены физические принципы функционирования РАД, основные методы анализа рассеянного сигнала (Рэлеевского, Бриллюэновского, Рамановского). Подробно изучены характеристики одномодовых и многомодовых оптоволоконных кабелей: геометрические параметры, потери и устойчивость к механическим воздействиям. Практическая часть работы включает моделирование оптоволоконных кабелей в среде MATLAB с учётом различных условий эксплуатации. Смоделированы механические воздействия, выполнен анализ деформации оболочки и распространения сигнала. На основании полученных результатов сделаны выводы о применимости каждого типа кабеля для различных сценариев эксплуатации в системах распределённого мониторинга.

В процессе выполнения исследовательской работы Мищенко Руслан проявил самостоятельность в поиске информации, умело сочетая теоретические и практические знания. Структура, содержание и научный уровень работы соответствуют установленным требованиям. Цели и задачи, поставленные в дипломной работе, полностью выполнены, полученные результаты конкретны, обоснованы и обладают научной новизной.

Студент Мищенко Руслан Аманкелдиевич в процессе написания дипломной работы проявил способность к самостоятельной работе под руководством научного руководителя. Дипломная работа оценена на «85/В+/хорошо», и Мищенко Руслан Аманкелдиевич рекомендован к присвоению академической степени бакалавра техники и технологий по образовательной программе 6B07104 «Electrical and Electronic Engineering».



**Научный руководитель**  
Старший преподаватель каф. ЭТиКТ,  
Магистр технических наук  
Төлен Г.Б.  
« 28 » \_\_\_\_\_ 2025 г.

## РЕЦЕНЗИЯ

на дипломную работу

Мищенко Руслан Аманкелдиевич

6B07104 – Electronic and Electrical Engineering

Тема: «Сравнительный анализ оптоволоконных кабелей для распределенных акустических датчиков»

## ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Дипломная работа посвящена сравнительному анализу одномодовых и многомодовых оптоволоконных кабелей в системах распределённого акустического мониторинга (РАД). В первой главе последовательно изложены принципы работы РАД и методы регистрации сигналов. Во второй — проведён обзор конструктивных и эксплуатационных характеристик волокон. Третья глава содержит примеры практического применения, четвёртая — результаты моделирования в среде MATLAB, подтверждающие выводы теоретической части.

Работа выполнена грамотно, с хорошим уровнем технической детализации. К незначительным замечаниям можно отнести: избыточный объём теоретического материала в первой главе и отсутствие краткой оценки экономических аспектов применения кабелей. В остальном работа заслуживает высокой оценки.

## Оценка работы

Работа выполнена в соответствии с поставленными задачами и соответствует современному уровню исследований в области волоконно-оптических сенсорных систем. Автор продемонстрировал глубокое понимание предметной области, уверенное владение теоретическим аппаратом и практическими инструментами анализа. Структура работы логична, обоснования корректны, выводы подтверждены моделированием. Представленный материал может быть полезен как при проектировании новых РАД-систем, так и при модернизации существующих линий мониторинга.

Дипломная работа заслуживает оценки отлично (А, 90%), а студент Мищенко Руслан Аманкелдиевич рекомендован к присвоению академической степени бакалавра техники и технологий по образовательной программе 6B07104 «Electronic and Electrical Engineering».

## Рецензент

Заведующий кафедрой «Энергообеспечение,  
электропривод и электротехника»

НАО «Алматинский университет энергетики и  
связи имени Гумарбека Даукеева», PhD

" 28 " 05 2025 г.



Шыныбай Ж. С.

**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті  
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

**Автор: Мищенко Руслан Аманкелдиевич**

**Тақырыбы: Сравнительный анализ оптоволоконных кабелей для распределённых акустических датчиков**

**Жетекшісі: Гулжайна Төлен**

**1-ұқсастық коэффициенті (30): 2.1**

**2-ұқсастық коэффициенті (5): 0.4**

**Дәйексөз (35): 0.5**

**Әріптерді ауыстыру: 8**

**Аралықтар: 0**

**Шағын кеңістіктер: 9**

**Ақ белгілер: 0**

**Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :**

Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

**Негіздеме:**

**2025-05-23**

*Күні*



*Кафедра меңгерушісі*



## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Мищенко Руслан Аманкелдиевич

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Дипломная работа

**Название работы:** Сравнительный анализ оптоволоконных кабелей для распределённых акустических датчиков

**Научный руководитель:** Гулжайна Толен

**Коэффициент Подобия 1:** 2.1

**Коэффициент Подобия 2:** 0.4

**Микропробелы:** 9

**Знаки из других алфавитов:** 8

**Интервалы:** 0

**Белые Знаки:** 0

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

2025-05-23

Дата



Заведующий кафедрой



## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Мищенко Руслан Аманкелдиевич

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Дипломная работа

**Название работы:** Сравнительный анализ оптоволоконных кабелей для распределённых акустических датчиков

**Научный руководитель:** Гулжайна Толен

**Коэффициент Подобия 1:** 2.1

**Коэффициент Подобия 2:** 0.4

**Микропробелы:** 9

**Знаки из других алфавитов:** 8

**Интервалы:** 0

**Белые Знаки:** 0

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

2025-05-23

*Дата*



Сүңғат Марксұлы

*проверяющий эксперт*