

Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения  
Казахстанский институт стандартизации и метрологии  
Комитета технического регулирования и метрологии  
Министерства торговли и интеграции Республики Казахстан

*На правах рукописи*

**АЙМАГАМБЕТОВА РАУШАН ЖАНАТОВНА**

**АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ  
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ**

2.2.4.– Приборы и методы измерения  
(по видам измерений)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва, 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	4
ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 ОБЩИЕ ВОПРОСЫ И АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО РАЗВИТИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ .....	11
1.1 Общие вопросы проведения анализа и описание источников получения первичной информации .....	11
1.2 Обзор современных интеллектуальных систем мониторинга целостности протяженных объектов на основе волоконно-оптических датчиков .....	15
1.3 Использование волоконно-оптических датчиков в различных областях промышленности с анализом международного опыта .....	33
1.4 Использование волоконно-оптических технологий в системах мониторинга с анализом международного опыта .....	36
1.5 Существующие методы контроля роста трещин в железобетонных конструкциях .....	41
1.6 Виды и назначение волоконно-оптических датчиков .....	49
Выводы по главе 1 .....	54
2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО И ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ .....	56
2.1 Выбор методов исследования и среды моделирования .....	56
2.2 Основные теоретические сведения для разработки физико-математических основ проведения моделирования .....	57
2.3 Математическое описание процесса изменения свойств световой волны при механической нагрузке на ОВ .....	61
2.4 Физико-математическая модель оптико-механических процессов в оптическом волокне при его деформации .....	68
2.5 Компьютерное моделирование механических нагрузок на оптическое волокно при его растяжении и микроизгибе .....	74
Выводы по главе 2 .....	84
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАБОРАТОРНЫХ ОБРАЗЦОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ, РАЗМЕЩЁННЫХ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ .....	87

3.1 Материалы и методы исследования.....	87
3.2 Исследование балок с волоконно-оптическими датчиками по схеме №1 при их нагружении с помощью пресса П-125 .....	90
3.3 Исследование балок с волоконно-оптическими датчиками по схеме №2 при их нагружении с помощью пресса П-125 .....	94
3.4 Исследование балок с волоконно-оптическими датчиками по схеме №3 при их нагружении с помощью пресса П-125 .....	100
3.5 Исследование балок с волоконно-оптическими датчиками по схеме №4 при их нагружении с помощью гидравлического пресса ПГИ – 500 .....	104
3.6 Исследование балок с волоконно-оптическими датчиками по схеме №4 при их нагружении с помощью гидравлического пресса МИИ–100 .....	109
Выводы по главе 3 .....	113
<b>4 АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ .....</b>	<b>116</b>
4.1 Интеллектуальный метод контроля параметров светового пятна .....	135
4.2 Основные схемы АПК и рекомендации по ее использованию .....	144
4.3 Калибровка АПК и практическая апробация.....	152
Выводы по главе 4 .....	160
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>162</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>164</b>
Приложение А .....	178
Приложение Б.....	184
Приложение В.....	196
Приложение Г .....	201
Приложение Д.....	214

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

НДС – напряженно-деформированное состояние.

ОВ – оптическое волокно.

ВОДКН – волоконно-оптический датчик контроля нагрузки.

АПК – аппаратно-программный комплекс.

ВОД – волоконно-оптический датчик.

OTDR – Optical Time Domain Reflectometer.

CNN – нейронная сеть.

ОВМ – оптоволоконный материал.

ФММ – физико-математическая модель.

АСК – автоматическая система контроля.

СЖК – строительные железобетонные конструкции.

OpenCV – Open Source Computer Vision Library.

PD – фотодетектор.

DAQ – data acquisition.

UWFBG1 – специальные решетки Брэгга.

Cir – циркулятор.

PG - световые импульсы.

SOA – полупроводниковый оптический усилитель.

EDFA - волоконный усилитель, легированный эрбием.

OT – вращающееся зеркало Фарадея.

MFCC – коэффициент кепструмы малой частоты.

DL-TSD - deep learning temporal-spatial detection.

HMM – скрытые марковские модели.

SVM - машины опорных векторов.

T-SNE - T-распределенного стохастического встраивания соседей.

Grad-CAM- отображения активности классов со взвешенным градиентом.

GPS - глобальная навигационная спутниковая система.

IoT - internet of things.

ПЛИС - программируемая логическая интегральная схема.

GPR - проникающий радар.

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования**

Контроль технического состояния протяженных объектов и строительных конструкций в режиме реального времени позволит решить ряд важных задач, связанных с повышением эффективности и безопасности эксплуатации различных зданий и сооружений. Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки средств контроля для своевременной идентификации скрытых дефектов протяженных объектов, строительных конструкций, в том числе монолитных железобетонных фундаментов. Основная идея диссертационной работы заключается в возможности и реализации применения стандартного одномодового оптического волокна для контроля технического состояния объектов большой протяжённости, прежде всего монолитных железобетонных фундаментов. Оптическое волокно используется как сенсор и канал передачи данных о проведенных измерениях в режиме реального времени. Особенность заключается в том, что оптическое волокно (ОВ) размещается непосредственно внутри монолитной железобетонной строительной конструкции, например фундамента, или закрепляется на его поверхности. При изменении напряженно-деформированного состояния (НДС) возникают концентраторы напряжения, которые создают аварийно-опасные зоны разрушения, где формируются трещины. Рост трещин и их раскрытие могут происходить с различной интенсивностью, что приводит к внезапному разрушению монолитной железобетонной строительной конструкции, например фундамента. При этом образовавшиеся дефекты могут быть скрыты и недоступны для визуального поиска. Разрушение фундамента создает опасность для всей строительной конструкции в целом. В случае появления дефектов или разрушения фундамента ОВ подвергается деформации, которое вызывает изменение показателя преломления, что в свою очередь влечет изменение параметров излучения, которое можно зафиксировать при помощи фотоприемника. Деформация ОВ приводит к его микроизгибу, и появляется известный фотоупругий эффект, который вызывает изменения параметров хода луча внутри ОВ. Происходит множество изменений свойств излучения, а именно изменяются интенсивность, фаза распространения электромагнитной волны, увеличиваются дополнительные потери и другое. Контролируя изменения указанных параметров, можно идентифицировать параметры нагрузки на ОВ и определить место формирования дефектов и аварийно-опасной зоны разрушения монолитной строительной конструкции. Полученная информация от волоконно-оптического датчика контроля изменения нагрузки на фундамент обрабатывается при помощи аппаратно-программного комплекса. Внезапное разрушение строительной конструкции несет в себе определённую опасность и создает угрозу для людей. Ранняя диагностика в режиме реального времени и своевременное оповещение об опасности разрушения монолитной железобетонной строительной конструкции, а также установление точного места формирования трещин является весьма актуальным. Можно выделить одну сложную задачу, не решенную в полной мере и связанную со скрытым образованием и ростом трещины в монолитных

железобетонных конструкциях зданий или сооружений. Трещины, особенно скрытые, представляют серьезную опасность, поскольку при отсутствии контроля за их ростом и раскрытием фактическое техническое состояние конструкции является неизвестным, а последствия эксплуатации таких конструкций могут быть достаточно серьезными в плане угрозы обрушения и гибели людей. Задачу эффективного контроля технического состояния протяженных объектов и монолитных строительных конструкций, в том числе железобетонных фундаментов, можно решить за счет использования автоматических систем волоконно-оптического контроля, основанных на использовании цифровых технологий. Применение ОВ как чувствительного датчика является экономически и технически выгодно. На основе ОВ можно создать распределённый волоконно-оптический датчик контроля нагрузки на элементы строительной конструкции (ВОДКН) протяженностью до нескольких километров. При этом ОВ является энергопассивным, взрыво- и пожаробезопасным, не воспринимающим электромагнитные помехи. Данная система может быть востребована для мониторинга технического состояния конструктивных элементов зданий и сооружений, что позволит повысить уровень контроля и цифровизации в строительной отрасли с учетом тенденций развития Индустрии 4.0. Распределенный волоконно-оптический датчик может быть одновременно чувствительным элементом и направляющей системой связи. Использование ОВ в системе контроля позволит достичь высоких показателей энергоэффективности, а также обеспечивает хорошую помехозащищенность. Предлагаемый аппаратно-программный комплекс (АПК) способен с достаточно высокой точностью контролировать изменения напряженно-деформированного состояния монолитных железобетонных строительных конструкций с целью своевременного предупреждения об опасности их разрушения. АПК обладает достаточно широкой областью применения, относительной простотой, невысокой стоимостью и позволяет обеспечить безопасную эксплуатацию строительных и протяженных объектов и принять превентивные меры по их защите, являясь новым инструментом неразрушающего контроля.

#### **Степень разработанности темы исследования.**

Данная работа опирается на широкий круг источников, посвященных исследованию научных направлений связанных с контролем технического состояния протяженных объектов и строительных конструкций с использованием волоконно-оптических датчиков, значительный вклад в развитие данного направления внесли ученые России: Бусурин В. И., Бутусов М. М., Гречишников В. М., Жилин В. Г., Зак Е. А., Конюхов Н. Е., Малков Я. В., Мурашкина Т. И., Потапов В. Т., Удалов Н. П. и другие ученые из стран ближнего и дальнего зарубежья: Т. Окосси, К. Окомото, Дж. Ли, Дж. Чай, С. Уэй, С. Ким, И.Х. Пак, К. Чо, К. Кинзо, Н. Кенити, А. Гузик, М. Ацуси, Я. Йосиаки, Дж. Сонг, D. Kumar Артур, Макита Ацуси, Ямаути Йосиаки, Atul Kumar.

Анализ показал актуальность проведения дальнейших исследований, связанных с разработкой современных методов и средств контроля технического состояния строительных конструкций и протяженных объектов с использованием

квази -распределенных и распределенных волоконно-оптических датчиков. Отсутствие реализованных аналогов, способных контролировать техническое состояние по всей протяженности строительных конструкций в режиме реального времени, является основанием проведения научных исследований. Выбор темы, цели и поставленных задач обусловлены их актуальностью, теоретической и практической значимостью.

**Целью диссертационной работы** является создание аппаратно-программного комплекса контроля технического состояния строительных конструкций на основе волоконно-оптических датчиков для идентификации повреждений в режиме реального времени и обеспечения безопасности эксплуатации монолитных железобетонных конструкций.

**Задачи диссертационного исследования:**

- разработать физико-математическую модель оптико-механических процессов механического воздействия на волоконно-оптический сенсор;
- провести компьютерное моделирование процесса механического воздействия на волоконно-оптический сенсор, находящийся внутри монолитных железобетонных конструкций;
- экспериментально исследовать параметры датчиков, входящих в волоконно-оптическую систему;
- разработать аппаратно-программный комплекс, предназначенный для оперативного технического контроля состояния железобетонной конструкции;
- провести калибровку датчика для оценки точности измерений.

**Научная новизна диссертационного исследования заключается** в разработке новой методики контроля технического состояния строительных конструкций на основе оптико-электронного анализа параметров, полученных от волоконно-оптических датчиков, **а именно:**

- создана методика контроля технического состояния строительных конструкций и протяжённых объектов с одновременным использованием волоконно-оптических чувствительных элементов (датчиков) распределённого и квази-распределённого типа с оптико-электронным анализом изменения параметров оптической волны в режиме реального времени;
- впервые предложена физико-математическая модель с учетом объемной плотности мощности и других параметров электромагнитного поля волны в оптоволокне, расположенном вдоль оси горизонтальной деформируемой железобетонной балки;
- получены результаты экспериментального исследования образца волоконно-оптической системы контроля технического состояния строительных конструкций или протяжённого объекта, способного при помощи квази-распределённых датчиков установить участок повреждения, а с помощью метода оптической рефлектометрии определить место разрушения с точностью до 1 метра;
- впервые разработана волоконно-оптическая квази-распределённая система с аппаратно-программным комплексом контроля на основе оптико - электронного

анализа изменения интенсивности оптической волны, распространяющейся по оболочке оптического волокна.

**Объектом исследования является** аппаратно-программный комплекс контроля технического состояния строительных конструкций на основе волоконно-оптических датчиков.

**Предметом** исследования являются свойства, процессы, принципы действия и технические параметры аппаратно-программного комплекса контроля технического состояния строительных конструкций на основе волоконно-оптических датчиков.

**Теоретической основой исследования** послужили объективные закономерности, теоретические основы механики разрушения твердого тела, оптики и интеллектуальной обработки видеоизображений по теме исследования, а также труды российских и зарубежных ученых и специалистов. При написании диссертационной работы использовались общенаучные методы и принципы проведения исследований: системный подход, получение первичной информации из различных источников, научный анализ, теория и практика научного эксперимента, методы научного познания, эмпирические и теоретические методы исследования, планирования эксперимента и статистическая обработка полученных результатов.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Разработанная физико-математическая модель позволяет установить деформацию железобетонной строительной конструкции по потерям оптической мощности и по изменению параметров распределения объемной плотности электромагнитного поля волны, сформированных в оболочке оптического волокна при его микроизгибе.

2. Методика контроля технического состояния строительных конструкций с применением волоконно-оптических датчиков квази -распределенного типа на длине волны 650 нм и распределённого типа на длине волны 1310 и 1550 нм, позволяет определить поврежденный участок посредством проведения оптико-электронного анализа изменения параметров излучения оптической волны распространяющейся по оболочке ОВ.

3. Аппаратно-программный комплекс контроля технического состояния железобетонных конструкций с использованием волоконно-оптических датчиков позволяет обеспечить непрерывный дистанционный контроль за счет анализа изменения интенсивности светового пятна с преобразованием численной картины пикселей на основе оптико-электронного анализа.

**Теоретическая значимость работы** заключается в развитии теоретических основ, физико-математической модели и положении теории интеллектуального оптико-электронного анализа изменений интенсивности световой волны, проходящей по оптическому волокну, и изменения картины пикселей при увеличении нагрузки на боковую поверхность ОВ для создания новой методики контроля технического состояния строительных конструкций или протяженного объекта, расширяет используемый теоретический и методический аппарат.



**Практическая значимость** заключается в разработке новой методики и лабораторного образца аппаратно-программного комплекса контроля технического состояния строительных конструкций или протяженного объекта. Предлагаемая методика контроля технического состояния строительных конструкций, обладает рядом преимуществ в сравнении с уже существующими методами, не позволяющими осуществлять наблюдения за объектом в режиме реального времени. Результаты диссертационной работы были внедрены в НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева». Практическая значимость подтверждается протоколом заседания технической службы ТОО Строительная компания «Empire Construction» и РГП «Казахстанский институт стандартизации и метрологии». Результаты внедрения подтверждены актами внедрения.

**Апробация работы** была проведена путем очного участия и доклада на трех международных конференциях, проходивших на территории России и стран ближнего зарубежья.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается за счет анализа первичной информации, полученной из наукометрических баз данных РИНЦ, WoS и Scopus, а также патентным поиском. Достоверность полученных результатов гарантируется за счет оценки совпадения теоретических и практических результатов исследования образца аппаратно-программного комплекса на основе волоконно-оптических датчиков распределенного и квази -распределенного типа, значительным объемом проведенных полевых испытаний на действующем строительном объекте ТОО «Empire Construction». Достоверность полученных результатов обеспечивалась методами планирования и статистической обработки экспериментальных данных.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 7 статей в рецензируемых журналах, включённых в Перечень ВАК РФ, 4 статьи в журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science. Основные результаты были представлены на 3 международных научно-практических конференциях с докладом. Техническая новизна разработки подтверждается 2 патентами РК. В научных публикациях и патентах отражен ряд важных моментов, касающихся принципа работы АПК, его настроек и возможностей, также отражены вопросы совершенствования его работы и поиска новых технических решений, направленных на улучшение предлагаемого средства автоматического контроля, работающего в режиме реального времени.

**Личный вклад автора.** Личный вклад автора заключается в проведении научного анализа литературы, в разработке физико-математической модели, выполнении основного объема теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, в разработке аппаратно-программного комплекса, численного анализа изменения картины пикселей светового пятна при изменении нагрузки на ОБ, находящееся внутри строительной конструкции, в разработке методики контроля и оформлении результатов в виде публикаций и научных докладов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа содержит следующие разделы: введение, четыре главы, выводы по каждой главе, заключение, список литературы, состоящей из 169 источников и приложения. Общий объем диссертационной работы составляет 219 страниц, включает 124 рисунка, 3 таблицы и 5 приложения

# **1 ОБЩИЕ ВОПРОСЫ И АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО РАЗВИТИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ**

## **1.1 Общие вопросы проведения анализа и описание источников получения первичной информации**

Высокую актуальность в настоящее время приобретают цифровые интеллектуальные системы контроля, которые способны с высокой точностью контролировать техническое состояние различных строительных конструкций в режиме реального времени. При этом строительный объект может быть достаточно протяженным, в этом случае контролировать его техническое состояние при помощи точечных электрических датчиков становится невозможно с технической точки зрения, а также экономически не оправданно по ряду некоторых важных показателей. Точечные электрические датчики могут быть не эффективны в некоторых случаях, так как они не могут дать полной картины изменения нагрузки и напряженно-деформированной протяженной монолитной железобетонной конструкции. Второй проблемой является то, что все датчики, основанные на электрических сигналах, требуют наличие электрической сети или источника питания постоянного тока. Передача информации в таких датчиках осуществляется по проводу или радиоканалу, что тоже создает ряд проблем и ограничивает их применение. В данной работе предлагается использовать не электрические, а волоконно-оптические датчики, которые имеют ряд известных и неоспоримых преимуществ в сравнении с электрическими. Важным моментом является то, что при помощи оптического волокна (ОВ) можно выполнять не только точечные измерения, но и построить квази-распределенную и распределенную систему контроля технического состояния строительных конструкций. При этом протяженность измерительного полностью энергопассивного канала может составлять несколько км. При этом ВОД не могут стать источником взрыва газовой атмосферы или создать угрозу пожара. Так как ВОД уже используются в различных отраслях промышленности как в России, так и за ее пределами, их конструкции уже достаточно отработаны, а физико-математические основы уже заложены, но есть некоторые нерешенные вопросы в области научных знаний, связанные с ВОД, а также некоторые технические задачи. Данная работа нацелена на создание принципиально нового АПК контроля технического состояния строительных конструкций на основе ВОД. Принципиальное отличие и новизна предлагаемого научно-технического решения доказываются отсутствием аналогов, имеющих схожий принцип действия. Заканчивая короткое вступление, можно перейти непосредственно к результатам анализа научной литературы и раскрыть методы сбора первичной информации.

Идея использования ВОД для измерений впервые была предложена в 1960-х годах, когда Ч. Као и Дж. Хокхем представили возможность использования стекловолоконных световодов в качестве коммуникационной среды для передачи оптического излучения. Параллельно Дж. Саймон и Э. Спитц изучали

диэлектрические волноводы. В своих работах ученые показали, что по стекловолокну можно передавать оптические сигналы с меньшими потерями, чем по коаксиальным медным кабелям, и при этом с гораздо большей информационной емкостью.

Однако первые ВОД появились лишь много позже, а в конце 1970-х – начале 1980-х годов, с появлением одномодовых оптических волокон, родилась идея интерферометрии, открывшая большие перспективы для разработки и использования различных физических датчиков.

Хартогом продемонстрировал распределенные датчики на основе волокон с жидким сердечником, опрашиваемых методом рефлектометрии во временной области; Дж. Дакин представил первые экспериментальные результаты распределенного ВОД на основе комбинационного рассеяния с использованием рефлектометрии во временной области; а Дж. Хартогом продемонстрировал распределенный датчик на основе волокна с жидким сердечником, опрашиваемого методом рефлектометрии во временной области.

Появились первые исследования распределенных волоконных датчиков на основе рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (МБС) и рэлеевского рассеяния. Кроме того, в 1980-х годах стали появляться идеи по применению и предприниматься первые попытки коммерциализации новых типов датчиков.

Данная работа опирается на широкий круг источников, посвященных исследованию научных направлений, связанных с контролем технического состояния протяженных объектов и строительных конструкций с использованием ВОД. Значительный вклад в развитие данного направления внесли ученые России: Бусурин В. И., Бугусов М. М., Гречишников В. М., Жилин В. Г., Зак Е. А., Конюхов Н. Е., Малков Я. В., Мурашкина Т. И., Потапов В. Т., Удалов Н. П. и другие ученые из стран ближнего и дальнего зарубежья: Т. Окосси, К. Окомото, Дж. Ли, Дж. Чай, С. Уэй, С. Ким, И.Х. Пак, К. Чо, К. Кинзо, Н. Кенити, А. Гузик, М. Ацуси, Я. Йосиаки, Дж. Сонг, D. Kumar Артур, Макита Ацуси, Ямаути Йосиаки, Atul Kumar и многие другие, чьи работы были рассмотрены и представлены в списке литературы. Перечислять все фамилии ученых не является необходимым, так как далее будет рассмотрено наиболее важных исследований и результатов, которые имеют важное значение для развития волоконно-оптических средств контроля и измерения. Изучив работы данных авторов, определила, что требуется проведение дальнейших, связанных с разработкой современных методов и средств контроля технического состояния строительных конструкций и протяженных объектов с использованием квази – распределенных и распределенных волоконно-оптических датчиков. Отсутствие аналогов способных контролировать техническое состояние по всей протяженности строительных конструкций в режиме реального времени, что и является основанием проведения научных исследований.

Для повышения достоверности использовались, в первую очередь, проверенные источники, прошедшие рецензирование, этим обеспечена определенная достоверность проведенного анализа современного состояния научных достижений. При анализе использованы материалы, размещенные в наукометрических базах данных WoS и Scopus, а также базы данных

отечественных и зарубежных патентов, в том числе Республики Казахстан, которые тоже являются гарантированно надежными источниками первичной информации. Анализу подвергся материал, имеющийся в базе РИНЦ, а также других зарубежных стран, в том числе Казахской базы данных КазБЦ. Материал данных баз в большей мере представлен на русском языке, что облегчает понимание сути статьи и ее результатов. Что касается баз данных WoS и Scopus, вся информация представлена на английском языке, но это не создает проблем, так как уровень освоения английского языка вполне достаточный для понимания, в исключительных случаях использованы возможности машинного перевода. Также частично некоторая информация была получена из открытых источников, но выбиралась путем тщательного анализа и сравнения с информацией размещенных на аналогичных сайтах компаний, работающих с ВОД и выполняющих различные проекты. Приоритет отдавался только официальным сайтам, на которых с высокой вероятностью размещена проверенная информация.

В большей мере использовались сведения, полученные от источников с временным диапазоном издания – с 2012 года по 2022. 2023 год из анализа был исключен, но наиболее важные работы были изучены и проанализированы. Можно сказать, что не все статьи за 2022 год внесены в базу, этот процесс продолжается, поэтому имеется некое снижение показателей научного интереса к ВОД и системам обработки данных, полученных от ВОД, но это не объективный фактор, и выводы по нему нужно делать к концу 2023 года. Что касается 2023 года, то он справедливо не попал в статистику, так как на начало года публикаций было незначительное количество. Анализ русскоязычных публикаций ученых из Казахстана показал аналогичные результаты роста популярности развития оптических систем измерения и контроля, а также увеличение количества статей, посвящённых исследованию ВОД. В дальнейшем будут приведены наиболее важные публикации российских ученых, работающих в области ВОД и волоконно-оптической техники. Несмотря на то, что количество публикаций российских ученых измеряется десятками, всё равно не наблюдается тенденция роста количества опубликованных статей с 2021 по 2022 годы. Есть определенные результаты, связанные с разработкой и использованием ВОД в основном в нефтегазовой отрасли, где в силу достаточно тяжелых агрессивных условий эксплуатации датчиков и отсутствия альтернативы, классические электрические датчики не справляются с перегрузками. Есть некоторые работы российских ученых, которые посвящены созданию систем охраны нового поколения, в основе которых лежат ВОД. Обо всех достижениях как российских, так и зарубежных ученых будет подробно рассказано далее. Также будут подробно рассмотрены полученные результаты предшественников с указанием конкретных ссылок на литературный источник, благодаря чему возможны проверка и оценка достоверности представленных сведений.

Результаты анализа наукоёмкой базы группы Elsevier (Scopus и Science direct). Было проанализировано несколько тысяч различных статей, входящих в область научных направлений диссертации. Результат анализа дал следующий результат, который представлен на диаграмме (рисунок 1). Как видно, на рисунке

наблюдается рост публикаций, посвящённых ВОД, волоконно-оптической технике и системам контроля или измерений, созданных на основе ВОД. Линия тренда показывает значительный рост, несмотря на ослабление периода 2020-2022 годов. Нужно понимать, что некоторые исследования многими учеными были прекращены из-за всемирной пандемии COVID-19, которая внесла определенную лепту в снижение научной активности на всей планете.

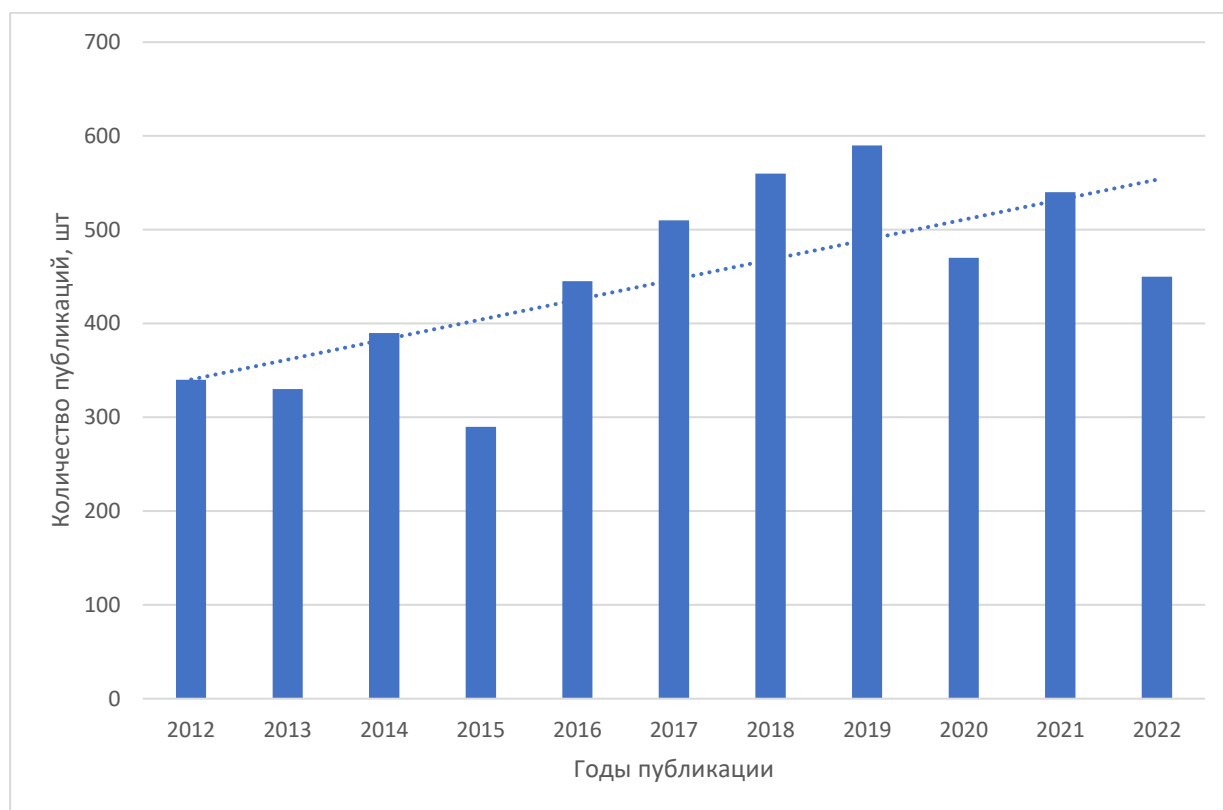


Рисунок 1 – Результаты анализа баз данных Scopus и Science direct

Диссертация отчасти решает задачу повышения эффективности контроля технического состояния монолитных СЖК зданий и сооружений, при этом используются интеллектуальные цифровые оптические технологии. Также необходимо понимать, что предлагаемый АПК контроля технического состояния строительных конструкций на основе ВОД является чисто цифровой и энергоэффективной технологией, которая отвечает задачам Индустрии 4.0. Работа направлена на решение достаточно известной задачи, но при помощи новых методов. Известная проблема внезапного обрушения строительных монолитных конструкций в процессе их длительной эксплуатации существует достаточно давно и решена не в полном объеме, хотя исследователи разных стран работают над ее решением. Можно сказать, что это достаточно серьезная задача, так как требуется разработка новых средств диагностики и контроля технического состояния строительных конструкций. При этом должны быть обеспечены высокие технико-экономические показатели системы контроля, а также ее относительная простота и адаптивность к климатическим условиям России и Казахстана. В анализе

учитывался как положительный опыт, так и отрицательный. ВОД не работает без АПК и не может быть использован в отдельности, так как будет не соответствовать требованиям и условиям эксплуатации строительных объектов. Одной из особенностей предлагаемых в рамках данной диссертационной работы ВОД является возможность их использования как на вновь возводимых строительных объектах, когда идет строительство по всем этапам, например, подготовка основания, возведение фундамента, ограждающих конструкций и так далее, так и при контроле технического состояния уже возведенных зданий, находящихся в эксплуатации. Чувствительный элемент (ВОД) может размещаться как непосредственно внутри фундамента или иной железобетонной конструкции, так и быть установлен на этапе ее изготовления путем закрепления на арматуре и выводе концов для последующего присоединения к блоку обработки данных. Вторым вариантом может быть установка ВОД на боковых гранях строительных конструкций, но в данной работе этот метод не рассмотрен, так как рассматривается как перспективный. Обзор разделен на некоторые логические части, которые представляют определенное научное направление. Все использованные графические материалы обзора взяты из статей, находящихся в открытом доступе наукоемких баз данных WoS и Scopus. Каждый рисунок представляет информацию, с которой автор настоящей диссертации знакомит читателя, и не является его интеллектуальной собственностью. Использование оригинальных рисунков позволит обойтись без искажения схем и графиков. Каждый использованный графический материал имеет ссылку на соответствующий источник и не используется в части описания собственных исследований. Данный графический материал поможет в дальнейшем показать новизну и оригинальность предлагаемого научно-технического решения.

## **1.2 Обзор современных интеллектуальных систем мониторинга целостности протяженных объектов на основе волоконно-оптических датчиков**

Первая часть обзора сводится к изучению зарубежного опыта в области интеллектуальных систем мониторинга целостности протяженных объектов на основе ВОД. Вне сомнения лидерство в данном вопросе по количеству принадлежит ученым из Азии. Выполненный литературный обзор существующих интеллектуальных систем контроля целостности протяженных объектов, таких как строительные конструкции, которыми могут быть не только фундаменты и перекрытия зданий, но и мосты, плотины, насыпи или трубопроводы. В каждой статье речь касается использования той или иной конструкции ВОД или описываются различные методы контроля при помощи распределенных ВОД. Авторы статей представляют свои схемы реализации системы контроля с использованием ВОД. Каждый автор высказывает свою идею по компоновке схемы системы и излагает принцип ее работы, а также показывает результаты исследований, оформленных графиками зависимости. Представленные далее схемы необходимы для понимания принципа работы и как система контролирует

целостность объекта. Также имеются сведения, что делается для повышения точности идентификации места обнаружения дефекта. Большая часть авторов склоняется к тому, что у протяженного объекта длиной в несколько километров точность достигается при применении методов оптической рефлектометрии. В некоторых случаях выявлены определенные недостатки, представленные на рисунках измерительных схем, и предложены рекомендации по их устранению. Важным вопросом является наличие помех в оптических измерительных каналах, распределенные ВОД могут генерировать помехи такого уровня, что они полностью делают невозможным обработку полезного сигнала. Так называемый эффект «фединга», когда происходит изменение фазы распространения оптической волны из-за изменения температуры ОВ, причем это возможно, как и при росте, так и при снижении температуры. Этому подвержен ряд схем, использующих в своей основе оптический интерферометр, причем не важно, каков его тип или рефлектометр. Авторы статей знают о данных проблемах, связанных с изменением механических перенапряжений в ОВ или внешней температуры воздействия, поэтому предлагают различные системы фильтрации, но самыми эффективными будут интеллектуальные. Наиболее высокий результат достигнут, когда используется метод оптической рефлектометрии временной области (OTDR) с анализом данных при помощи нейронной сети (CNN). Анализ выявил как преимущества, так и недостатки, свойственные нейронным сетям, используемым для контроля технического состояния протяженных объектов.

К протяженным объектам можно отнести: монолитные железобетонные фундаменты, мосты, плотины, насыпи, различные трубопроводы и другие объекты, имеющие значительные размеры. При этом они имеют различное назначение и выполняют различные технологические функции. Например, трубопровод может простираться в земле на сотни километров, соответственно и ВОД должен быть аналогичной длины, при-этом придется поставить по пути следования ВОД несколько регенерационных станций, так как оптическому излучению, распространяющемуся по сердцевине ОВ свойственно иметь проблему с различными видами дисперсии. Кроме дисперсии имеется и проблема затухания сигналов, так, для многомодовых ОВ затухание на один километр трассы в десятки раз выше, чем у одномодовых волокон. ВОД, выполненный на основе многомодового ОВ имеет протяженность в пределах 800 м, а эффективная дистанция его работы в пределах 500 метров. Напротив, ВОД, выполненный на основе одномодового волокна, способен работать до сотен километров, но для датчиков все-таки его границы ближе к пределу 50 км. Так как помех в нем рождается значительно больше и без использования интеллектуальной обработки данных трудно построить адекватную и устойчивую к помехам систему. Многомодовое волокно в настоящий момент не используется в телекоммуникации и используется для связи вычислительных процессоров, размещенных обычно в одном здании или в здании рядом при максимальной удаленности 400-500 метров. Предлагаемый далее АПК контроля технического состояния строительных конструкций на основе волоконно-оптических датчиков выполнен на одномодовом волокне. Учитывая, что длина фундамента по кругу составляет обычно в пределах



одного или двух километров, то большой проблемы с помехами ожидать не следует, но они обязательно будут. Однозначно без интеллектуальной обработки данных не обойтись. Что касается причин разрушения протяженных объектов, может быть, различных, например, техногенные явления и строительные работы, когда из-за человеческого фактора происходят различные аварии. Также могут быть ошибки в проектировании и нарушение технологии строительства.

Системы, выполненные на основе использования методов оптической рефлектометрии временной области (OTDR), могут быть использованы для контроля технического состояния и охраны периметров протяженных объектов. Данные системы отличаются низким электропотреблением, наличием распределенного ВОД и хорошей устойчивостью к электромагнитным помехам. ВОД можно укладывать на провода высоковольтных линий электропередачи или в непосредственной близости от них.

Метод фазочувствительной рефлектометрии. Данный метод широко применяется для фиксации механических вибраций, что существенно расширяет сферу его применения, когда, например, методы оптической рефлектометрии не обеспечивают необходимой чувствительности. Одним из решений является усиление оптического сигнала [1-10].

Имеются сведения о системе [1], схема которой подставлена на рисунке 2.

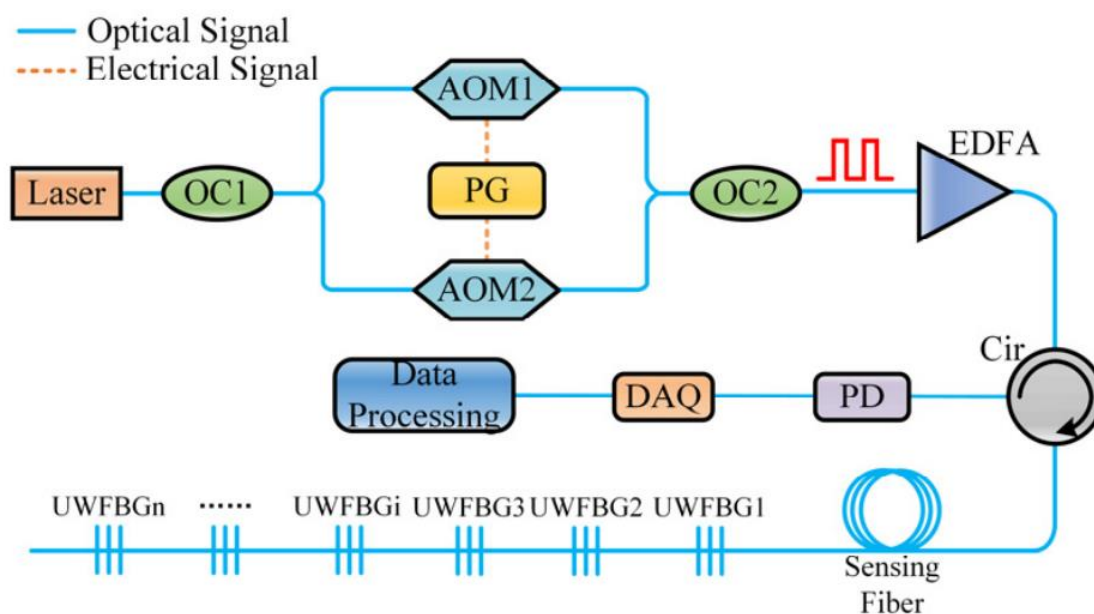


Рисунок 2 – Структурная схема системы [1]

Система может реагировать на вибрации, как и рассмотренная ранее схема. В данной схеме применяются уже два акустооптических модулятора (AOM1, AOM2), у которых имеются различные сдвиги частот на 120 и 200 МГц. Информация поступает на фотодетектор (PD), после чего начинается процесс обработки данных в устройстве (DAQ) и (Data Processing). Система использует решетки Брэгга. Оптические сигналы проходят через специальные решетки Брэгга (UWFBG1) – (UWFBGn) или распределённый Брэгговский отражатель и позволяют с высокой точностью установить расстояние до источника вибраций или места механического

воздействия. В данной схеме используется циркулятор (Cir) световой волны, который обеспечивает поляризацию сигнала. Источником световых импульсов (PG) создается синусоидальный сигнал, который использует модуляцией.

Контроль изменения параметров интенсивности обеспечивает возможность определения расстояния до повреждения протяженного объекта (рисунок 3).

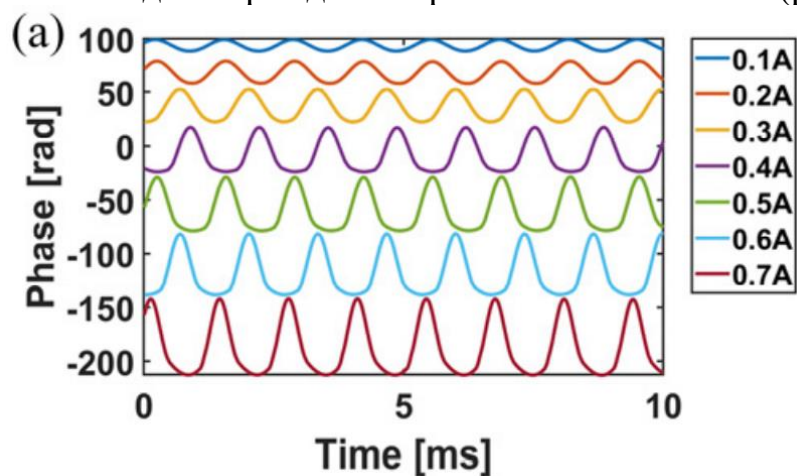


Рисунок 3 – График значения фазы в зависимости от силы тока лазера [1]

Алгоритм развёртывания поляризационно-фазового слияния отличается от стандартных известных методов, способных точно измерять различные динамические деформации на базе метода восстановления фактического фазового сигнала из необработанного с амплитудным сигналом. Такие изменения позволили достичь большого диапазона измерения амплитуды, определяемого сигналом поляризации, и хорошей чувствительности, определяемой фазовым сигналом. Есть одна особенность применения нескольких решеток Брэгга – усложняют конструкцию и уменьшают надежность целой системы. Несмотря на то, что обнаружить конкретное местоположение повреждения становится довольно просто, система также не способна распознавать помехи, вызванные человеком или техникой.

Рефлектометрия позволяет более точно определить расстояние до места механического воздействия, деформаций или вибраций. Излучения генерируется лазером и циркулирует по ОБ (FUT) [1]. В статье представлены различные системы, основанные на методах  $\phi$ -OTDR и  $s$ -OTDR. Данные методы используются для мониторинга технического состояния протяженных объектов. Интерферометрия использует метод  $\phi$ -OTDR, принцип работы основан на использовании двух оптических кабелей или волокон, по которым подается излучение. Источником излучения является полупроводниковый лазер. По первому кабелю проходит излучение без задержки по фазе распространения, а по второму оптическому кабелю пропускается излучение уже с задержкой по фазе распространения. Задержка обеспечивается за счет прохождения световой волны по дополнительному пути за счет увеличения пути прохождения через катушку с ОБ. Так же, как и в оптическом интерферометре, световые сигналы, проходящие по двум оптическим кабелям, и объединяются в одно световое пятно, при этом формируется интерференционная картина. Световое пятно падает на поверхность

фотоприемника. Световой сигнал, полученный от ВОД, обрабатывается микропроцессором, который контролирует изменение интенсивности в течение времени. Исследования показали, что данная система подвержена влиянию помех, особенно они проявляются при изменении температуры ОВ. Часть проблем с ложными данными можно решить за счет использования алгоритмом искусственного интеллекта, который позволяет обучить систему и снизить влияние помех [1]. Аппаратом, позволяющим определить сдвиг фазы лазера, является интерферометр. В качестве измерительного органа используются два несбалансированных интерферометра Маха-Цендера с установленной временной задержкой. Длина волокна катушки составила 500 метров для обеспечения смещения фазы сигнала с временными полосами. Световой сигнал ВОД представляется в виде интенсивности света, и его параметры измеряются фотодетектором (рисунок 4).

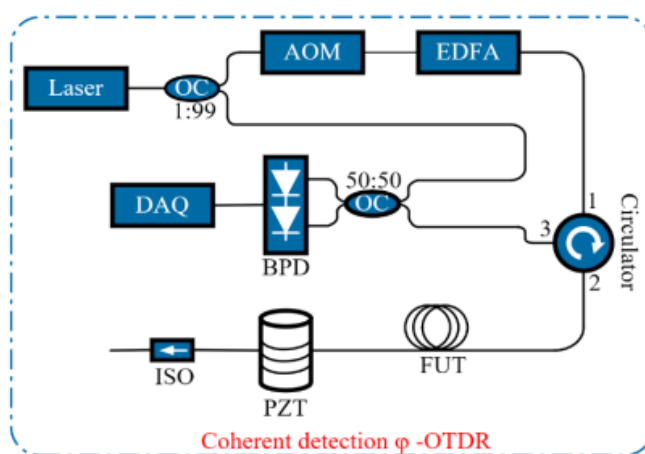


Рисунок 4 – Система адаптивного периода импульса [2]

В данном случае для борьбы с помехами используется акустико-оптическая модуляция с преобразованием в сигналы в оптическом усилителе, что позволяет восстановить уровень оптического сигнала. Лазер имел незначительные пропуски в частотном диапазоне, который используется в качестве источника информации, которая распространяется в системе φ-OTDR. Достигнута высокая эффективность контроля адаптивного периода прохождения импульса для измерения низкочастотных вибраций для снижения влияния помех и погрешностей. Помехи возникают от тепловых воздействий или иных видов внешних помех. Фотоприемник детектирует наиболее чистый вариант сигнал, который имеет форму псевдопериодических синусоидальных колебаний, которые авторы статьи представили при помощи математического выражения [2]:

$$\alpha = \frac{c}{n \cdot \Delta L \cdot \tau_f}, \quad (1)$$

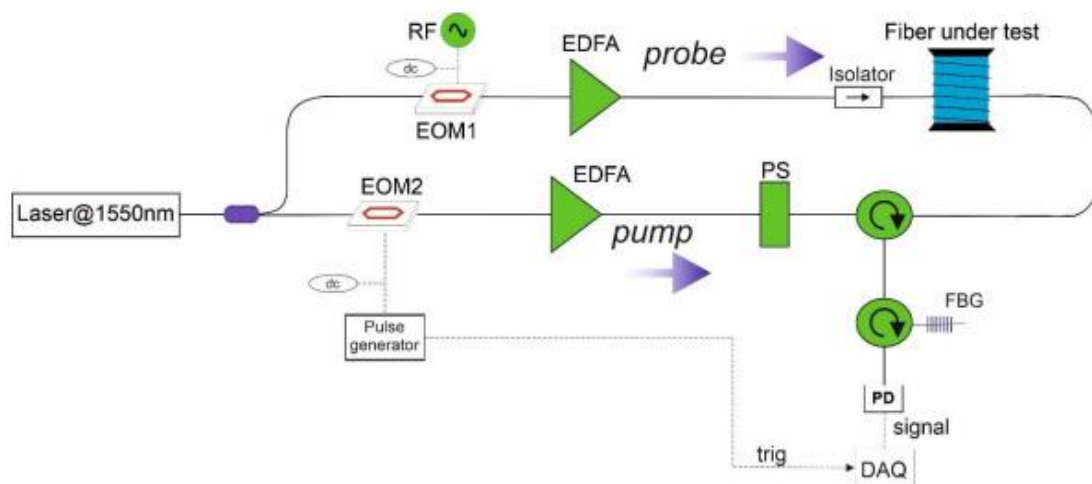
где  $\alpha$  – сдвиг частоты лазера,

$\tau_f$  – псевдопериод интенсивности сигнала,

$c$  и  $n$  – количество, зависящее от скорости света в пространстве и коэффициента преломления.

Использовался лазер с длиной волны оптического диапазона, равной 1550 нм, для передачи выбрана полоса шириной 100 Гц. Излучение, генерированное лазером, проходит через акустико-оптический модулятор (AOM), далее работает волоконно-оптический усилитель (EDFA), после чего усиленный сигнал проходит через катушку с ОВ (FUT), а далее уже сигнал попадает в пьезопреобразователь (PZT) для последующей обработки. Данная система может быть чувствительной к механическим перенапряжениям и температурным воздействиям, система способна работать и учитывать данные помехи. Поляризация в данном устройстве осуществляется за счет добавления в систему модулятора частотных сдвигов и усилителем оптических сигналов. У данной системы есть одна особенность: помехи, наложенные на оптический сигнал, практически не влияют на работу системы, но вот ВОД распознает воздействие, которое оказывает человек или техника. Результаты исследования показали достаточно короткую дистанцию для распределённого датчика.

В статье [3] представлена информация о системе мониторинга деформаций строительных конструкций автотранспортного туннеля. Система мониторинга использует распределённый волоконно-оптический тензодатчик, используется рассеяние Бриллюэна. Были проведены испытания прототипа системы в реальных условиях эксплуатации строительных конструкций, схема системы представлена на рисунке 5. Используемая длина волны световой волны лазера составила 1550 нм.



((EOM1), (EOM2) электрооптические модуляторы; (PS) переключатель поляризации; (EDFA) волоконный усилитель, легированный эрбием; (PD) фотоприемник; (FBG) волоконная решетка Брэгга; (DAQ) сбор данных.

Рисунок 5 – Экспериментальная установка для измерений оптического анализа во временной области Бриллюэна [3]

Представленная система использована для определения распределения напряжений вдоль двух боковых стен железнодорожного туннеля длиной 200 метров. Туннель разделен на восемь участков, которые имеют стыки с неравномерным расстоянием, в среднем длина каждого сектора была около 25

метров. На рисунке 6 показаны зарегистрированные данные об удлинении оптоволоконна во временной разбивке

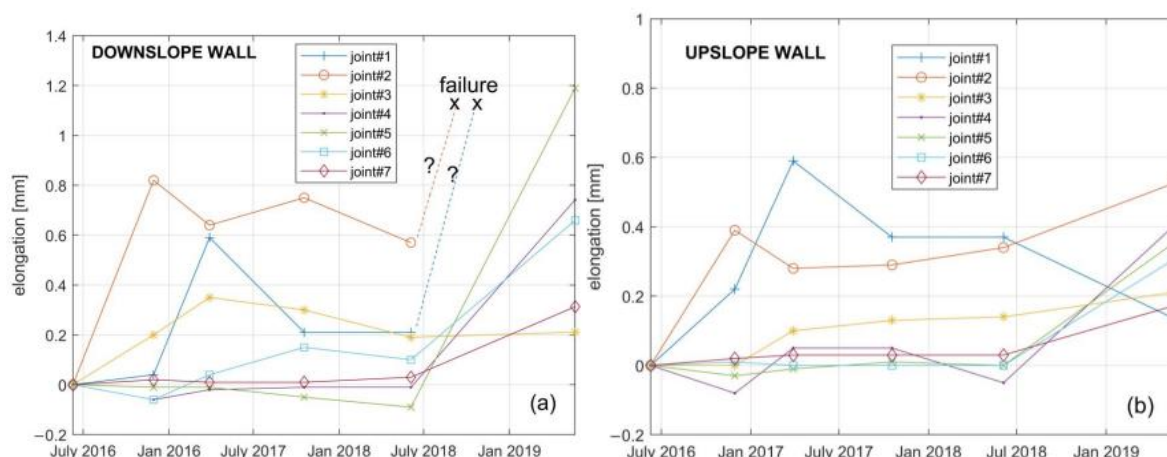


Рисунок 6 – Относительное удлинение оптического волокна по времени, соответствующее туннельным соединениям вдоль (а) наклонной вверх и (б) наклонной вниз боковых стенок [3]

Графики, представленные на рисунке 6, показывают, что во второй половине 2016 года, волокно подверглось удлинению, соответственно были процессы деформации. После проведения измерений уже в июне 2018 года ОВ тоже подверглось удлинению во всех соединениях секторов туннеля. Таким образом, результаты эксперимента демонстрируют надежность волоконной системы, которая использовалась для контроля распределенных деформаций железобетонной конструкции туннеля. На измерение системы не влияют помехи, вызванные механическими перенапряжениями и температурными воздействиями. При этом такое решение позволяет определять смещение плит в туннеле. Полученные результаты позволяют определять состояние объекта.

Имеется информация по использованию ВОД для охраны периметров от несанкционированного доступа [4]. ВОД способен измерять вибрации, его основой является интерферометр Саньяка. Предлагаемое устройство способно работать с поляризованным сигналом, а конструкция представлена на рисунке 7. При помощи поляризаторов подавляются помехи в оптическом кабеле при измерении, а разность фаз источниками сигнала создается во время механических деформаций ОВ по часовой стрелке (CW) и ОВ против часовой стрелки (CCW) в замкнутой системе. Задержка генерируются с помощью дополнительной катушки и поляризаторов.

Интенсивность интерференционной картины световой волны, проходящей по ОВ. Интенсивность становится менее чувствительной к разности фаз распространяемой световой волны или незначительным механическими вибрациям уровнем, близким к нулю. В качестве элемента, генерирующего электрический сигнал, используется пьезоэлектрический цилиндр, на котором установлен поляризатор. При этом выходной сигнал  $P(t)$  можно определить по следующему математическому выражению [4]:

$$P(t) = K[1 + v \cos(\Delta\Phi + \phi_c \cos 2\pi f_m t)],$$

где  $K$  – параметр амплитуды,

$v$  – эффективность интерференции,

$\Delta\Phi$  – разность фаз.

Параметр глубины фазовой модуляции  $\phi_c$  в данном случае определяется по формуле [4]:

$$\phi_c = 2\phi_m \sin(\pi f_m t),$$

где  $\phi_m$  – амплитуда глубины фазовой модуляции.

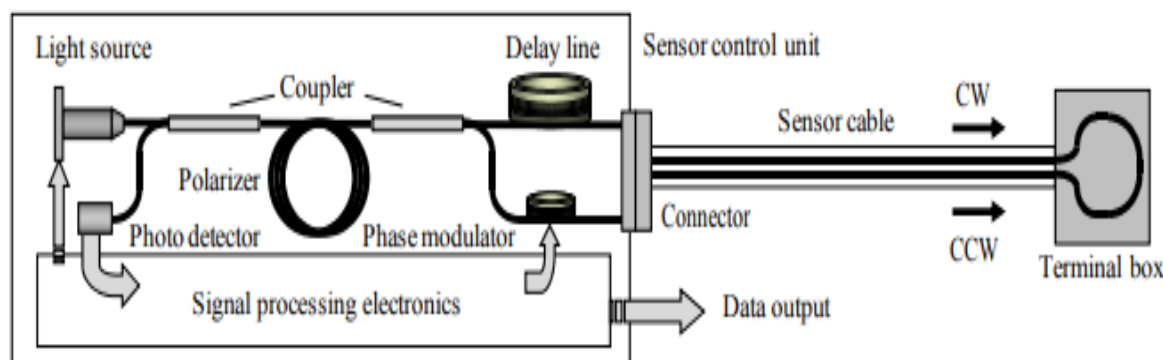


Рисунок 7 – Конструкция оптического датчика вибрации [4]

ВОД с одноточечной чувствительностью недостаточен для определения расположения источника вибрации. Для решения указанной проблемы предлагается удаление линии задержки в целях уменьшения чувствительности. ВОД с плоской чувствительностью не способен определить положение вибрации, линию задержки необходимо удалить, чтобы уменьшить ее чувствительность. Для того чтобы определить расстояния до места воздействия, были задействованы два ВОД. Установка датчиков выполнялась таким образом, что первый ВОД рядом с клеммной коробкой имел наименьшую чувствительность к вибрации, а второй ВОД, расположенный рядом с разъемом, наоборот, имел максимальную чувствительность к вибрации. Для определения местоположения вычисляется отношение разности выходных сигналов к их сумме. Система способна распознавать полезные сигналы и помехи. Данная система отлично подходит для систем охраны периметра и несанкционированного доступа. Вибрации являются причинами ложного срабатывания, что приведет к избытку информации, из-за которого стандартные системы не будут способны корректно работать.

Система, описанная в статье [5], предназначена для мониторинга технического состояния силовых кабелей, проложенных под водой. Усиленный сигнал затем фильтруется посредством вейвлет-преобразования, полоса пропускания у которого 100 ГГц, и через циркулятор поступает в чувствительный элемент через волокна от тестируемого кабеля (рисунок 8).

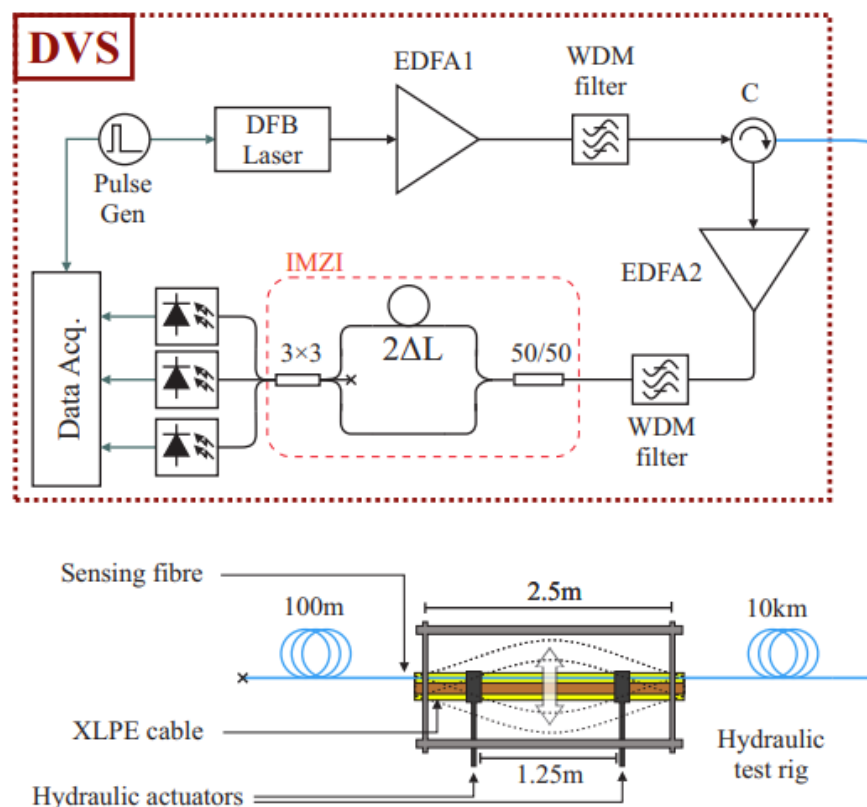


Рисунок 8 – Схема мониторинга подводных силовых кабелей [5]

Используется оптический сигнал мощностью 20 мВт, который генерирует световой импульс при помощи блока измерения DVS на основе ф-OTDR, длина волны составила 1550 нм. Лазера с распределенной обратной связью (DFB). Затем оптический сигнал усиливается волоконным усилителем (EDFA1) для увеличения пиковой мощности до 1 Вт для устранения помех.

Имеется система, способная обнаружить механическую деформацию силового кабеля, находящегося под водой. При этом усиление оптического сигнала позволяет устранить помехи, вызванные колебаниями источника информации. Такая система не может быть адаптирована к различным протяженным объектам, так как не имеет защиты от температурных воздействий и механических перенапряжений. Авторы предлагают применение разностного сигнала фазочувствительной рефлектометрии с системами глубокого обучения для различия и контроля в случае проникновения в охраняемый периметр [6]. Схема данной системы представлена на рисунке 9. В качестве источника информации используется полупроводниковый лазер, посылающий сигнал, далее сигнал усиливается полупроводниковым оптическим усилителем (SOA) и оптическим усилителем (EDFA). Сигнал проходит фильтрацию от возможных флуктуаций и затем через катушки поступает к ВОД. Применение дополнительного EDFA и фильтра позволяет собирать данные без помех.

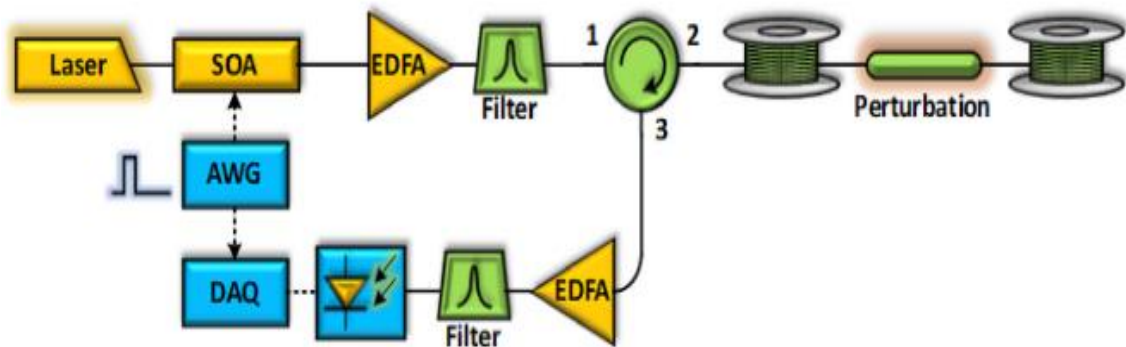


Рисунок 9 – Схема системы измерения дифференциального сигнала OTDR [6]

Сравнивая сигналы на входе и выходе, становится возможным определять источник вибрации и его местоположение. Предложенная система предполагает применение системы глубокого обучения, так как при его отсутствии система не будет способна давать точный результат, а именно не будет способно различать помехи, вызванные человеком или движением машины от тревожного сигнала. Решение для системы измерения требует большого пространства и усложняет структуру системы. Наличие большого количества устройств для повышения точности также может снизить время нормальной работы устройства.

Можно выделить результаты исследований измерительной системы с высокой точностью и достаточной чувствительностью, чтобы определять нарушение целостности или изменения технического состояния. Сведения получены из источника [7]. Авторы провели эксперимент для сравнения систем ф-OTDR и OTDR-интерферометрии (рисунок 10 и 11). В обоих случаях применялся узкополосный лазер с распределенной обратной связью (DFB-FL) мощностью 10 мВт и полосой пропускания 5 кГц. Лазер создает оптический сигнал, который затем усиливается при помощи акустико-оптического модулятора (АОМ), оптического усилителя, легированного эрбием (А). Усиленный сигнал фильтруется волоконно-оптическим решеточным фильтром (F) и поступает в циркулятор (С), где снова преобразуется устройствами F и А. В установке для ф-OTDR системы используется стандартный оптический соединитель, где сигнал разделяется и поступает на три фотодетектора (PD1-PD3). В случае OTDR-интерферометрии используется дополнительный соединитель, от которого сигналы поступают на два вращающихся зеркала Фарадея.

Полученные результаты продемонстрировали, что в случае со стандартными ф-OTDR системами поляризация была незначительной, а для OTDR-интерферометрической системы поляризация выполнялась независимо от входного и выходного оптического сигнала и была уменьшена. Применение обоих методов продемонстрировало, что фазочувствительная рефлектометрия менее чувствительная, чем интерферометрическая. Однако, применение в системе вращающихся зеркал Фарадея увеличивает конструкцию и усложняет систему, что может сказаться на ее надежной работе.



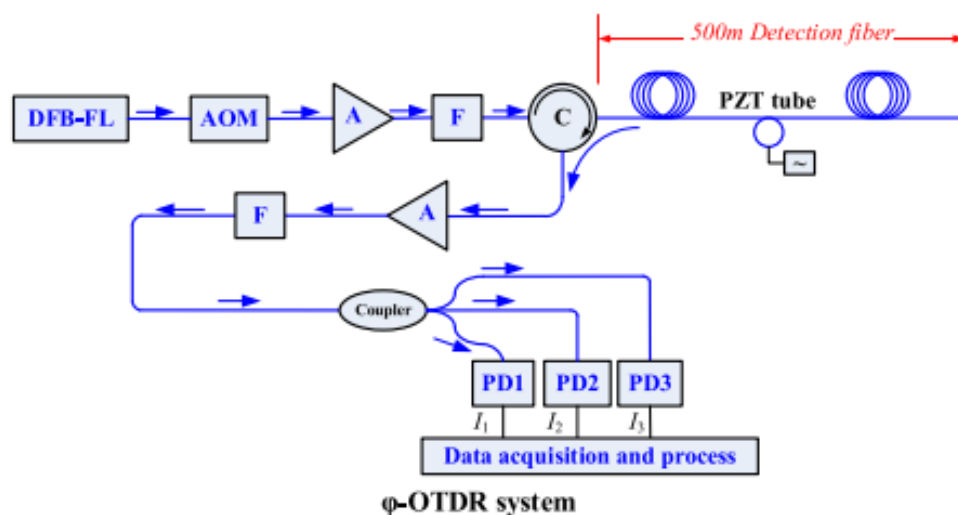


Рисунок 10 – Экспериментальная схема для  $\phi$ -OTDR

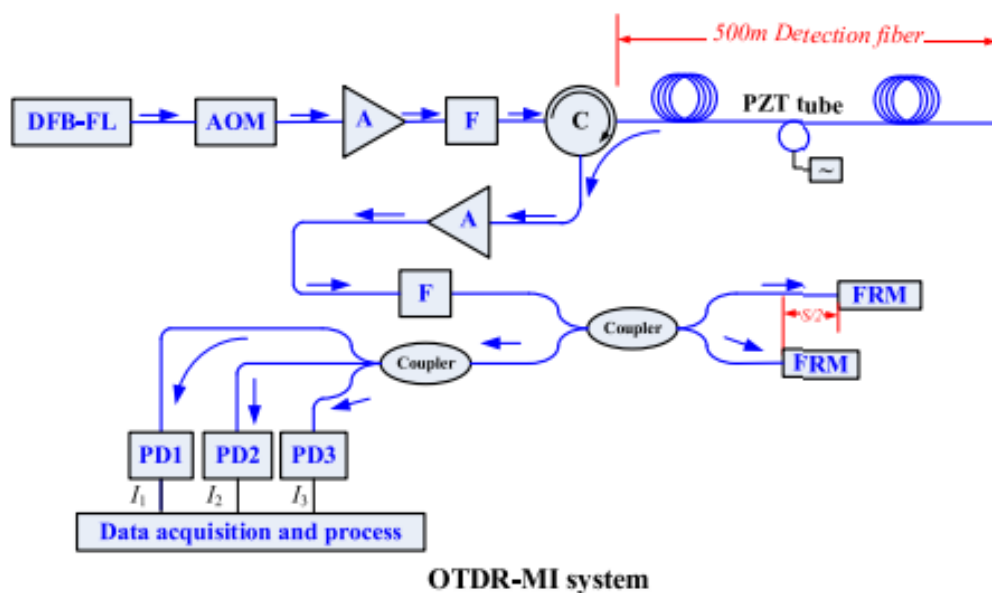


Рисунок 11 – Экспериментальная схема для  $\phi$ -OTDR и OTDR-интерферометрии [7]

Рассмотрен случай использования рефлектометра С-OTDR [8]. При использовании данного рефлектометра по контролю оптические сигналы, обычно генерируемые в виде импульсов, подаются в оптическое волокно в определенные моменты времени с периодом, определяющим «медленную» временную шкалу, для определения переходных процессов в обратном рассеянии. За каждый импульс значение интенсивности обратного рассеяния отбирается в определенный момент времени с неизменным интервалом времени прохождения лазерного импульса в оптическом волокне. При этом для определения интенсивности оптического сигнала в определенный момент времени вычисляется как сумма некогерентной  $I_{inc}$  и когерентной  $I_{coh}$  составляющих. При этом количество информации для обработки

уменьшается, но информации в определенный момент времени достаточно для определения местоположения источника вибрации.

Предложенный метод способен работать точно для определения колебаний в протяженных блоках, и, в отличие от обычных  $\phi$ -OTDR систем, информация, поступающая от фотодетектора меньше, что позволяет за малый период времени получать точные данные. Основным недостатком являются сложность системы и вычисление колебаний. Таким образом, применение в среде с большим количеством случайных внешних воздействий может быть некорректным.

Система для мониторинга технического состояния для объектов протяженностью до 75 км была представлена в работе [9]. Принцип измерения основан на том, что в схеме используется излучения 1480 нм. Схема состоит из блока WDM, который необходим для преобразования излучения 1480 нм в излучения 1550 нм, схема подробно рассмотрена на рисунке 12. В ней используется оптический циркулятор (CIR), который является усилителям оптического излучения, сгенерированного при помощи лазера (NLL), при этом диапазон излучения составляет 1550 нм. В схеме используется акустико-оптический модулятор и усилитель типа EDFA, которые обеспечивают поступление оптической волны на циркулятор типа CIR, а далее на решетку Брэгга и фотодетектор. Далее информация передается на устройство сбора данных (DAC). Для определения вибрации применялись пьезопреобразователи, на которые подавался сигнал от генератора функции (FG).

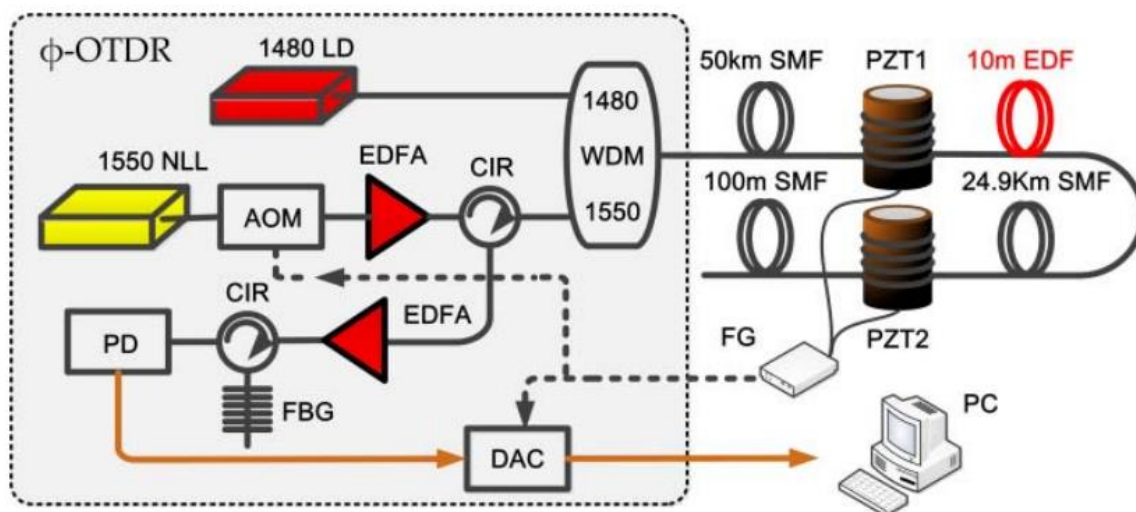


Рисунок 12 – Схема сбора данных для протяженных объектов [9]

Результаты, полученные в ходе исследования [9], демонстрируют точность работы устройства для объектов с протяженностью до 75 км. Схемы усиления позволяют избавиться от помех в полезном сигнале, однако, система для таких объектов может оказаться неточной, поскольку увеличивается количество пространственных точек для воздействий случайного рода.

При этом известные методы с применением интерферометров имеют широкое распространение, поскольку способны точно работать, однако традиционные методы не подразумевают решение по устранению помех. Выше предложенные работы предлагают решения по устранению помех, вызванных нежелательными механическими, температурными воздействиями. При этом данные системы трудно применить в более сложной среде, где нежелательными механическими воздействиями являются не просто природные, но и также созданные человеком. Основными недостатками в применении интерферометров являются их сложность, размеры, стоимость, а также маленькое разрешение приемников. В дальнейших исследованиях предлагаются более оптимальные варианты для реализации системы охраны кабелей относительно измерительного прибора.

Машинное обучение в системах мониторинга протяженных объектов с использованием оптоволоконных датчиков используется для устранения помех и шума, для улучшения различных параметров работы системы.

В работе [10] предлагается применение нейронной сети для устранения в системах мониторинга нежелательных возмущений и помех (помехи, созданные человеком, ветром, механическим перенапряжением, температурой). В целях устранения таких нежелательных возмущений обычных поляризованных датчиков недостаточно, поэтому в такие системы также внедряют еще и искусственный интеллект, который способен определять точно природу воздействия. В данном методе помехи определяются посредством различения соседних измерительных трендов оптического сигнала для системы Ф-OTDR. Динамические сигналы при подаче импульсов или их временную последовательность также можно получать при помощи периодического накопления и хранения данных в определенные моменты времени. Изменяющиеся во времени сигналы зондирования или временные последовательности вдоль вертикальной оси также получают путем накопления периодического сбора данных в разные моменты  $[T_1, T_2, \dots, T_M]$  для каждой пространственной точки и совместного анализа временного и пространственного сигналов (рисунок 13).

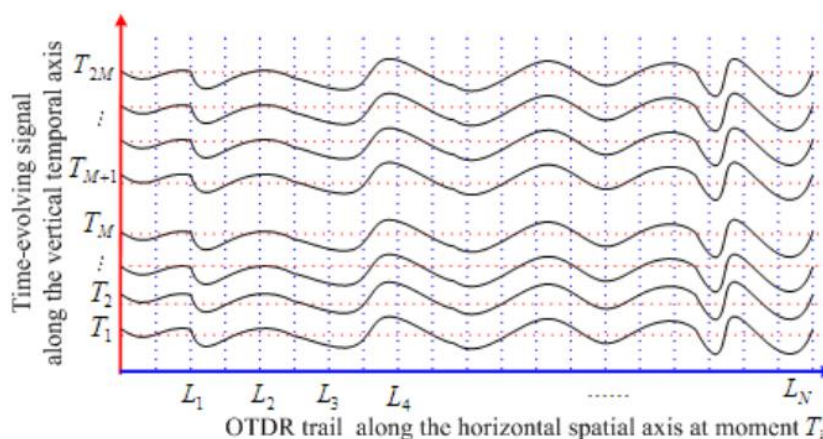


Рисунок 13 – Тренды тревожных событий [10]

После разложения сигналов на составляющие определяются коэффициенты распределения энергии при детализации масштабов. При усилении возмущения

определенный коэффициент возрастает, и при определении роста можно узнать, какое событие произошло в системе. В предлагаемом решении используется трехслойная нейронная сеть BP ANN для определения вида события (рисунок 12). В этой работе использую 3-слойную (вход-скрытый-выход) сеть BP ANN для автоматического определения тревожных событий, которая показана на рисунке 14.

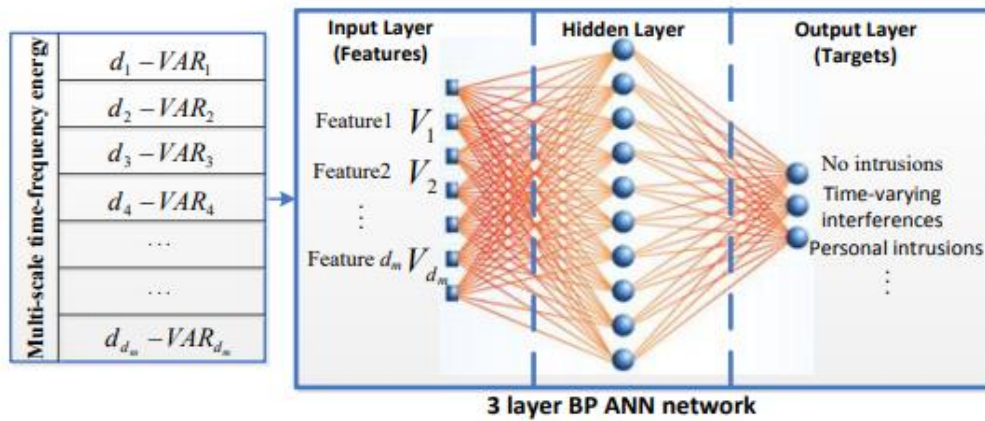


Рисунок 14 – Архитектура нейронной сети [11]

Предложенный метод является эффективным для отделения шума от сигнала и определения реального вмешательства человека из нелинейно смешанных тревожных сигналов, в противном случае систематические воздействия и воздействие окружающей среды вызвали бы одинаковую пространственную тревожную реакцию и, таким образом, приводили к высоким значениям помех в этой высокочувствительной системе Ф-OTDR.

В [11] предложена система с применением нейронной сети и датчиком на основе волоконно-оптического распределенного акустического зондирования (FDA). Система (рисунок 15) построена на базе фазочувствительной оптической рефлектометрии во временной области (8-OTDR) со слабоволоконной брэгговской решеткой (wFBG) для обнаружения частичных разрядов (PD) в силовых кабелях из сшитого полиэтилена (XLPE), и предложен метод распознавания событий, основанный на модели сверточной нейронной сети (CNN) для идентификации и классификации нескольких типов событий, включая внутренний PD, коронный PD, поверхностный PD и шум.

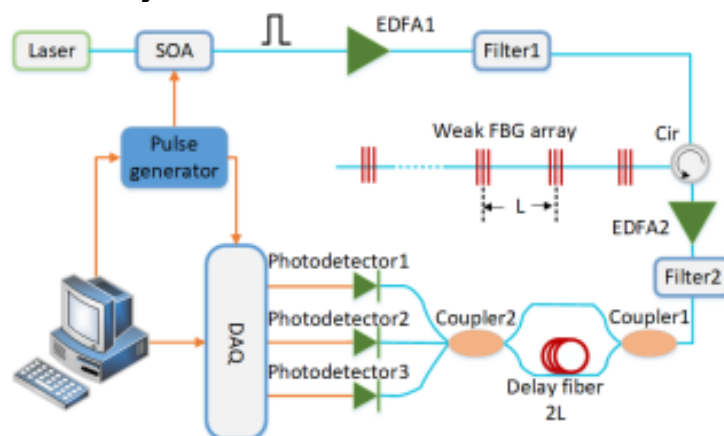


Рисунок 15 – Экспериментальная установка системы 8-OTDR [12]

Авторы статьи извлекали сигналы PD с помощью многомасштабной волнообразности сначала методом декомпозиции и реконструкции, а затем с помощью вычисления коэффициентов кепструма малой частоты (MFCC) акустических сигналов для преобразования одномерных данных, собранных системой FDAS, в двумерные карты частотно-временных характеристик. Далее сверточная нейронная сеть (CNN) модель построена, и изображения объектов MFCC отправляются в классификационную модель CNN для распознавания. При использовании характеристики сигналов PD во временной частотной области время обучения значительно сокращается при сохранении высокой точности идентификации. Экспериментальные результаты показывают, что точность, чувствительность и специфичность достигают 96,3%, 96,4% и 98,7% соответственно.

SOA: полупроводниковый оптический усилитель; EDFA: волоконный усилитель, легированный эрбием; фильтр: полосовой фильтр; Cir: циркулятор; DAQ: плата сбора данных; ОТ: вращающееся зеркало Фарадея.

Модель CNN использовала набор данных с 10-кратной перекрестной проверкой. Обучающий набор данных был случайным образом разделен на 10 частей, было использовано 832 тестовых образца. На рисунке 16 представлена архитектура модели CNN.

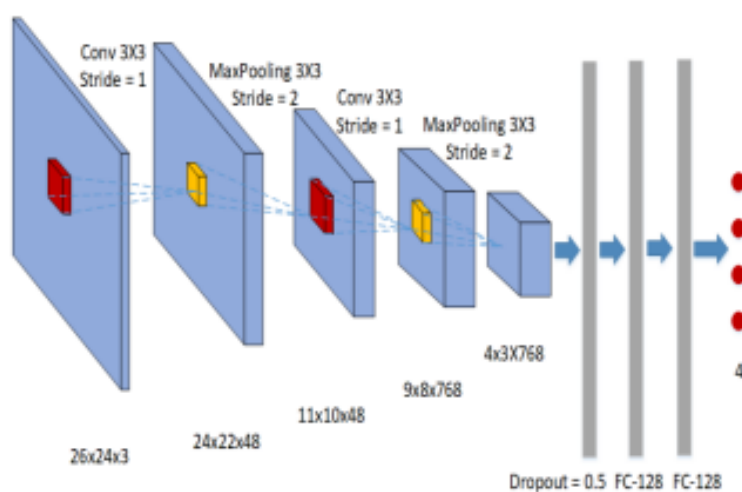


Рисунок 16 – Архитектура модели CNN [12]

Архитектура модели CNN состоит из двух сверточных слоев. За ними следует слой максимального объединения. Сверточные слои применяют различные фильтры к входному изображению для извлечения характерных признаков, а объединяющие слои используются для уменьшения размера выходных данных сверточного слоя. Эффективность работы модели CNN оценивалась по среднему значению полученной точности, чувствительности и специфичности, полученные результаты сравнивались с другими шестью существующими методами. Модель CNN имеет наилучшие показатели точности.

В [12] предложено применение нейронной сети в системе  $\phi$ -OTDR (рисунок 17) для повышения адаптивности и помехоустойчивости. С помощью метода цифровой обработки изображений был получен обучающий набор для нейронной сети. Таким образом, устанавливалось соответствие между исходными данными и распределением вибрации. Чтобы проверить осуществимость метода deep learning temporal-spatial detection (DL-TSD), использовались три различных типа вибрации на чувствительном волокне.

Реализация DL-TSD состоит из трех частей, которые представляют собой экспериментальную установку  $\phi$ -OTDR, процесс обучения и процесс тестирования. В данной работе используется установка  $\phi$ -OTDR, в которой применяется когерентная структура обнаружения. Процесс обучения заключается в основном в обучении новой модели нейронной сети. Благодаря непрерывному обучению с помощью обучающего набора сетевая модель может сопоставлять входное изображение с распределением вибрации. И процесс тестирования используется для тестирования нейронной сети. Кроме того, процесс практического применения также совпадает с процессом тестирования. Подробная информация о процессе DL-TSD показана на рисунке 17.

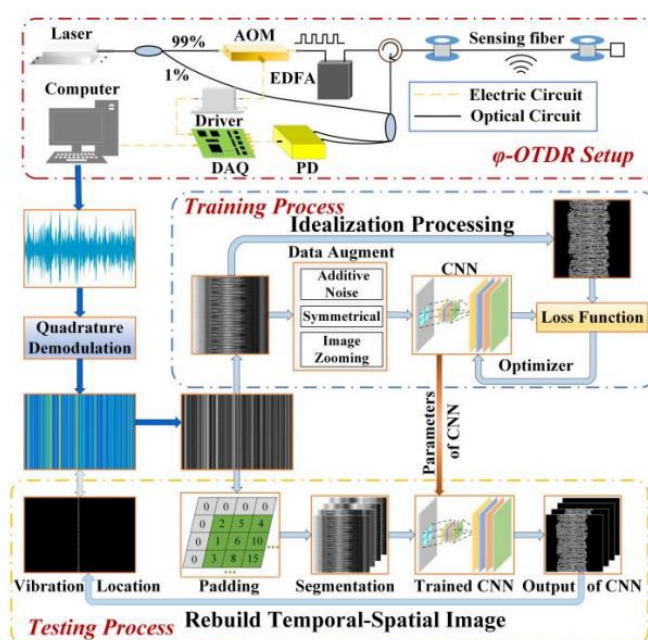


Рисунок 17 – Метод DL-TSD, который содержит процесс обучения и процесс тестирования [13]

Из проведенных, авторами статьи, экспериментов можно сделать вывод, что применение нейронных сетей для определения природы воздействий, оказываемых на протяженные объекты, повышает точность идентификации, чем при применении стандартных систем. Из проанализированных работ, а также согласно [13-17] ясно, что наиболее выгодное решение можно построить на базе сверточных нейронных сетей (CNN).

Кроме использования сверточных нейронных сетей (CNN) для систем мониторинга с OTDR для улучшения качества работы активно используется

машинное обучение. В [14] для системы мониторинга трубопровода предложен метод распознавания временных последовательностей и интеллектуального анализа знаний, основанный на скрытых марковских моделях (НММ). Экспериментальные результаты с данными реальных полевых испытаний показывают, что средняя точность распознавания 98,2% для часто встречающихся пяти типичных событий вдоль заглубленных трубопроводов.

В статье [15] авторы целью решения проблемы низкой скорости обнаружения событий OTDR используют метод машинного обучения, когда сначала сигнал OTDR обрабатывается с разницей  $n$ -го порядка, затем дифференциальный сигнал подавляется. Чтобы уменьшить сложность вычислений, находят пики дифференциального сигнала и извлекают характеристики пиков. Далее объекты помечаются и отправляются в классификатор на основе машинного обучения для автономного обучения. Обученная модель используется для онлайн-прогнозирования для вывода обнаруженных событий. Алгоритм проверен с помощью 500 трассировок OTDR, результаты показывают, что скорость обнаружения событий соединения достигает 95% после 200 итераций.

В качестве классификатора в [16] используются машины опорных векторов (SVM). Метод T-распределенного стохастического встраивания соседей (T-SNE) и метод отображения активности классов со взвешенным градиентом (Grad-CAM) применяются для визуализации рабочего процесса CNN, который иллюстрирует правильность извлечения признаков (рисунок 18).

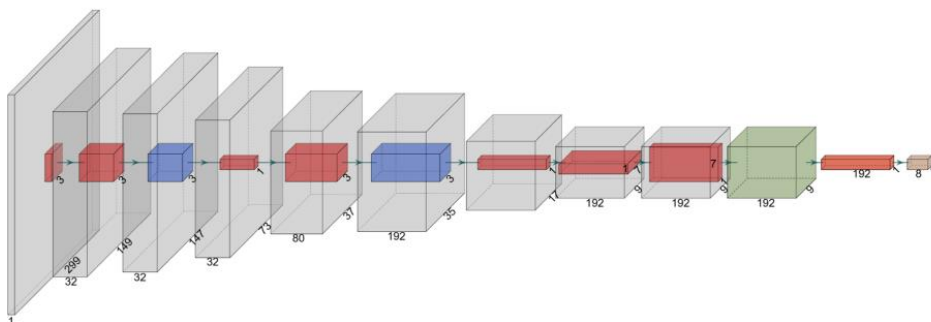


Рисунок 18 – Модель CNN, использованная в эксперименте (красный куб представляет операцию свертки, синий куб максимальную операцию объединения, а зеленый куб среднюю операцию объединения) [16]

Экспериментальные результаты, основанные на 11 997 изображениях под восемь категорий событий, показывают, что точность классификации может быть повышена с помощью традиционного классификатора. Стратегия CNN +SVM работает наилучшим образом и достигает точности 94,17%. В работе использовано наибольшее количество изображений для обучения нейронной сети среди всех рассмотренных работ, но средняя точность ниже среднего. В [17] с помощью CNN определяют дальность целевого события от оптического волокна. Для этого используют матрицы пространственно-временных данных, собранные системой, которая далее фильтруются тремя различными полосовыми фильтрами для

формирования изображений RGB. На рисунке 19 представлена методология распознавания

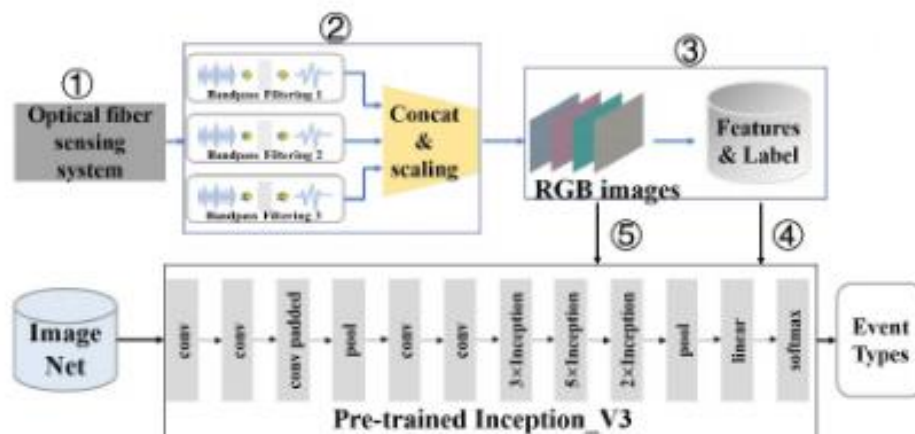


Рисунок 19 – Методология [17]

Результаты эксперимента показали точность классификации 86%. Предложенный метод может определить как тип события, так и радиальное расстояние до него. Рассмотренные ранее работы использовали машинное обучение для улучшения системы мониторинга [18]- точность классификации – 92.4% [19]; точность классификации -96.7%, - [20] – 94.54% классификации. Данная же работа использует CNN в качестве важной части системы в качестве инструмента идентификации, а не в качестве инструмента улучшения системы мониторинга.

Применение интеллектуальных систем для определения повреждений, технического состояния протяженных объектов получило широкое применение. На данный момент имеется множество решений, но большинство из них выполняется с применением интерферометрии на принципе  $\phi$ -OTDR. Однако применение таких приборов имеет такие недостатки, как неустойчивость к помехам, большие размеры, высокая стоимость. В целях устранения систему предлагается усовершенствовать путем добавления устройств для поляризации сигнала, что способствует исключению возможных наложений из-за механических перенапряжений и температурного воздействия. Однако датчики также способны воспринимать сигналы ложного срабатывания при наличии помех, созданных человеком, в таком случае предлагается создание интеллектуальной системы распознавания природы влияния и определение его местоположения.

Проанализировав возможные системы с применением машинного обучения, классификаторов и других видов нейронной сети, можно заключить, что для данной задачи лучшего всего подходят свертывающиеся, по причине того, что, благодаря им, можно легко обрабатывать изображения в виде спектрального анализа и рассматривать графики. Схемы компоновки основных типов волоконно-оптических датчиков приведены в Приложении А (рисунок 1А). Сравнительные характеристики различных ВОД для измерения механических напряжений, а также виды датчиков и их основа приведены в Приложении А (таблица 1А, 2А).



### **1.3 Использование волоконно-оптических датчиков в различных областях промышленности с анализом международного опыта**

Контрольно-измерительные устройства, приборы (датчики, элементы программно-аппаратного обеспечения для ЭВМ, сенсоры и др.) и системы технологического мониторинга с помощью автоматизированных быстродействующих функциональных элементов и схем на основе оптоволоконных материалов (ОВМ) в последние 10-15 лет вызывают значительный прикладной научный и технический интерес для ряда отраслей современной промышленности (лазерная техника; микроэлектроника и радиоэлектроника; горные технологии и металлургия; технологии неразрушающего контроля и сопротивление материалов; машиностроение, авиастроение и ракетостроение и др.), прежде всего с точки зрения организации качественных электронных измерений с высокой степенью точности результатов (часто в режиме реального времени и с удаленным доступом) при контроле технических состояний (параметров деформаций и механических напряжений) протяженных крупномасштабных объектов (плотины, мосты, насыпи, горнорудные карьеры и др.) [21]. Возможным решением является построение систем с использованием волоконно-оптических датчиков. Причем достоинства волоконно-оптических контрольно-измерительных систем известны достаточно давно. Например, они не подвержены влиянию электромагнитных помех (шумов); обладают высокими электрофизическими (нелинейная релаксационная поляризация и проводимость), оптическими (нелинейные электрооптические явления) и метрологическими характеристиками; имеют распределенную и квази-распределенную чувствительность; способны работать во взрывоопасной среде; при этом измерительные каналы имеют значительную протяженность, стоимость волоконно-оптических проводников ниже, чем у медных; ежегодно стоимость оптического волокна снижается, а его свойства улучшаются. Еще одна особенность использования ВОД заключается в их низком энергопотреблении и способности работать на значительном удалении от устройства обработки данных, так как световой сигнал слабо затухает в отличие от электрического, также можно добавить, что оптические волокна не подвержены окислению [22]. ОВ применяется при построении систем контроля геотехнического состояния горных пород карьеров, на основе распределенных и квази-распределенных ВОД [23]. На основе волоконно-оптических сенсоров разработаны системы охраны периметров и рубежей различного типа и назначения [24]. Волоконно-оптические датчики активно используются в аэрокосмической и нефтегазовой промышленности [25], так как они обладают значительными преимуществами по сравнению с электрическими, базирующимися на ясности физического принципа действия и их положительных свойств, что обеспечивает им масштабность внедрения. Достаточно серьезная научная работа проведена в области повышения безопасности добычи мрамора открытым способом [26]. Согласно проанализированной литературы в целях мониторинга технического состояния

бетонных, металлических конструкций, применяются системы наблюдения по снимкам, GPS – технологий, ультразвуковых измерений, специализированных датчиков и IoT-приложений [27]. Причём широкое применение получили волоконно-оптические датчики (ВОД) [28]. Причинами стало уменьшение стоимости материалов и совершенствованных инструментов измерения [29]. Основными методами для измерения внешних воздействий являются: (TW-COTDR), (PSP-BOTDR), (PPP-BOTDA), (BOTDA), (BOTDR), OBR (OFDR) или методы, основанные на измерении потерь в оптическом волокне, вызванных Бриллиновским рассеянием [30]. Причем наиболее широкое распространение среди ВОД получили датчики, построенные на решетках Брэгга, с измерением потерь по рассеяниям Бриллина, Рамана, Рэйли [31]. Стоит отметить, что также основным преимуществом оптического волокна является способность измерять не только один параметр, но и два взаимосвязанных параметра [32], [33], например, смещение и механическое напряжение или два параметра с малой корреляцией, например, температуры и механического напряжения [34], [35], а в некоторых случаях и 3 параметра [36]. Однако данное применение требует больших вычислительных мощностей или усложнения конструкций. В случае точечного применения можно отслеживать также и наличие коррозии на стальной арматуре [37]. С другой стороны, можно измерять силу, оказываемую смещением пород, при помощи точечного волоконно-оптического датчика [38]. Преимуществами данного решения является высокая точность измерения, а также компенсация помех в сигнале, вызываемых изменением температуры. Несмотря на это, качество приварки чувствительного элемента может сильно оказывать влияние на измерение, при этом сама приварка усложняет процесс монтажа и демонтажа. Другим возможным решением данной проблемы при измерении напряжения может быть устройство, выполненное в виде металлического кольца, на котором устанавливаются решетки Брэгга, устройство опроса, контроллера, построенного на основе ПЛИС [39]. Особая конструкция прибора обеспечит высокую точность и линейную зависимость измерений, контроллер обеспечивает температурную компенсацию. Однако вышеуказанные исполнения имеют высокую стоимость и сложную конструкцию.

Другим случаем применения ВОД является определение увеличения смещений пород, каменных плит, например, [40]. Данное решение выполнено в виде специальной конструкции, устанавливаемой в металлический короб. Принцип работы заключается в измерении угла наклона по длине волны. Преимуществами являются точность измерения трещины, отстройка от изменения температуры. Недостатками является сложность конструкции и высокая стоимость. С другой стороны, с компенсацией температуры может рассматриваться датчик, который состоит из кабеля, выполненного с применением многомодового волокна, входного и выходного одномодового волокна и выполнен в виде спирали [41]. Достоинствами устройства являются повышенная точность измерения, компенсация температуры. Недостатками являются отсутствие учета влияния вибраций на показания, высокие требования к оборудованию для учета изменения температуры.

Стоит отметить, что применение ВОД позволяет обеспечивать мониторинг целостности шахт. Например, имеется информация о создании системы мониторинга смещения пород и предупреждения обрушения горных выработок угольных шахт Китая [42]. Рассмотрены волоконно-оптические вертикальный и горизонтальный сейсмоприемники на основе интерферометра Маха–Цендера, где авторы предлагают оригинальную конструкцию чувствительного элемента, обеспечивающего высокую пороговую чувствительность измерительного прибора к сейсмоускорениям. Стабильность работы интерферометра Маха–Цендера обеспечивается применением системы активной стабилизации рабочей точки [43]. Развивая свое направление, авторы предлагают собственную конструкцию, но которая имеет определенные общие признаки с рассмотренными ранее в работах [44], [45]. Увеличение чувствительности волоконно – оптических интерферометрических датчиков достигается за счет применения многовиткового чувствительного функционального элемента (рабочего органа), в котором волоконно-оптический датчик (ВОД) выполнен на базе двух -плечевого интерферометра Маха–Цендера [46]. В статье [47] представлены сведения касающейся разработки систем контроля деформации горной породы, основой данной системы является длинно-базовые деформометры, которые могут быть использованы для мониторинга технического состояния крупномасштабных объектов. Автором удалось решить проблему ликвидации помех выходного сигнала при изменении внешней температуры. Хотя применение многовиткового чувствительного элемента при конструировании ВОД позволяет существенно улучшить работу ВОД при измерениях деформаций, полностью избавиться от негативного влияния температуры (эффекта термической упругости) на процесс измерения не удалось. Наблюдается снижение дрейфа рабочей точки интерферометра за счет пространственной локализации интерферометра при сохранении длины измерительной базы. Нет сведений об испытании опытного образца в полевых условиях и, соответственно, нельзя утверждать, что предложенный ВОД способен снизить отклонение выходного сигнала во времени, по сравнению с традиционным электромеханическим датчиком с 12 % до 2 %. Была представлена лишь функциональная схема длинно-базового деформометра, а отсутствие фотографий опытного образца может говорить о незавершенности исследований и отсутствии эмпирических данных полученных в результате исследования натуральных образцов ВОД. Так как отсутствуют результаты испытания ВОД в условиях изменения внешней температуры, нельзя однозначно утверждать о его эффективности и полном решении столь важной проблемы для данного устройства. Как известно, дрейф рабочей точки может начаться при изменении температуры в пределах 1 °С [48], соответственно происходит изменение интенсивности падающей световой волны на поверхность фотоприемника. В первую очередь изменяется фаза распространения световой волны. Авторы также не указывают, какое волокно они используют, так как существуют существенные различия при использовании многомодового и одномодового оптического волокна [49].

Значительный интерес вызывает статья, в которой рассмотрено улучшение

системы демодуляции длин волн на волоконной брэгговской решетке с помощью каскадной генеративно-состязательной сети и плотной нейронной сети [50]. Есть результаты исследований. Адаптивный метод периода импульса для измерения низкочастотной вибрации с помощью фазочувствительных рефлектометрических систем на основе интенсивности [51]. В статье [52] рассмотрены распределенное оптоволоконное зондирование и обработка данных сборных свай с осевой нагрузкой. Есть работа, посвященная разработке методов подавления шума в бриллюэновском оптическом анализаторе во временной области в реальном времени с высокой точностью данных с использованием сверточных нейронных сетей [53].

Есть мнение, что уменьшение стоимости волоконно-оптической системы позволит использовать её на большем количестве объектов. В данной работе представлено решение с использованием камеры для отслеживания изменения в световом пятне. В предыдущих работах по разработке системы мониторинга давления шахтовой крепи [54], [55] было выявлено, что оптический сигнал должен подвергаться обработке по специальному алгоритму. При этом в попытках разработки аппаратно-программного комплекса использовались элементы машинного обучения, позволяющие отличать шум в сигнале при оказании внешних воздействий с различными факторами. Для полноты анализа и получения более обширной информации были проанализированы международные базы патентов. При анализе были отобраны наиболее схожие технические решения, которые отражены в патентах [56-57]. В указанных источниках имеется подробное описание основного технического решения и всех преимуществ предлагаемых систем.

#### **1.4 Использование волоконно-оптических технологий в системах мониторинга с анализом международного опыта**

В современном мире достаточно востребованы цифровые системы мониторинга технического состояния зданий и сооружений. Своевременность реакции и ранняя диагностика повреждений позволяет своевременно принять меры к устранению проблем, связанных с разрушением монолитных железобетонных конструкций. Требуется решать задачи обеспечения безопасной и безаварийной эксплуатации зданий, но решение данных задач нельзя осуществить, не используя цифровые технологии, особенно могут быть востребованы не электрические точечные тензодатчики, а уже более прогрессивные и современные ВОД. Использование электрических медных проводов в современном мире для передачи информации не совсем оправданно по многим позициям. Сокращение металлоёмкости и энергоёмкости — вот аспект будущего развития систем измерения и контроля. Внедрение квази-распределенных и распределенных ВОД вместо точечных электрических тензодатчиков позволит вывести системы мониторинга и контроля на новый уровень. Остро нужны эффективные и недорогие устройства контроля технического состояния зданий, способные работать в режиме реального времени в круглосуточном режиме. Имеющиеся средства дефектоскопии достаточно развиты и самодостаточны, многообразны в

плане торговых марок и стран, стоимость их тоже различна, так же как качество и точность. Минусом является то, что они обеспечивают только периодические проверки, также требуются высококвалифицированные специалисты и наличие самих приборов для дефектоскопии, которые достаточно дороги. Специалисты должны выехать на строительный объект, обследовать его, сделать заключение и выдать рекомендации. Это процесс не только достаточно затратный, но и растянутый во времени, получение оперативной информации о состоянии объекта невозможно. При этом после работы специалистов, давших положительное заключение о состоянии строительного объекта, могут начаться процессы деформации фундамента или его основания. Не всегда использование ручного дефектоскопа позволяет выполнить полноценный осмотр протяженного железобетонного объекта, например фундамента, так как некоторые его части могут быть скрыты под слоем грунта. Поэтому распределенные или квази-распределенные ВОД, размещенные как в теле фундамента, так и на его боковых гранях позволят получить более объективную картину напряженно-деформированного состояния строительной конструкции, а также установить места концентрации механических напряжений, где формируются трещины, или аварийно-опасные зоны разрушения.

Как сказано ранее, проблема внезапного обрушения строительных конструкций из железобетона при их длительной эксплуатации достаточно известна, и в мире накоплен материал по статистике, который в дальнейшем будет изложен и раскрыт. Еще один важный вопрос, который частично решает данная диссертационная работа, – это использование интеллектуальных технологий в строительстве. Предлагаемый АПК контроля технического состояния строительных конструкций на основе ВОД отвечает задачам Индустрии 4.0, так как предлагается интеллектуальное программное обеспечение и энергоэффективные технологии. Способность отвечать поставленным задачам Индустрии 4.0 является достаточно серьезным вызовом ученым и разработчикам, создающим новые средства диагностики и мониторинга в строительстве.

Образовавшиеся трещины в железобетонных конструкциях представляют серьезную опасность, так как вполне могут быть скрытыми. Нужно понимать, что отсутствие должного контроля за их ростом и раскрытием сопряжено со значительным риском необратимых последствий. Нужно согласиться, что фактическое техническое состояние СЖК будет неизвестным, а вот угрозы разрушения достаточно серьезными. В мире множество случаев, описанных в научной литературе, когда ошибки при проектировании, или при строительстве, или эксплуатации зданий могут привести к их обрушению и вызвать гибель людей. К примеру, в источнике [58] указано, что одним из главных причин обрушения строящихся или возведенных зданий в Африке являются в первую очередь: нарушение самой технологии производства бетона, ошибки при проектировании, технологии строительства, недостаток армирования, нарушение проекта, преступная экономия строительных материалов или их низкое качество, отсутствие надлежащего и объективного технического надзора. Можно привести пример негативного опыта строительства монолитных каркасных жилых зданий Турции

[59]. Здания были возведены в сейсмически опасных местах, при этом был допущен ряд серьезных ошибок при проектировании: недостаточное армирование бетона колонн и высокая армировка поперечных балок, пренебрежение способами сейсмического соединения стальных деталей, также установлено низкое качество бетона. При землетрясениях в 1999 г. и 2011 г. Здания были полностью разрушены, тысячи людей погибли, не говоря об огромном экономическом ущербе. Все разрушенные, как и неразрушенные здания, естественно, не имели системы мониторинга, которая бы на ранних этапах смогла бы оценить угрозу разрушения и подать сигнал тревоги для эвакуации людей из здания, находящегося на грани разрушения.

Есть информация об аналогичных проблемах разрушения строительных конструкций с Ближнего востока. В Израиле, в Секторе Газа из-за высокой потребности в жилье некоторые здания возводятся раньше установленного срока, что, конечно, хорошо для потребителей, которым не приходится ждать годами своё жильё от застройщика, который постоянно срывает сроки сдачи объекта. Чтобы достичь ускоренных темпов строительства, некоторым компаниям приходится нарушать технологию. Если для малоэтажных зданий это не так опасно, то для высоток это может стать большой угрозой и проблемой в будущем [60]. Проблемы аналогичные: это нарушение технологии строительства, плохая подготовка основания для фундамента, недостаточное армирование, некачественная бетонная смесь, отсутствие надзора со стороны уполномоченных органов, использование просроченных или уже непригодных строительных материалов. Порой использовалась ржавая арматура, бывшая в употреблении. В данном источнике не сказано, что использовались системы мониторинга.

В статье [61] рассмотрены проблемы возникновения дефектов и аварий, связанных со строительством зданий и сооружений в Чехии, повлекшим за собой смертельные случаи или травмы. Снова было отмечено, что нет инструмента, позволяющего оценить угрозы безопасности. Разрушения причинили серьезный материальный ущерб. И здесь не было систем, были рассмотрены аварийные ситуации. Также нет систем, которые бы отвечали функциональному требованию обеспечения и контроля безопасности при их эксплуатации.

В статье [62] рассмотрены уже скрытые дефекты строительных конструкций, которые несут достаточную угрозу безопасности. Причины их появления различны, существуют также различные способы борьбы со скрытыми дефектами. Авторы не предлагают комплексное решение проблемы, но рассмотрели некоторые способы их предотвращения. Снова обсуждается вопрос ошибки проектировщиков, которые влияют на конструктивные характеристики вновь возводимых зданий. Авторы задают вопрос, как эти дефекты можно контролировать на ранней стадии строительства здания; что можно сделать для предотвращения нарушения нормальной эксплуатации строительных объектов и при проектировании новых зданий. Авторы аргументируют, что необходимо учитывать климатические условия, в которых производится строительство и эксплуатация здания. Нужно учитывать фактор нагрузки, влажность и утечки воды, подмыв основания. Предлагается работать в направлении совершенствования

нормативной документации, например, объединять региональные стандарты и кодексы с учетом дефектов. Опять авторы не рассматривают системы мониторинга.

Вызывает интерес совместная работа ученых России и Казахстана, в которой предлагается использовать ОВ в качестве датчика, размещенного внутри железобетонного фундамента, при этом ОВ закладывается на этапе заливки фундамента. Предлагается новое средство неразрушающего контроля различных дефектов и повреждений конструкций из железобетона. В качестве ВОД используется ОВ стандарта G.652 [63]. Исследования ограничены лабораторным образцом, а блок обработки данных страдает от многих недоработок. Не решена проблема возникновения тепловых помех.

Имеется информация о дефектах и повреждениях зданий из монолитного железобетона в городе Астана, столице Республики Казахстан, сейчас в городе идет «бум» строительства. Имеет место несовершенство нормативной базы, используемой при проектировании и строительстве высотных зданий с количеством 16 этажей и более. Здания могут иметь многофункциональное назначение. Есть причины некоторых проблем — это незначительный опыт по проектированию и строительству высотных зданий, нарушение технологий изготовления бетона, нарушение в технологии монтажа опалубки, нарушение правил ведения строительно-монтажных работ. Еще можно сказать, что используются строительные материалы низкого качества для снижения стоимости здания [64].

Что касается проблем подземного строительства, где используются железобетонные конструкции в качестве ограждения или крепи, то найдена информация в источнике [65]. Имеются проблемы, связанные с обрушением кровли подземных выработок, к которым можно отнести различные туннели, шахтные выработки, подземные сооружения электростанций и нефтехранилищ. В статье представлен достаточно подробный анализ катастроф, навлекших травмы и гибель людей. Подобные катастрофы оборачиваются значительными финансовыми потерями. Крупная авария произошла в железнодорожном туннеле Западной Вирджинии в 2009 году, было обрушение туннеля в Ханчжоу в 2008 году, а также обрушение туннеля метро в Кельне в 2009 году. Есть сведения об использовании различных методов и оборудования неразрушающего контроля, которые позволяют оценить прочность и другие важные параметры железобетонных строительных конструкций. Для проведения экспресс-контроля нужны обученные специалисты и соответствующие дорогостоящие приборы. Это только разовые мероприятия, не имеющие постоянной основы. Существующие методы являются отработанными и имеют определенную сложность в проведении и подготовке [66]. Также есть аналогичная статья, где представлена информация о средствах неразрушающего контроля бетона [67], но в указанных публикациях не рассматривается постоянная система мониторинга. Есть одна работа, где автор высказывает мысль о создании новых методов и средств для мониторинга технического состояния строительных конструкций из железобетона, но автором не предлагается что-то новое, больше идет рассуждение о различных вариациях и компоновках системы мониторинга [68]. Можно выделить несколько научных

статей, которые посвящены разработке различных интеллектуальных ВОД [69], в некоторых случаях ВОД были испытаны в условиях реального производства [20]. Можно сказать, что большая часть исследования ВОД представлена в теоретическом виде и меньшая часть лабораторными или экспериментальными образцами [70]. Наиболее перспективными являются решетки Брэгга, в литературе достаточно много сведений, связанных с разработкой ВОД на их основе [71], это достаточно ранняя работа, которая не заверена внедрением, так как не решен ряд важных задач, связанных с высокой стоимостью предлагаемых ВОД и их сложностью. На основе решеток Брэгга созданы лабораторные образцы, которые обеспечивают контроль смещения горных пород [72]. Имеется информация о системах позволяющих контролировать при помощи волоконно-оптических датчиков геотехнического состояния подземных выработок, которые используются для добычи угля (Китай) [73]. Есть публикации в которых рассмотрены волоконно-оптические датчики, основанные на использовании эффекта решеток Брэгга, данный тип датчика имеет некоторые достоинства, но есть и множество недостатков, в первую очередь это достаточно высокая сложность и стоимость, по сравнению с электрическим тензодатчиком, что и сдерживает их применение. Исследования проведены около 7 лет назад, а результатов внедрения нет. Не найдена информация об использовании систем мониторинга смещения горного массива на основе решеток Брэгга [74], данная разработка находится еще на первоначальной стадии исследования лабораторных образцов ВОД, и пока нет речи об их промышленном применении. В одной из научных публикаций авторы затрагивают важную проблему, связанную со свойствами ОВ, которое подвержено влиянию изменения температуры. Изменение температуры ОВ даже в пределах одного градуса может вызвать изменение фазы распространения световой волны и ее интенсивности, что может негативно отразиться на процессе измерения [75], эта проблема особенно свойственна для ВОД, разработанных на основе оптического интерферометра. Есть информация, что существуют ВОД, которые созданы по схеме интерферометра Маха–Цендера [76], их можно использовать для контроля роста трещин в горных породах, но проблемы их эксплуатации уже описаны выше. Авторы предлагают свои методы борьбы с помехами. Описанные длинноволновые деформометры по своей конструкции достаточно громоздки и не совсем пригодны для контроля технического состояния монолитных железобетонных строительных конструкций. Данные датчики больше всего пригодны для контроля смещения горных пород карьеров. Как сказано ранее, у данного типа ВОД есть зависимость характеристик от изменения внешней температуры, так как меняется фаза распространения светового сигнала по ОВ, что может вызвать серьезные искажения результатов измерения [77].

Есть статья [78], в которой рассмотрены физико-математические основы волоконной оптики основные методы принципы передачи оптических сигналов по ОВ, это может быть полезным в дальнейшем для формирования собственной физико-математической модели. В мире имеется достаточно много различных типов ОВ. Они отличаются конструкцией и у каждого есть своя технология производства. Специальные ОВ имеют различное назначение, но в основном



используются для производства ВОД.

Найдена еще одна статья, в которой представлены сведения о проблемах развития ВОД, а также разные конструкции волоконно-оптических систем мониторинга и контроля [79]. Авторы отмечают, что есть определенные проблемы при практическом применении предлагаемой ими методики контроля технического состояния конструкций с использованием ВОД. В первую очередь все исследователи отмечают необходимость использования материальных средств для изготовления промышленных образцов и проведении испытаний. Поэтому на первоначальных этапах используется упрощенные конструкции датчиков давления, в которых использовано микроструктурирование ОБ [80]. Проанализировав достаточное количество источников, действующих систем мониторинга технического состояния строительных конструкций на основе распределенных ВОД не выявлено, которые можно было бы отметить, как успешно прошедшие испытания и находящиеся в длительной эксплуатации. Есть статья, где ученые из Китая [81] провели достаточно полномасштабные исследования, которые были направлены для создания ВОД на основе решеток Брэгга, это уже не новая тема, но достаточно актуальная, так как в угольных шахтах Китая сложилась достаточно высокая потребность в распределенных и квази-распределенных системах мониторинга геотехнического состояния выработок. Они поднимают ряд нерешенных проблем, о которых шла речь ранее, так как решетки Брэгга имеют ряд особенностей использования. Технические и экономические проблемы пока не решены, что мешает данному виду ВОД выйти на рынок. Авторы отмечают, что с помощью ВОД возможно контролировать изменения геотехнических параметров, а именно смещение горных пород. Разработка предлагается для шахт, но может быть использована и на открытых разработках [82].

## **1.5 Существующие методы контроля роста трещин в железобетонных конструкциях**

В настоящий момент промышленностью выпускаются различные приборы и средства неразрушающего контроля, использующие известный метод проведения инструментальных обследований строительных объектов. Существует достаточно значительный арсенал методов и средств, которые используются в строительной индустрии. Перечислять и рассматривать их все просто нет необходимости, так как информация о них находится в открытых источниках и дублировать ее в настоящей работе не имеет смысла. Далее будут приведены только некоторые примеры существующих методов и средств неразрушающего контроля. Например, в строительстве используются средства неразрушающего контроля прочности для оценки качества железобетонных и каменных конструкций, такими приборами являются дефектоскопы ИПС-МГ4, ИПА-МГ-4, УКС-МГ-4, они работают на различных принципах, но чаще всего используются ультразвуковые и электромагнитные волны различных частот. В качестве отдельного примера можно привести ультразвуковой дефектоскоп А1220 MONOLITH.

Данный прибор используется для обнаружения неоднородностей, пустот и

трещин внутри конструкций из железобетона и подобных материалов. Для выполнения работ нужен непосредственный доступ к конструкции. Информация взята из открытого доступа ([https://setek.kz/catalog/\\_nerazrushayuchshii-kontrol/ultrazvukovoy-kontrol/defektoskopy/a1220-monolith](https://setek.kz/catalog/_nerazrushayuchshii-kontrol/ultrazvukovoy-kontrol/defektoskopy/a1220-monolith)). Указанные приборы и их многочисленные аналоги, используемые для разового оперативного неразрушающего контроля прочности и однородности бетона. Также данные приборы способны работать с растворами (рисунок 20).



Рисунок 20 – Ультразвуковой дефектоскоп A1220 MONOLITH

Например, помимо ультразвуковых дефектоскопов используется метод ударного импульса по ГОСТ 22690. Рассматривать данный вид оборудования нет необходимости, так как его нельзя отнести к системе мониторинга и постоянного контроля. Дефектоскоп может выполнять только единовременные измерения, а вот аппаратно-программный комплекс контроля технического состояния строительных конструкций на основе волоконно-оптических датчиков способен вести контроль в течение длительного времени постоянно. Непрерывность процесса контроля — вот важное отличие от дефектоскопа. Предлагаемый АПК контроля технического состояния строительных конструкций может иметь несколько типов ВОД в том числе квази-распределенных и распределенных, что недостижимо для классических электрических систем контроля и измерения, которые основаны на использовании тензодатчиков на основе ВОД. Непрерывность контроля будет иметь преимущество по сравнению с периодичностью, а квази-распределенный и распределенный датчик будет иметь существенное преимущество в сравнении с электрическим точечным.

Поиск аналогов привел к наиболее близкой по своему назначению и сущности электрической системе мониторинга технического состояния железобетонных конструкций. Основой рассмотренной далее системы является тензометрия, соответственно система основана на точечных измерениях. Также система мониторинга основана на передаче электрических сигналов и использовании медных проводников. Полную информацию о регистраторе можно найти на сайте

<https://www.interpribor.ru/the-measurement-of-crack-widths-in-concrete-autograph-1.2>. «АВТОГРАФ-1.2» используется для длительного автономного мониторинга деформаций строительных конструкций. Его измерительная база не превышает 155 мм. Данный прибор способен контролировать рост трещин в бетонных или железобетонных конструкциях и закрепляется на боковой грани. С его помощью контролируется длительный процесс раскрытия трещин, например в плитах перекрытия. Для работы нужен блок согласования и персональный компьютер с программным обеспечением. По разным оценкам стоимость одного датчика без стоимости кабеля связи может лежать в районе 90 тысяч рублей, что не так мало, в этом он уже может проигрывать ВОД, при этом он точечный. «АВТОГРАФ-1.2» содержит собственный микропроцессор и аккумулятор. Время его работы производителем не оценивается точно и представлено достаточно расплывчатыми цифрами 1...1000 часов. При этом ВОД не имеет батареи и может работать в течение 50 лет непрерывно, так как не требует электрического питания. Стоимость медного кабеля значительно выше, чем оптического. «АВТОГРАФ-1.2» может выполнять регистрацию, фиксацию результатов измерений, а полученные данные отправляются на персональный компьютер по медному кабелю. Имеются ограничения по длине канала передачи данных и обычно максимально без усилителя его длина не более 800 метров. «АВТОГРАФ-1.2» устанавливается непосредственно в зоне растущей трещины и имеет две точки закрепления. Одна точка находится условно в неподвижной зоне, а вторая – в подвижной. Если трещина расширяется, то расстояние между двумя точками, в которые забиты анкеры (реперы), естественно увеличивается пропорционально величине роста трещины, которая сформировалась в железобетонной конструкции. Диапазон измерения перемещений анкером (репером) достаточно мал и составляет всего 20 мм, а вот дискретность измерения самого перемещения анкером достаточно высока и составляет  $\pm 10$  мкм. На фото представлен электронный регистратор «АВТОГРАФ-1.2», который используется в реальных условиях для контроля роста трещины (рисунок 21).

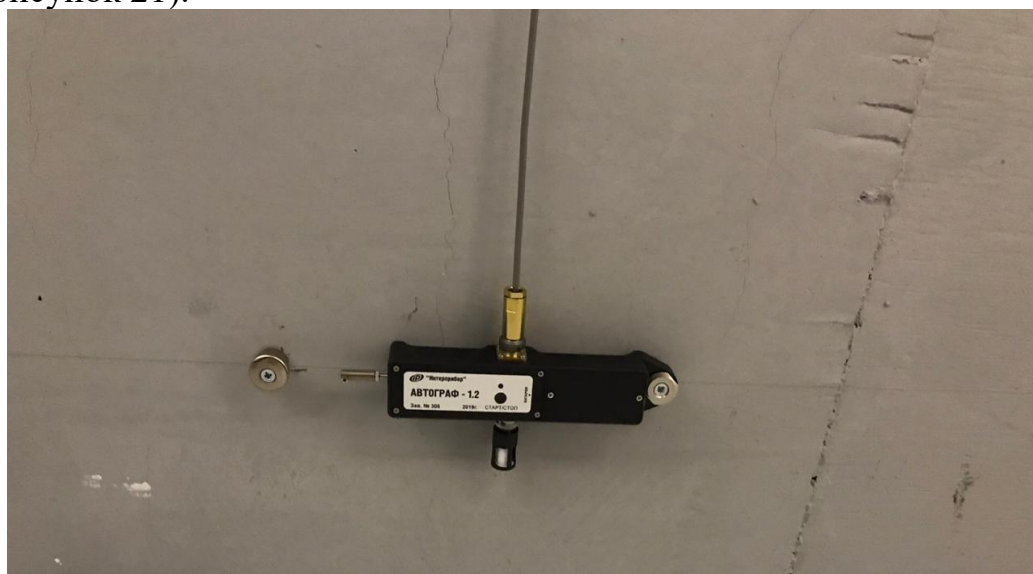


Рисунок 21 – Регистратор «АВТОГРАФ-1.2»

Как сказано ранее, для передачи электрического сигнала от регистратора до компьютера необходим многожильный медный кабель, что является достаточно серьезным недостатком.

Рост трещин и их образование в строительных конструкциях является достаточно серьезной проблемой. Контроль образовавшихся трещин тоже требует разработки современных методов и средств. Имеется ряд публикаций, связанных с этой темой. Системы мониторинга строительных железобетонных конструкций выходят на новую орбиту развития, так как сейчас есть определенный спрос на них [83]. Есть предложение использовать электрический ток для оценки параметров разрушения строительных конструкций из железобетона, но авторы опять не предлагают конкретного решения по созданию системы мониторинга, работающей в режиме реального времени. Можно контролировать процесс разрушения бетона измеряя электрические параметры [84].

На рисунках 22 – 22 приведена часть сделанных фотографий реальных фундаментов, в которых образовались трещины.



Рисунок 22 – Обнаруженные трещины в фундаменте, фото 1

В мировой практике пока еще нет массово производимых систем мониторинга с ВОД распределенного и квази -распределенного типа. Это показал результат анализа перечисленных выше источников. Есть отдельные лабораторные образцы в различной стадии готовности к промышленному использованию. Соответственно задачи эффективного контроля монолитных железобетонных конструкций не решена в полном объеме. Так как данная работа направлена на мониторинг технического состояния железобетонных конструкций и рассматривается на примере фундамента, то было проведено обследование различных фундаментов на предмет и наличия в них разного рода трещин.

Как сказано ранее, часть фундамента может быть погружена в грунт и недоступна для осмотра. Поэтому обнаружить трещину визуально и вести ее изучение не представляется возможным. Требуется устраивать траншеи или

шурфы для открытия боковой грани фундамента и проведения его осмотра. Это достаточно затратная по времени и финансам операция, требующая соответствующей подготовки. Далее можно использовать приборы неразрушающего контроля для поиска скрытых трещин. Видимые трещины можно наблюдать при помощи тензодатчиков. Как видно на фото, представленные ранее железобетонные фундаменты имеют уже сформировавшиеся и даже полностью раскрытые трещины.



Рисунок 23 – Обнаруженные трещины в фундаменте, фото 2

На данных фото показан факт образования и отсутствия системы мониторинга, которая могла бы на ранних этапах дать информацию об изменении напряженно-деформированного состояния железобетонного фундамента.



Рисунок 24 – Обнаруженные трещины в фундаменте, фото 3

Данный пример представлен для демонстрации самих трещин, которые сформировались в фундаменте по разным причинам, например, подмыв основания фундамента, несоблюдение правил строительства и эксплуатации, но эти причины сейчас не устанавливаются, так как это область другого научного направления.

Авторы статьи [85] рассуждают о важности фиксации процесса развития трещин при начальной стадии их раскрытия. В указанной статье авторы раскрывают предлагаемый ими метод, который обеспечивает непрерывный контроль технического состояния железобетонной конструкций в режиме реального времени для этого используются датчики, основанные на эффекте импеданса. В другой статье представлены важные сведения, связанные с развитием процесса разрушения строительных конструкций и фундаментов из-за образовавшихся в них трещин [86]. Еще авторы предлагают свой метод, связанный с неразрушающим контролем прочности бетона [87], но это тоже разовая операция по измерению, нет постоянства контроля. Еще одна интересная область, где используются распределенные и квази-распределенные ВОД, эта область связана с разработкой систем охраны периметров. В этих системах можно найти ряд сходств с предлагаемой системой мониторинга, но есть, конечно, и существенные отличия, так как это разные области применения. В данных системах охраны тоже используется ОВ, которое является чувствительным сенсором, воспринимающим механическое воздействие [88]. В данной статье есть отличие от уже созданных систем контроля предлагаемая разработка имеет принципиально новый алгоритм обработки полученных данных от ВОД [89]. Предлагаемая методика рассмотрена в указанной статье, а ее сущность заключается в анализе полученных данных от ВОД и контролю изменения картины пикселей светового пятна, которое падает на поверхность фотоприемника. Авторам удалось за счет использования ОВ стандарта G652 существенно увеличить длину измерительного канала. Авторами выполнены исследования влияния величины механических воздействий на величину дополнительных потерь в телекоммуникационных волоконно-оптических кабелях. Выполнены и представлены результаты предварительных исследований по использованию ОВ для контроля целостности бетонных балок [90]. Это попытка создать систему мониторинга на основе распределенных ВОД, что уже ближе к теме диссертации. Авторы отмечают, что световое пятно из одномодового ОВ имеет ступенчатый профиль, который подчиняется нормальному закону распределения Гаусса. При этом авторы отмечают, что исследуемое световое пятно содержало определенную долю шума, который изменялся при изменении внешней температуры, это затрудняло процесс измерения [91]. Разработана модель ВОД для контроля механических напряжений в горных выработках, что может быть адаптировано и для бетонной конструкции. Однако были проведены опыты, когда волокно располагалось внутри бетонной балки, что вызывает интерес, а сами результаты могут быть использованы для планирования собственных опытов. Авторы выдвигают идею, что нужно применять интеллектуальную обработку данных. Теми же авторами проведены еще несколько исследований в схожем направлении и опубликованы результаты. В данном случае исследования касались

охранных систем на основе ВОД. Рассмотрены системы пассивной охраны периметра на основе оптических волокон стандарта G 652. [92]. Информация по использованию ОВ для контроля горного массива угольных шахт рассмотрена в [93].

Наличие трещин в железобетонной конструкции [94-96] может представлять достаточно серьезную опасность для целостности здания и сооружения, так как отсутствие средств контроля за ростом и раскрытием трещин влечет опасность разрушения. Также неизвестно фактическое техническое состояние железобетонной конструкции, при этом последствия эксплуатации конструкций с трещинами являются опасными.

Подводя итоги анализа, можно сказать, что существующие средства неразрушающего контроля, которые позволяют выявить скрытые трещины в железобетонных конструкциях, достаточно развиты. Можно выделить несколько методов дефектоскопии, таких как ультразвуковой, структурного зондирования железобетонных конструкций. Что касается последнего он достаточно новый. Его принцип действия основан на анализе эхо-сигналов. Подробнее можно ознакомиться с методом структурного зондирования железобетонных конструкций, изучив статьи [97,98]. Есть еще один достаточно новый метод, но он тоже периодичный, как и все рассмотренные ранее, но он достаточно новый и связан с использованием георадара, проникающего сквозь землю (GPR) [99-100], это позволяет контролировать устойчивость горных пород и оснований фундаментов. Также данное направление является достаточно новым и мало изученным.

Как показал анализ литературы, остается нерешенным в полном объеме вопрос, связанный с поиском методов и средств для постоянного мониторинга и контроля технического состояния зданий и сооружений. Как сказано ранее, в их конструкциях могут зарождаться трещины, которые впоследствии ведут к разрушению железобетонных конструкций. Поэтому исследования, связанные с разработкой средств ранней диагностики и технического состояния зданий и сооружений, являются весьма актуальными. Есть статья, где рассмотрены различные методы, которые успешно, но сведений о системах мониторинга нет. Подробно с известными методами, в том числе и с использованием ОВ, можно ознакомиться в обзоре [101].

Также можно сделать предварительный вывод, что достаточно популярным решением в мире является применение ВОД с решетками Брэгга [102]. Имеется источник [103], в котором рассмотрен метод контроля напряженно-деформированного состояния конструкции при усадке бетона. Есть несколько статей, в которых рассмотрены вопросы, связанные с разработкой системы зондирования проскальзывания арматурного стержня на основе решеток Брэгга [104]. В статье [105] авторами предлагается использовать волоконно-оптические тензодатчики, но с брегговскими решетками, что позволит установить повреждённые участки у мостовых перекрытий. Разработана система для прогнозирования деформаций для железобетонных конструкций с предварительным напряжением. При этом тоже используются решетки Брэгга, но

авторы уже предлагают для анализа данных использовать упрощенную нейронную сеть [106]. Использование решеток Брэгга является достаточно популярным, но при положительных сторонах их использования есть конечно и отрицательные. В первую очередь это сложность конструкции самого ВОД, а это влечёт за собой значительную его стоимость, что сдерживает их промышленное применение. Можно сказать, что есть альтернатива, так как найдены сведения по ВОД, основой которых является интерферометр Маха–Цендера [107], но он имеет ряд недостатков, которые не позволяют использовать его для решения задач данной диссертационной работы. Эти недостатки общеизвестны, и они уже были частично рассмотрены ранее. Далее математически будет доказано, что данный тип ВОД неприемлем для построения системы мониторинга зданий и сооружений, так как имеет достаточно высокую зависимость от изменения внешней температуры. Также известно, что чувствительность данных ВОД достаточно высока, но сильно зависит от длины ОВ и изменения температуры окружающей среды, что вызывает высокий уровень шума. Можно отметить, что есть более перспективный метод при создании квази -распределенных ВОД, это интерферометр Фабри-Перо, но он тоже подвержен влиянию температурных помех. В статье [108] представлена информация о гибридной системе мониторинга на квази-распределенного ВОД, здесь используется комбинация интерферометр Фабри-Перо и решетки Брэгга, но сложность и дороговизна данной системы просто очень высока для рассмотрения ее промышленного применения для контроля технического состояния зданий и сооружений, выполненных из железобетона. Есть методы оптической рефлектометрии, это тоже достаточно известные методы. Есть сведения о ВОД, использующие принципы контроля рассеяния Рэля [109, 110]. При этом достигается достаточно высокая разрешающая способность ВОД. Также есть некоторые варианты ВОД, основанные на принципе контроля рассеяния Бриллюэна [111].

Есть сведения о результатах сравнения традиционных методов тензометрии и методов, основанных на использовании ВОД. Авторами в статье [112] представлены результаты натурального эксперимента, в котором было выполнено сравнение тензорезисторов и ВОД, а также метода корреляции цифровых изображений при мониторинге распространения усталости в бетонных балках. Эксперимент показал использование системы волоконно-оптического измерения механических напряжений и температуры и 5 тензорезисторов компании Hottinger–Baldwin–Messtechnik, некоторое преимущество ВОД, которые дали более точные данные о распределении механических напряжений в конструкции. Было отмечено преимущество ВОД в сравнении с тензодатчиками. Еще более масштабные исследования были проведены в Бельгии. Там выполнили сравнение данных, полученных от распределенного ВОД, который был вмонтирован в тело железобетонной конструкции. Были выполнены измерения при помощи ВОД, например, смещений и деформаций стержней стальной арматуры. Еще были получены данные о поверхностной деформации конструкции. Был использован распределенный ВОД [113]. Полученные данные экспериментов показали, что тензодатчики для поверхностного контроля деформации не в состоянии



определить степень проникновения деформации в основание конструкции и для измерений использовались эмпирические допущения, в которых некоторые параметры оказались завышены или занижены. При этом распределенный ВОД позволил измерить проникновение деформации в железобетонную конструкцию при более высоком разрешении.

Полученная информация и изученный материал будут использованы в дальнейшем для повышения качества исследований и достижения оригинальности. Проведенный анализ научной литературы показал, что существует проблема, связанная с ранней диагностикой разрушения строительных конструкций из железобетона. Также есть необходимость в разработке методов и средств эффективного контроля процесса формирования и раскрытия трещин, а также определение места их дислокации. Можно отметить, что стоимость ОВ с каждым годом снижается и рыночная стоимость ОВ в настоящий момент времени лежит в пределах 10 долларов США за один километр его протяженности. В отличие от струнных тензодатчиков, на основе ВОД можно построить систему мониторинга не только точечную, но и распределенного или квази-распределенного типа. ОВ не восприимчиво к электромагнитным помехам.

Нужно также учитывать, что многие протяженные объекты тоже недоступны к осмотру. Если трещины развиваются и раскрываются, то это вызовет разрушение фундамента. Ранее проведенные научные исследования, которые будут нами рассмотрены, показали, что при помощи ВОД можно зафиксировать изменение в напряженно-деформированном состоянии горного массива и железобетонного фундамента. При помощи ОВ можно установить место концентрации напряжений, некую аварийно – опасную зону деформации железобетонного фундамента и установить точное месторасположение трещины. Также можно уже на ранней стадии формирования концентраторов напряжений установить место, где в будущем возможно будут сформированы трещины. Использование ОВ расширяет границы контроля, так как протяженность каналов может быть достигнута достаточно значительная в пределах до 50 км. При этом используется стандартное ОВ, применяемое в системах телекоммуникации, что позволяет снизить стоимость системы мониторинга и оказать конкуренцию струнным тензодатчикам, например, рассмотренному ранее регистратору «АВТОГРАФ-1.2». Если установить ВОД в теле фундамента при его монтаже или закрепить на боковых поверхностях, то он может работать в течение 50 лет. Как сказано ранее, весь представленный опыт будет учтен для исключения дублирования и неверного направления исследований, а также для формирования собственного направления для решения поставленных задач.

## **1.6 Виды и назначение волоконно-оптических датчиков**

ВОД разработаны уже достаточно давно, первые лабораторные образцы уже представлены миру еще в 90 годах прошлого века. Техника и технологии развивались, были разочарования и ошибки, были и успехи. При написании диссертации были изучены источники [114-118], в которых представлена

достаточно подробная информация о разработках отечественных и зарубежных ученых. Сейчас уже можно купить ВОД, но в большинстве случаев это датчики для точечных измерений или комбинированные оптико-электронные датчики, а также есть варианты, когда измерительная часть электрическая, а передача данных осуществляется по ОВ.

ВОД используются во многих сферах промышленности, например, для определения концентрации различных веществ и газов, измерения скорости вращения, контроля механических напряжений и деформаций. Также имеются варианты ВОД, предназначенных для измерения давления, температуры, уровня жидкости, ускорения, вибрации, положения в пространстве. ВОД применяются для контроля параметров технологического процесса, так как имеют высокую точность и стабильность, устойчивы к электромагнитным помехам. ВОД обладают возможностью бесконтактного измерения [114-118]. Наиболее массовые- ВОД это различные конструкции, пригодные для точечного измерения. Например, ВОД, выпускаемый под брендом АККЕ (Китай) или Omron (Япония), это аналоги регистратора «АВТОГРАФ-1.2», который рассмотрен ранее и предназначен для измерения деформации и температуры. Имеются аналоги тензодатчиков для точечных измерений, например, ВОД от бренда Keyence типа FU-12. ВОД позволяют контролировать состояние строительных конструкций в непрерывном режиме, но есть проблема, связанная с тем, что результаты измерений напрямую зависят от температуры, поэтому необходимо выполнять коррекцию при измерениях. ВОД используются в гражданском строительстве и для контроля геотехнического состояния горного массива открытых и подземных разработок полезных ископаемых. Квази -распределенные и распределенные ВОД приобрести достаточно сложно, а их стоимость очень высокая, также требуется предварительный заказ на разработку. Имеется множество ограничений со стороны производителя. Несомненно, больше на рынке именно оптических датчиков, которые выдаются за волоконно-оптические, но их назначение несколько иное.

Классификация ВОД выполнена с учетом мирового опыта и в ней представлены сведения как о уже существующих ВОД, так и о разрабатываемых, результаты представлены на рисунках 25-31.

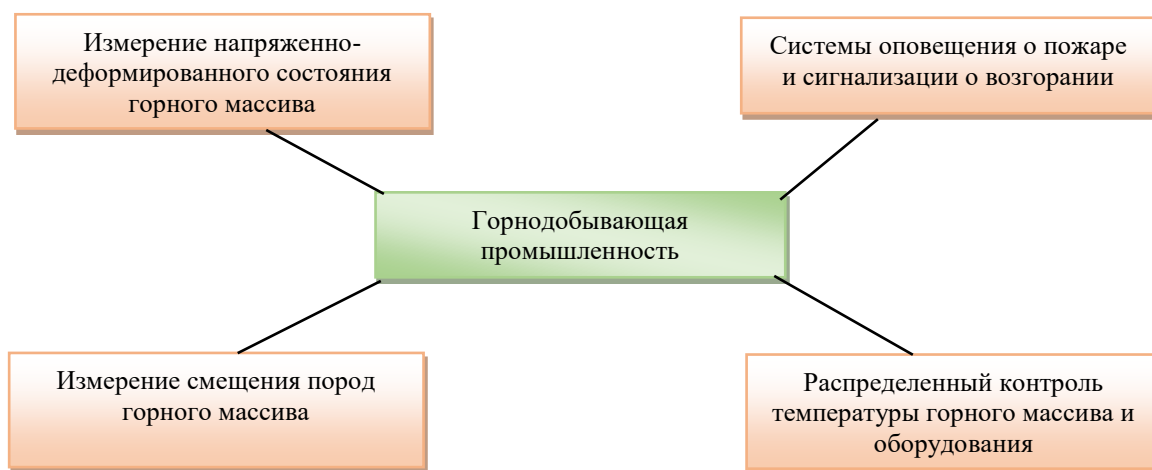


Рисунок 25 – Применение ВОД в горнодобывающей промышленности

Имеются опытные образцы ВОД, созданные на основе решеток Брэгга, которые можно использовать в различных областях промышленности аэрокосмической, строительной, нефтегазовой. Особенно ВОД применяются при работе с агрессивными средами и в экстремальных условиях эксплуатации. Далее будет выполнена классификация ВОД на основании полученных сведений из источников [114-118].

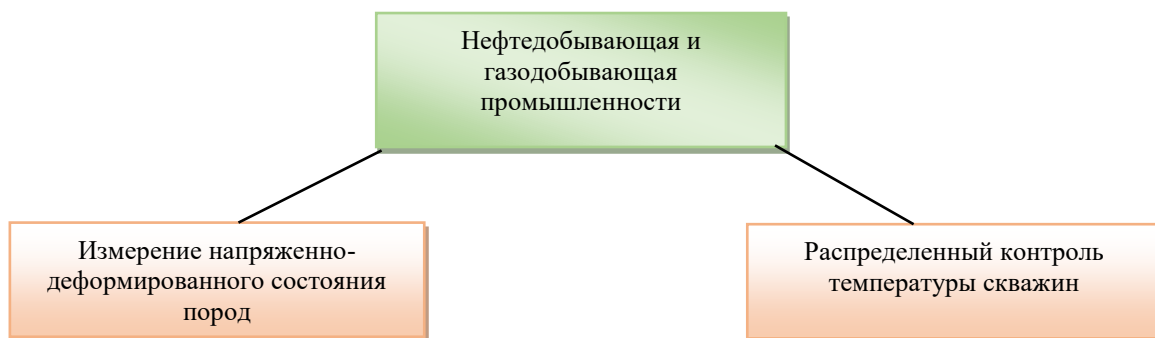


Рисунок 26 – Применение ВОД в нефтедобывающей и газодобывающей промышленности



Рисунок 27 – Применение ВОД в газовой промышленности и транспортировке газа

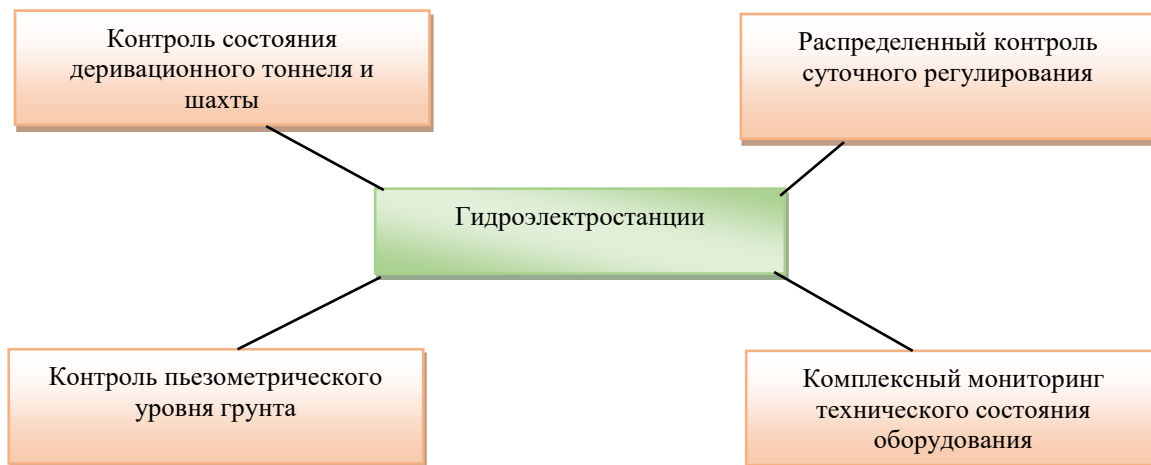


Рисунок 28 – Применение ВОД на гидроэлектростанциях



Рисунок 29 – Применение ВОД на объектах электроэнергетики

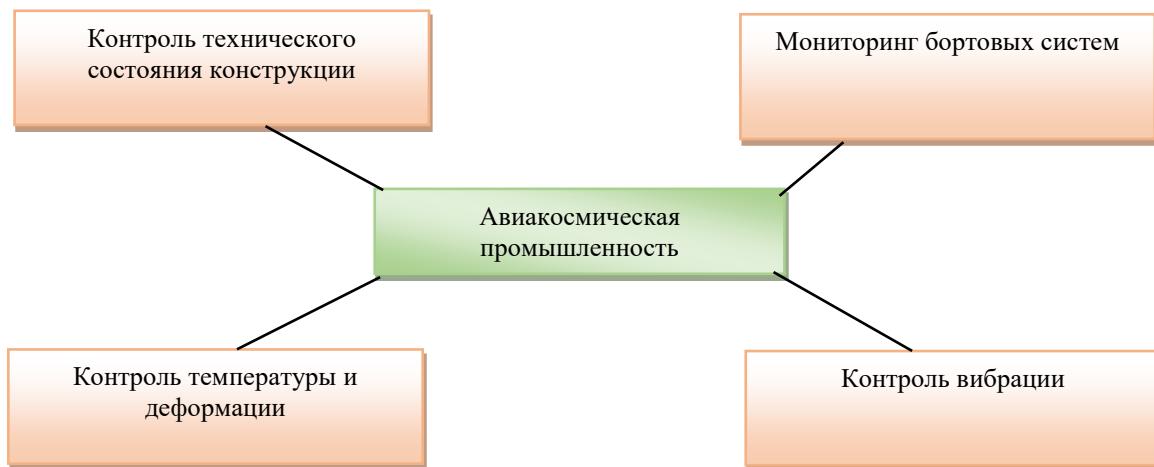


Рисунок 30 – Применение ВОД в авиакосмической промышленности



Рисунок 31 – Применение ВОД в строительстве

Можно отметить, что ВОД имеют преимущества в сравнении с электрическими датчиками [114-118], в первую очередь они не могут создать угрозу взрыва газовой атмосферы или послужить источником пожара. Соответственно ВОД могут работать непосредственно во взрывоопасной среде. ВОД имеют большой срок службы по разным оценкам от 25 до 50 лет [114-118]. ВОД могут выполнять как точечные измерения, так и быть распределенными и квази -распределенными, что недостижимо для электрических датчиков. Еще можно отметить, что ВОД могут одновременно измерять несколько параметров, например давление и температуру. ОВ одновременно является чувствительным элементом и направляющей системой передачи данных. ОВ обеспечивает низкое затухание сигнала, что позволяет существенно снизить затраты энергии в десятки раз в сравнении с проводниками электрических датчиков. Протяженность ВОД может быть около 100 км, при этом это одновременно датчик и канал передачи данных [114-118].

Согласно полученной информации из источников [114-118], имеются различные конструкции датчиков, которые могут быть как простые, так и сложные. Более простые по конструкции являются ВОД, основанные на изменении интенсивности световой волны. ОВ также способно воспринимать виброакустические волны, что позволяет найти применение в акустике и охранных системах. Все ВОД можно разделить на несколько групп по использованию ОВ, которое может быть одномодовым, многомодовым и специальным.

Все ВОД можно разделить также на три основных типа. В первом типе ВОД ОВ подвергается механическому воздействию, в нем возникает фотоупругий эффект, а также эффекты Фарадея, Керра. Такие ВОД применяются для измерения давления, нагрузки и НДС. В таких датчиках также могут использоваться специальные ОВ, например. Флуоресцентные ОВ. Второй тип ВОД основан на принципе изменения параметров излучения световой волны, проходящей через ОВ, и его основой является принцип «физическая величина – свет». В данном случае чувствительным элементом является уже не ОВ, как в первом случае, а сам измеряемый объект. Третий тип ВОД, чувствительный элемент устанавливается на торце ОВ, чувствительным элементом может быть отражающий элемент, мембрана или иной упругий элемент. Данный ВОД основан на принципе механического перемещения оптического элемента под действием внешних сил. Все три типа ВОД представлены на рисунке 32.

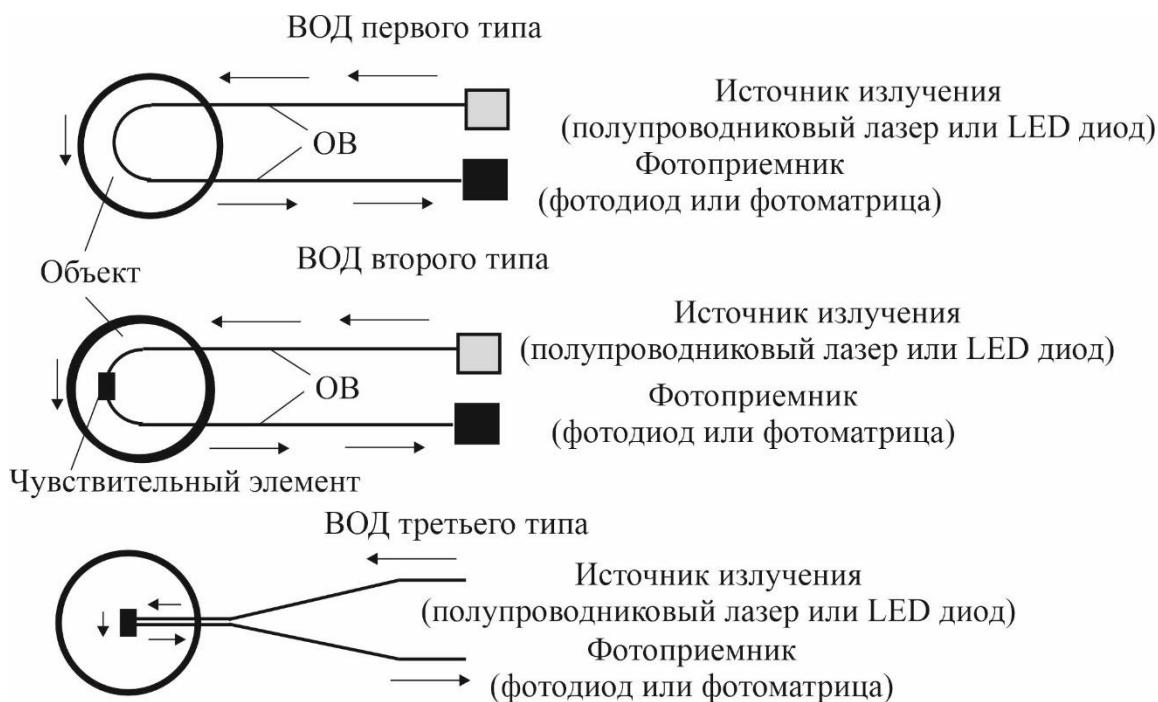


Рисунок 32 – Типы ВОД

## Выводы по главе 1

1. Выполнен подробный литературный обзор и анализ современного состояния развития систем контроля технического состояния различных объектов с использованием волоконно-оптических датчиков. Выстроены основные гипотезы и определены пути их проверки. Рассмотрены общие вопросы проведения анализа и описание источников получения первичной информации. Сформулирована актуальность поведения исследований и разработки новой конструкции ВОД для контроля технического состояния железобетонных конструкций. Выявлены и пробелы, и отсутствие научных знаний в области использования квази - распределенных и распределенных ВОД. В данной работе предлагается использовать не электрические, а ВОД, которые имеют ряд известных и неоспоримых преимуществ в сравнении с электрическими. При этом протяженность измерительного полностью энергопассивного канала может составлять несколько км.

2. При анализе использованы материалы, размещенные в наукоемких библиометрических базах данных WoS и Scopus, а также базы данных отечественных и зарубежных патентов, в том числе Республики Казахстан, которые тоже являются гарантированно надежными источниками первичной информации. Анализу подвергся материал, имеющийся в базе РИНЦ, а также других зарубежных стран, в том числе Казахской базы данных КазБЦ. Было проанализировано несколько тысяч различных статей, входящих в область научных направлений диссертации.

3. Чувствительный элемент (ВОД) может размещаться непосредственно внутри фундамента или иной железобетонной конструкции и быть установлен на

этапе ее изготовления, путем закрепления на арматуре и выводом концов для последующего присоединения к блоку обработки данных. Вторым вариантом может быть установка ВОД на боковых гранях строительных конструкций, но в данной работе данный метод не рассмотрен, так как рассматривается как перспективный.

4. Установлено, что интеллектуальные системы для определения повреждений, технического состояния протяженных объектов получили широкое применение. На данный момент имеется множество решений, но большинство из них выполняется с применением интерферометрии на принципе ф-OTDR.

5. Использование решеток Брэгга имеет как положительные стороны, так и отрицательные, во многом это сложность конструкции самого ВОД, а также такой ВОД будет иметь большую стоимость по сравнению с электрическим тензодатчиком, что и сдерживает их применение.

6. ВОД, которые созданы по схеме интерферометра Маха–Цендера, имеют проблемы в точности измерений при изменении внешней температуры.

7. Можно отметить, что ВОД имеют следующие преимущества: пожаро-взрывобезопасность, отсутствие чувствительности к электромагнитным помехам, широкий диапазон и точность измерений, способность выполнять мульти-измерения, значительный срок службы, превышающий 20 лет.

## 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО И ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ

### 2.1 Выбор методов исследования и среды моделирования

Основной задачей данной главы является разработка физико-математической модели (ФММ), которая показывает изменения параметров излучения проходящего по сердцевине одномодового оптического волокна, которое находится внутри железобетонной балки. При этом ОВ используется как датчик, так и как канал передачи сигналов. Излучения формируется в виде пятна схожего с пятном Пуассона на поверхности фотоматрицы, при этом имеет распределения Гаусса и ступенчатый профиль. При помощи интеллектуального оптико-электронного анализа можно контролировать техническое состояние строительных конструкций. Методология и методы исследования, использованные в данной диссертационной работе, являются общенаучными и будут раскрыты по мере их использования. Для моделирования использовались компьютерные программы ANSYS и COMCOL, которые позволили выполнить все необходимые исследования НДС железобетонной балки, в которой находилась ОВ. Были получены картины визуализации НДС при приложении нагрузки в 3D модели. Данные программы имеют достаточно развитый инструментарий и признаны инженерами и учеными всего мира как наиболее эффективное средство моделирования различных конструкций, устройств и процессов практически во всех областях науки и техники. С помощью программ ANSYS и COMCOL возможно выполнить анализ отдельных или взаимосвязанных физических процессов, решать контактные задачи. В данных программах используется метод конечных элементов. Программы позволяют выполнить все этапы моделирования от -создания геометрической 3D – модели с возможностью задания свойств используемых материалов до описания основных моментов физики поставленных задач, выполнения численного расчёта, анализа полученных результатов моделирования и визуализации. Например, может быть визуализирована картина механических напряжений и деформаций. Далее полученные данные результатов теоретических и компьютерных экспериментов будут обработаны при помощи компьютерных программ для математического моделирования Wolframalpha и ANETR. При помощи данных программ будет оценена достоверность результатов и установлены отклонения, а также погрешности. Графики будут построены и аппроксимированы с использованием программы Wolframalpha и Microsoft Excel. Также будут использованы основные теоретические положения оптики и волоконно-оптической техники, методы цифровой обработки и анализа сигналов и изображений. Значительный объем полевых и лабораторных испытаний опытного образца, при которых эмпирически были получены результаты, позволил добиться достоверности полученных результатов при компьютерном моделировании и достижения адекватности ФММ путем сравнения экспериментальных и теоретических данных. Достоверность эмпирических данных была получена за



счет предварительной калибровки ВОД в испытательной лабораторий с использованием сертифицированной силовоспроизводящей машины. Используя ранее полученные результаты исследований и наличие научного задела в области диссертационной работы, сформулирована основная идея диссертационной работы: применения стандартного одномодового оптического волокна в качестве квази -распределённого и распределённого ВОД для непрерывного контроля технического состояния зданий и конструкций. Система должна работать в режиме реального времени для своевременного информирования об изменении параметров механических нагрузок, напряжений и деформаций. Сформулированная в рамках диссертационной работы гипотеза отражает изменения светового пятна, лежащего на поверхности чувствительного фотоприемника, который установлен на выходе из ВОД. При механической нагрузке на ВОД происходит изменение спектра светового пятна, что позволяет при помощи алгоритмов искусственного интеллекта обработать данные, исключить помехи и выдать точные численные значения деформации.

Основная идея диссертационной работы будет проверена теоретическим и экспериментальным путем, опираясь на использование законов научной логики. Исследования носят прикладной характер, поэтому для достижения поставленных целей предлагается провести математическое и натурное моделирование для обоснования параметров и конфигурации интеллектуальной системы мониторинга деформаций строительных конструкций зданий и сооружений для повышения безопасности эксплуатации. Экспериментальным путем, подтвержденным соответствующими расчетами, будут исследованы результаты мониторинга строительных объектов с использованием волоконно-оптических сенсоров и предложены оптимальные параметры для настройки системы. Информация об основе методологии и методики научных исследований, а также об использовании общенаучных методов исследования и обработки экспериментальных данных была получена из [119-122].

## **2.2 Основные теоретические сведения для разработки физико-математических основ проведения моделирования**

Необходимо разработать физико-математические основы для создания ВОД, способных контролировать напряженно-деформированное состояние конструкции, параметры ее нагружения, а также важным моментом является установление расстояния до места формирования трещины. Определение места дислокации трещины можно выполнить при помощи квази-распределенного и распределённого метода. Классический метод с использованием точечных электрических тензодатчиков в данном случае не используется из-за его несовершенства и даже непригодности для контроля технического состояния железобетонной строительной конструкции, которая может быть достаточно протяженной. Второй момент, это отказ от электрических сигналов и медных проводников и переход к оптическим проводникам и передаче световой волны на значительные расстояния с минимальным коэффициентом затухания. Основой

предлагаемого ВОД является известный фотоупругий эффект, когда возникают изменения свойств световой волны при возникновении микроизгиба оптического волокна стандарта G652. Данное одномодовое оптическое волокно выбрано на основании низких параметров затухания сигнала в пределах 0,22 dB/km на длине волны 1550 нм, что достаточно высокий показатель, который обеспечит минимальные энергозатраты. Также нужно выделить, что данное ОВ является наиболее массовым в производстве и имеет более низкую стоимость по отношению к другим типам ОВ, в отличие от многомодового оптического волокна стандарта G651, которое тоже используется для изготовления ВОД, но с ограниченностью эффективной дистанции примерно в 500 метров. На большее расстояние данное волокно желательно не использовать, так как потери увеличиваются в сотни раз, по сравнению с одномодовым оптическим волокном стандарта G652. Так как возможно, что фундамент будет иметь большую протяженность по своему периметру, то многомодовое оптическое волокно стандарта G651 исключается из дальнейшего рассмотрения, более высокие стандарты G653 и выше тоже исключаются из-за специфического назначения и использования в магистральных кабелях для систем телекоммуникации. Более высокие номера стандартов, особенно 700 и 900, не восприимчивы к изгибу и непригодны для изготовления ВОД для реализации цели диссертационной работы. Для лучшего понимания процессов, проходящих в ОВ и установления основных параметров можно обратиться уже к источникам [123-127], содержащим известные сведения, которые также можно найти в открытых источниках. Эти научно-технические работы будут использоваться в дальнейшем для обоснования собственных суждений и пояснений некоторых моментов теории волоконно-оптической техники и оптики. Данные источники лежат в разных временных областях, но представленные в них теоретические сведения достаточно хорошо коррелируют и имеют актуальность. Использование данных источников позволяет объяснить ряд моментов, связанных с новизной и оригинальностью предлагаемого ВОД и метода обработки данных. Используя сведения из [123-127], был построен график зависимости затухания оптической волны от ее длины. Также на рисунке 33 представлены профили обычных и специальных ОВ. Как сказано ранее, при моделировании будет использовано только одномодовое волокно и указаны окна прозрачности, что весьма важно для моделирования и выбора длины световой волны. Окно 1 имеет наибольшие потери, а окно 3 наименьшие, это свойство ОВ достаточно широко используется в телекоммуникации.

Далее необходимо выяснить, какой профиль показателя преломления будет использован, так как к показателям преломления будет еще неоднократное обращение, это также касается профиля светового пятна. Используя сведения из источников [123-127], выберем профиль показателей преломления, что в дальнейшем крайне важно для рассуждения о форме светового пятна, подающего на поверхность, это очень важный момент для условий моделирования. Также из указанных источников взяты устоявшиеся понятия и определения [123-127].

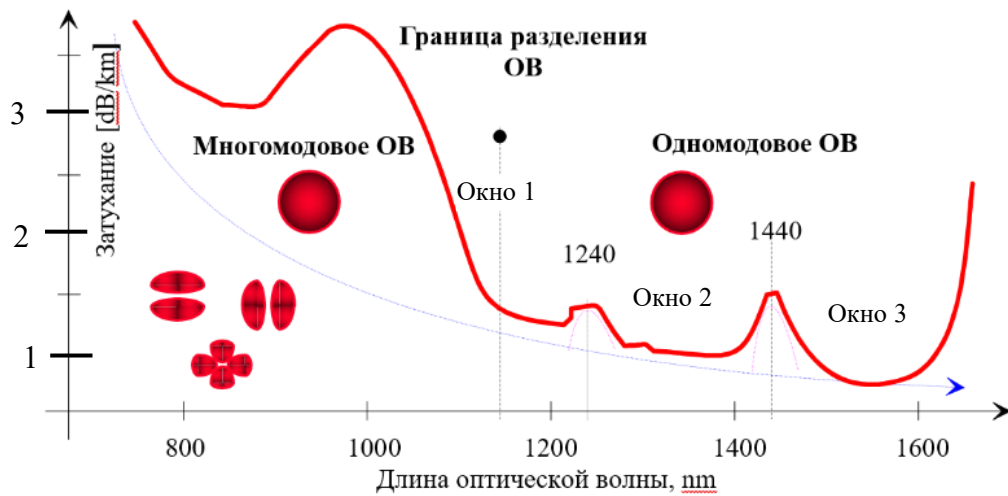


Рисунок 33 – График зависимости затухания от длины волны в волокне

Для понимания различия в профилях многомодового и одномодового оптических волокон, представим профили обоих волокон (рисунки 34 и 35). Черными стрелками показана траектория движения мод, зеленый и красный цвет указывает на разные траектории мод, соответственно их может быть несколько.

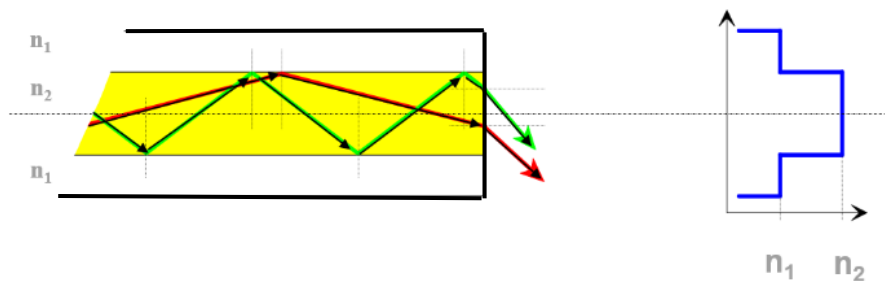


Рисунок 34 – Ступенчатый профиль многомодового волокна стандарта G651

Число мод можно определить по выражению [123-127]

$$M = 0.5 \times (\pi \times d \times NA / \lambda)^2.$$

Можно рассчитать число мод при численной апертуре равной  $NA = 0.2$ , диаметре сердцевины  $d = 50 \mu\text{m}$  и длине волны оптического диапазона  $\lambda = 850 \text{ nm}$ , которое будет равно  $M=680$ . При изменении длины волны  $\lambda = 1300 \text{ nm}$ , той же апертуре  $NA = 0.2$  и диаметре сердцевины  $d = 50 \mu\text{m}$  число мод уменьшится до примерно 292.

Одномодовое волокно стандарта G652 и выше имеет отличие, его сердцевина меньше и находится в пределах 9  $\mu\text{m}$ , напротив, многомодовое волокно имеет диаметр сердцевины  $d = 50$  или 62  $\mu\text{m}$ . Диаметры оболочки у ОВ стандарта G651 и G652 и выше одинаковые и составляют 125  $\mu\text{m}$  [123-127]. По волокну проходит только одна мода. Коэффициенты преломления могут быть различные для ОВ разных стандартов G652 и выше, для расчётов и моделирования можно принять условие  $n_1 = 1.4570$  для оболочки и  $n_2 = 1.4625$  для сердцевины. Профиль одномодового ОВ стандартов G652 и выше является ступенчатым и подчиняется закону нормального распределения Гаусса, этот профиль будет в дальнейшем использован при моделировании.

Численную апертуру можно вычислить по выражению [123-127]

$$NA = \sin \Theta = (n_2^2 - n_1^2)^{0,5} = \lambda / \pi w_0,$$

где  $w_0$  -потери оптической мощности

В данной работе это параметр будет принят следующий:  $NA = 0,17$  и  $\Theta = 9.8^\circ$ .

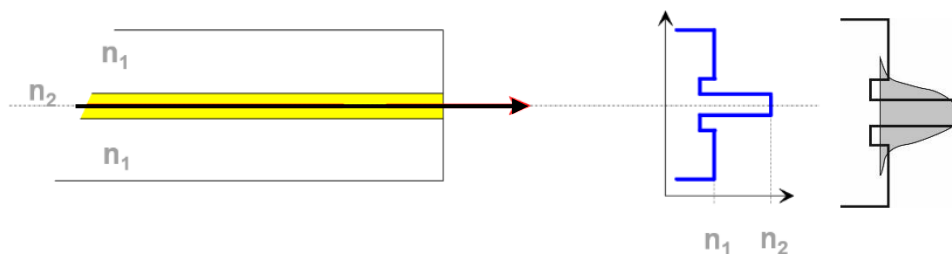
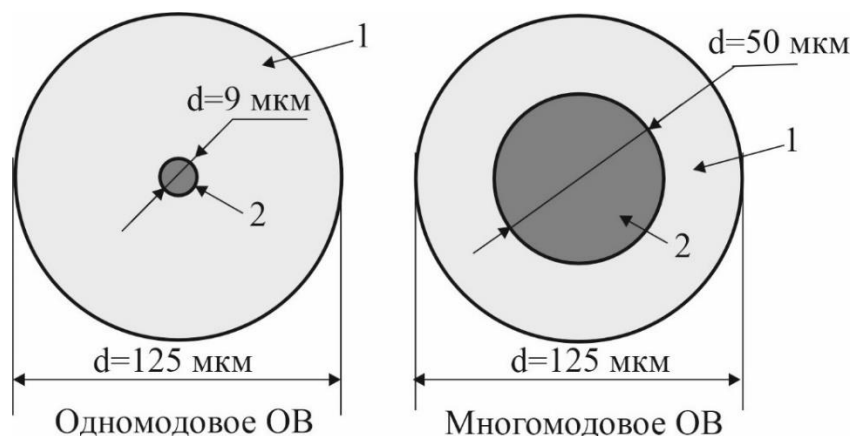


Рисунок 35 – Ступенчатый профиль одномодового волокна стандарта G652

На рисунке 36 показаны торцы ОВ, отличием их между собой является разный диаметр сердцевины. Для последующего моделирования будет использовано одномодовое ОВ с диаметром сердцевины 9  $\mu\text{m}$  [123-127].



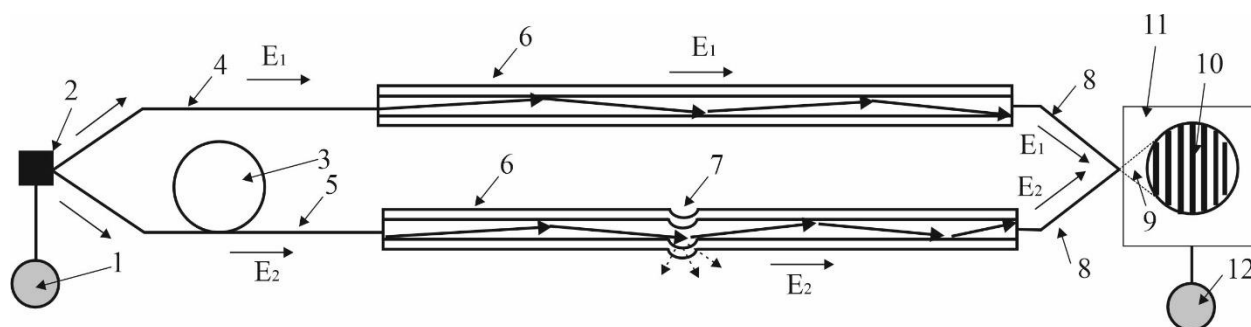
1 -оболочка ОВ, 2 – сердцевина ОВ  
Рисунок 36 – Торцы ОВ разных типов

## 2.3 Математическое описание процесса изменения свойств световой волны при механической нагрузке на ОВ

Одной из задач является разработка математического аппарата для описания процессов изменения свойств световой волны, проходящей по ОВ при механической нагрузке, которая вызывает трансформацию визуальных образов светового пятна в картину изменения интенсивности. Условием является, что сформированное световое пятно отвечает закону распределения Гаусса и модели Пуассона.

Для понимания процесса сначала рассмотрим известную теорию оптического двухлучевого интерферометра Маха-Цендера, это одна из вариаций оптического двухлучевого интерферометра Жамена, предложенного ранее. Были изучены научные работы отечественных и зарубежных ученых [128-135], в данных источниках можно найти подробную информацию о принципах работы и конструкции оптического двухлучевого интерферометра Маха-Цендера и других видов интерферометров. Данные источники лежат в разных временных диапазонах и имеют свой подход к описанию. Также информацию об оптических интерферометрах можно найти в открытых источниках. В дальнейшем для раскрытия теоретических основ работы оптического двухлучевого интерферометра будут использованы известные выражения для математического моделирования [136]. Недостатки использования интерферометра Маха-Цендера представлены в статье [137], авторы предлагают свой вариант ВОД для контроля смещения горных пород карьера. На рисунке 37 представлена схема волоконно-оптического двухлучевого интерферометра Маха-Цендера, классический вариант данного интерферометра не рассматривается, так как он не пригоден для создания системы контроля технического состояния строительных конструкций на основе волоконно-оптических датчиков, а больше пригоден для проведения физических опытов и демонстраций [128-135]. Математические выражения составлены с использованием известной теории двухлучевого интерферометра Маха-Цендера, которые изложены в источниках [128-137]. На рисунке 37 представлена упрощенная схема волоконно-оптического двухлучевого интерферометра Маха-Цендера, которая поясняет некоторые моменты конструкции и принципа действия данного устройства, аналоги данной схемы можно найти в [128-137]. Так как схема является условной то для удобства понимания ВОД изображен в увеличенном масштабе, так как необходимо показать фазу распространения световой волны по сердцевине ОВ. В данном волоконно-оптическом двухлучевом интерферометре Маха-Цендера использовано ОВ стандарта G652. Направления распространения световой волны показаны стрелками. Источником излучения может быть лазер или LED диод, все источники относятся к группе полупроводников. Обязательным условием является, чтобы источник излучения был обязательно когерентным, все пульсации и отклонения в частоте приведут к нарушению работы любого оптического интерферометра, а также уровень помех значительно возрастет, в некоторых случаях его работа станет невозможной. Так как двухлучевой оптический интерферометр Маха-Цендера достаточно чувствительный к

изменению температуры, колебания температуры в пределах градуса могут привести к изменению фазы распространения светового сигнала, и измерительное устройство выдаст ложные показания [128-137]. Есть методы борьбы с данным явлением, но сейчас они рассматриваться не будут, с ними можно ознакомиться в [128-137]. Данный оптический интерферометр достаточно чувствительный и многократно превосходит по своей разрешающей способности электрические тензодатчики.



- 1- когерентный источник излучения; 2 – оптический разветвитель;  
 3 – катушка с ОВ для формирования смещения фазы; 4 – ОВ, по которому распространяется излучение без смещения фазы; 5 – ОВ, по которому распространяется излучение со смещением фазы; 6 – увеличенный фрагмент ОВ, который является датчиком; 7 – место возникновения микроизгиба;  
 8 – выходные ОВ для формирования интерференционного светового пятна;  
 9 – проекция лучей; 10 – интерференционная картина излучения;  
 11 – фотоприемник; 12 – устройство преобразования и обработки данных.

Рисунок 37 - Схема волоконно-оптического двухлучевого интерферометра Маха-Цендера

При механическом воздействии на ОВ формируется место возникновения микроизгиба, позиция 7. Изменяется коэффициент преломления, а также возникает известный фотоупругий эффект, при котором изменяются показатели интенсивности и фазы распространения световой волны [128-135]. При возникновении микроизгиба часть световой волны покидает ОВ и выходит за пределы оболочки, это явление называется вносимыми дополнительными потерями [136, 137], на этом явлении основаны ВОД первого типа. Выход световой волны показан пунктирными линиями со стрелками. В дальнейшем данное явление будет использовано при разработке системы мониторинга. Теоретическая основа двухлучевой оптического интерферометра Маха-Цендера достаточно изучена, это сумма двух векторов напряженностей поля электромагнитных световой волн  $E_1$  и  $E_2$ , изменение параметров  $E_1$  и  $E_2$  способствует изменению параметра интенсивности световой волн  $I$ . Все изменения интенсивности световой волны  $I$  регистрируются фотоприемником, позиция 11. Параметр интенсивности световой

волны I можно выразить через вектор напряженностей поля электромагнитной световой волны  $E^2$  [128-137].

$$I \sim \overline{E^2}.$$

Если применить известную теорию физики [137], связанную с отношением напряженности электромагнитного поля двух лучей, полученных при разделении одного луча от абсолютно когерентного источника излучения. Обычно этим источником является лазер. Деление луча осуществляется за счет системы зеркал или волоконно-оптического разветвителя. Данные элементы позволяют разделить одну волну в пропорции 50/50, соответственно  $E_1$  и  $E_2$  имеют по 50% от общей мощности источника. В конце  $E_1$  и  $E_2$  объединяются на поверхности фотоприёмника, образуя общую интерференционную картину светового пятна, формируя темные и светлые полосы. Используя известные выражения, распишем каждую составляющую [128-137].

$$E_1 = E_{01} \cos(\omega t - \varphi_1), \quad (1)$$

$$E_2 = E_{02} \cos(\omega t - \varphi_2). \quad (2)$$

Затем сложим и получим новое выражение:

$$E = E_0 \cos(\omega t - \varphi). \quad (3)$$

С учетом изменения амплитуды световой волны и выражений (1), (2) и (3):

$$E_0 = \sqrt{E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos(\Delta\varphi(t))}. \quad (4)$$

Выполним вычисление фазы распространения световой волны по сердцевине ОВ:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{E_{01} \sin \varphi_1 + E_{02} \sin \varphi_2}{E_{01} \cos \varphi_1 + E_{02} \cos \varphi_2}\right). \quad (5)$$

Разность фаз выражается следующим образом:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_n + \Delta\varphi(t),$$

где  $\Delta\varphi_n$  – принятый угол для определения начального значения фазы;

$\Delta\varphi(t)$  – принятый угол для определения значения фазы при внешней нагрузке, которая приводит к деформации ОВ.

Если на ОВ оказать механическое воздействие и сформировать микроизгиб, то изменится значение фазы  $\Delta\varphi(t)$ , это является основным принципом измерения. После анализа научных публикации [128-137] стало известно о проблемах использования ВОД, основанных на конструкции известного двухлучевого интерферометра Маха-Цендера, который можно использовать в качестве устройства контроля технического состояния железобетонных конструкций. ВОД, основанный на использовании известной конструкции Маха-Цендера, в первую

очередь, имеет высокую чувствительность к изменению внешней температуры, что приводит к возникновению ложного сигнала и делает его применение невозможным, так как железобетонный фундамент подвергается воздействию температуры внешней окружающей среды, об этой проблеме уже говорилось в трудах предшественников [128-137]. Данные проблемы не нашли решения в полной мере. Известно из работ других авторов [128-137] – температура ОВ может изменяться в широких пределах, соответственно меняется его геометрические параметры, например длина. Изменение длины приводит к изменению параметра преломления  $\Delta n$ , это приводит к изменению фазы движения луча по сердцевине ОВ. Между физическими параметрами фазы распространения луча и показателем преломления имеется взаимная связь, которая влияет на поляризацию. Для измерительной системы это вызовет сбой в настройке или, можно сказать, смещение нуля на шкале измерения, что будет ошибкой в измерениях. Показания на шкале прибора будут изменяться, но в реальности изменений нагрузки на фундамент не будет. Можно найти информацию, что многомодовое волокно менее чувствительное к изменению температуры, но, учитывая значительные потери и ограниченность дистанции в 500 метров, оно исключается из данной работы, так как протяженность измерительных каналов будет более одного километра [128-137]. Для контроля протяженных объектов и железобетонных конструкций будет использовано одномодовое ОВ стандарта G.652. Это потребует разработки аппаратно-программного комплекса, использующего алгоритмы искусственного интеллекта для отсеивания помех и корректировки значения  $\Delta\varphi_n$ . В случае изменения температуры окружающей среды даже на  $1^\circ\text{C}$  произойдет нарушение работы системы контроля, так как это вызовет изменения  $\Delta n$  и  $\Delta\varphi$ .

Как сказано ранее, на изменение параметров световой волны влияние оказывают температура и микроизгиб. Микроизгиб возникает при механической нагрузке. Он вызывает дополнительные потери  $A$ , также меняется показатель преломления  $\Delta n$ , что, как сказано ранее, изменяет фазу распространения световой волны, что полностью совпадает с утверждением других ученых [136-138]. Далее найдем взаимосвязь между вышеперечисленными параметрами, например, если рассмотреть протяженный ВОД, используем параметр дополнительных потерь, так как данный параметр будет использован в будущем [136-138]:

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{1}{A \left( \frac{dA}{dT} \right)_{k\Delta T}} + \frac{\delta A}{A}, \quad (6)$$

где  $A$  – значение потери оптической мощности при механической нагрузке на ОВ.

$$\frac{1}{A} \cdot \left( \frac{dA}{dT} \right).$$

Это математическая формула необходима для связи оптических потерь и параметров внешней температуры воздуха вокруг ОВ. Одна половина формулы (6) выражает зависимость оптических потерь и микроизгибе ОВ. Во второй части



формулы выражено изменение дополнительных потерь  $A$  с учетом возникновения эффекта фотоупругости  $\delta A/A$  при механической деформации ОВ.

Следующим этапом будет вывод математической зависимости изменения значения температуры и коэффициента преломления, который изменяется при приложении механической силы на ОВ. Механическое воздействие на ОВ приводит микроизгибу. Также нужно понимать, что подвергаются деформации оболочка и сердцевина ОВ, что вызывает изменение коэффициента преломления. При механическом воздействии обязательно изменяются показатели преломления ОВ. При механическом воздействии возникают два вида изгиба: это микроизгиб и макроизгиб. Макроизгиб из рассмотрения исключается, так как ему свойственны большой радиус изгиба и это случай, характерный для телекоммуникационных оптических кабелей, но не для амплитудных ВОД, а вот микроизгиб – это типичный случай для ВОД, так как их принцип действия основан на данном явлении. Можно математически выразить зависимость изменения преломления и температуры, используя сведения из [136-138], но внесем незначительное дополнение для учета когерентности источника излучения:

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{1}{n} \left( \frac{\partial n}{\partial T} \right) p \Delta T \beta + \frac{\delta n}{n}, \quad (7)$$

$\beta$  – показатель когерентности лазера при идеальном условии он равен 1, при реальных более 1.

Первая часть выражения (7) описывает изменение показателя преломления ОВ при изменении температуры, а вторая часть формулы описывает изменение параметров микроизгиба при возникновении эффекта фотоупругости, как отмечено ранее, микроизгиб возникает при механической деформации ОВ. В формулу введен показатель когерентности лазера  $\beta$ , это достаточно важный показатель, так как некогерентная работа источника излучения вызовет сбой в работе измерителя и повлияет на точность. Как указано в [136-138], механическое воздействие вызывает эффект фотоупругости, при этом коэффициент преломления  $\delta n$  между оболочкой и сердцевиной изменяется. Используя коэффициент Поккельса  $p_{ij}$  можно определить  $\delta n$ :

$$\delta n = -\frac{n^2}{2} (p_{11} \varepsilon_1 + p_{21} \varepsilon_2 + p_{12} \varepsilon_z). \quad (8)$$

Через  $\nu$  выражается отношение коэффициента Пуассона.

Используя формулы (9) и (10), запишем  $\delta n$  в новом варианте:

$$\delta n = -\frac{n^3}{2} (p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})) \varepsilon_z. \quad (9)$$

Показатель преломления  $\delta n = 9,6 \cdot 10^{-4}$  при условии микроизгиба и деформации ОВ составит не менее 0,3%.

Если механического воздействия на ОВ нет и не протекает его деформация, тогда:

$$\frac{\Delta n}{n} = 0,68 \cdot 10^{-5} \Delta T \beta, \quad (10)$$

Используя информацию из источника [136-138], а также частично опубликованы статьях [156-160], можно сделать вывод, что чувствительность фотопластины и его динамический диапазон, а также другие оптические параметры источника излучения напрямую влияют на параметры чувствительности ВОД. При помощи известного выражения (11) можно установить границы динамического диапазона измерений, который связан с параметрами обратного оптического рассеяния. Оптическое рассеяние формируется при механической нагрузке на ОВ. При этом можно установить расстояние от фотоприемника до точки приложения механической нагрузки, так возможно вычислить время входа прямого и обратного луча.

$$\Xi > \xi_T + \alpha_1 \cdot l, \quad (11)$$

Расчёт динамического диапазона протяжённого ВОД:

$$W = W_0 - n \cdot \alpha_{oc} - 2 \cdot L \cdot \alpha_1 - \xi, \quad (12)$$

$$W_0 = \frac{P_{и}}{P_{пор}},$$

Выражение для расчета динамического диапазона протяжённого ВОД имеет вид:

$$W = W_0 - n \cdot \alpha_{oc} - 2 \cdot L_{\Sigma} \cdot \alpha_1 - \xi_T. \quad (13)$$

где  $L_{\Sigma}$  – общая длина волоконно-оптического кабеля измерительного преобразователя;

$\xi_T$  – потери на отражение на выходном торце последней секции измерительного преобразователя [136, 137].

Далее рассмотрим дифференциальное уравнение для расчета распределения интенсивности (плотности оптического сигнала) по радиальной компоненте (толщине) слоя оптоволокна, строим в виде

$$\frac{dI}{dr} + AI = 0. \quad (14)$$

В (14) константа имеет смысл релаксационного параметра константа с размерностью, соответствующей волновому вектору

$$A \approx \frac{1}{L},$$

где  $L$  – линейный параметр системы.

С учетом граничного условия  $I(0) = I_0 = I_{max}$ , из (1) имеем

$$I(r) = I_0 e^{-Ar}. \quad (15)$$

Моделируем рабочий элемент рассматриваемой оптоэлектронной системы как трехслойный оптоволоконный проводник светового сигнала.

В первом слое (ядре) оптоволоконного кабеля, ввиду условия  $Ar \gg 1$ , расчет интенсивности оптического сигнала проводим приближенно  $I = \frac{\Phi}{S}$ , где  $\Phi$ –

мощность входного оптического сигнала [Вт];  $S = \pi r^2$  – площадь поперечного сечения «ядра» кабеля, [мкм]. Тогда в области  $0 \leq r \leq r_1$  принимаем  $I_0 = \frac{\Phi}{S}$ . Во втором слое (оболочке) оптоволоконного кабеля, в области  $r_1 \leq r \leq r_2$ , дифференциальное уравнение для расчета распределения интенсивности оптического сигнала

$$\frac{dI_1}{dr} + BI_1 = AI_0, \quad (16)$$

с учетом граничного условия  $I_1(r_1) = I_0$ , принимает вид

$$I_1 = I_0 \left[ \left(1 - \frac{A}{B}\right) e^{-B(r-r_1)} + \frac{A}{B} \right]. \quad (17)$$

Уравнение интенсивности можно записать в форме

$$I_1(r) = I_0 \left[ e^{-B(r-r_1)} + \frac{A}{B} (1 - e^{-B(r-r_1)}) \right]. \quad (18)$$

В третьем слое (воздухе), в области  $r \geq r_2$ , дифференциальное уравнение распределения интенсивности оптического сигнала

$$\frac{dI_2}{dr} + DI_2 = 0, \quad (19)$$

с учетом граничного условия  $I_2(r_2) = I_1(r_2)$ , имеет решение

$$I_2 = I_1(r_2) e^{-D(r-r_2)}. \quad (20)$$

В (7)  $I_1(r_2) = I_0 \left[ e^{-B(r_2-r_1)} + \frac{A}{B} (1 - e^{-B(r_2-r_1)}) \right]$ .

Константы в решениях (6), (7)

$$B \approx k_1, [\text{м}^{-1}] \Rightarrow B \approx \frac{2\pi}{\lambda_1},$$

$$D \approx k_2, [\text{м}^{-1}] \Rightarrow D \approx \frac{2\pi}{\lambda_2},$$

$$A \ll B,$$

$$D > B.$$

Результатом численного решения математической модели является график зависимости изменения параметра интенсивности световой волны, распространяющейся по сердцевине ОВ в зависимости от расстояния от центра ОВ (рисунок 38).

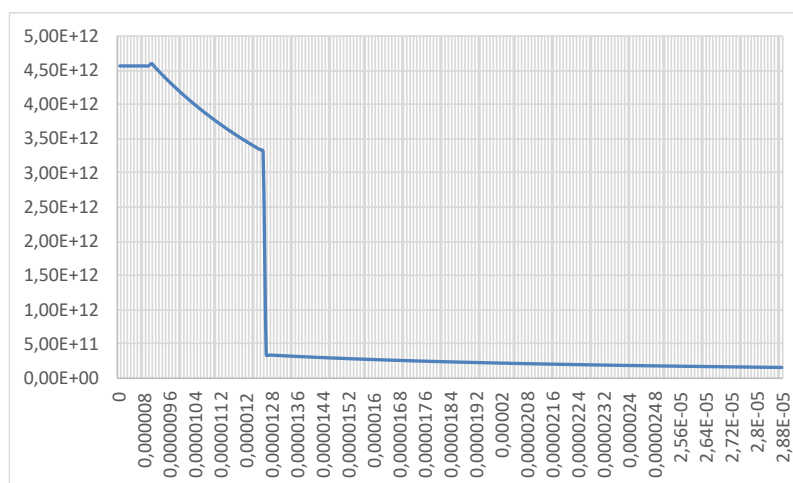


Рисунок 38 – Изменение параметра интенсивности световой волны распространяющейся по сердцевине ОВ в зависимости от расстояния от центра ОВ.

## 2.4 Физико-математическая модель оптико-механических процессов в оптическом волокне при его деформации

В данном разделе разрабатывается теоретическая основа нелинейных свойств физико-математической модели оптических процессов в ОВ. Данные процессы связаны с распространением световой волны по сердцевине ОВ с учетом всех деформаций ОВ в широком диапазоне параметров волн (интенсивность, частота волны и др.) и температур [136-138].

Основой являются известные законы геометрической и волновой оптики, раздела физики, а также феноменологической теории оптико-электрических процессов, связанных со взаимодействием световой волны с ОВ. Все теоретические суждения, представленные далее, имеют ограничения в рамках законов электродинамики сплошной среды и классической волновой теории света [128-138].

Известно, что электромагнитное поле световой волны, распространяющейся в вакууме (воздухе), выражается следующим образом

$$k_0 = \frac{\omega}{c}, k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}, \omega = (\vec{k}_0 \vec{c}) \equiv k_0 c.$$

Данные выражения решаются при помощи обобщенного классического волнового уравнения Даламбера:

$$\vec{\nabla}^2 \vec{u} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = 0 \text{ в виде } \vec{u}_g = \vec{u}_{0g} \cdot \exp(i\omega t - (\vec{k}_0 \vec{r})).$$

В ОВ, при значениях волновых параметров  $k = \frac{\omega}{v}$ ,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\omega = (\vec{k} \vec{v}) \equiv kv$ , с показателем преломления ОВ

$$n = \frac{c}{v} = \frac{k}{k_0} \geq 1, n = \sqrt{\epsilon\mu}, c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}.$$

Волновое уравнение Даламбера представлено ниже:

$$\vec{\nabla}^2 \vec{u} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = 0, \text{ имеют вид } \vec{u} = \vec{u}_0 \cdot \exp(i\omega t - (\vec{k} \vec{r})),$$

где  $\frac{1}{v} = \frac{k}{k_0 c} = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon \mu}, v = \frac{k_0 c}{k} = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon \mu}.$

Фазу электромагнитной волны оптического диапазона, которая падает под определенным углом  $\theta$  на поверхность ОВ со стороны его торца, установим следующей зависимостью  $\phi_0 = (\vec{k}_0 \vec{r}) = \frac{\omega}{c^2} (\vec{c} \vec{r})$ , при этом преломление волны внутри ОВ запишем как

$$\phi = (\vec{k} \vec{r}) = \frac{\omega}{v^2} (\vec{v} \vec{r}).$$

Возникнет разность фаз этих волн

$$\phi - \phi_0 = \frac{\omega}{c^2} (n \cos \psi - 1) (\vec{c} \vec{r}).$$

Угол отклонения преломленной волны от первоначального направления падающей на поверхность ОВ

$$\psi = \theta - \gamma.$$

Используя выражение  $\cos\psi = \frac{\cos\theta \sqrt{n^2 - \sin^2\theta} + \sin^2\theta}{n}$ , выведем окончательное уравнение

$$\phi - \phi_0 = \frac{\omega}{c} (\cos\theta \sqrt{n^2 - \sin^2\theta} + \sin^2\theta - 1) (\vec{\tau}_0 \vec{r}). \quad (21)$$

В (21)  $\vec{\tau}_0$  принято с учетом направления распространения скорости  $\vec{c}$ , можно выразить волновой вектор оптического излучения  $k_0 = \frac{\omega}{c}$ , которая падает на торец оптического волокна, при этом имеется условия, что  $\vec{c} = c\vec{\tau}_0$

$$\phi - \phi_0 = \frac{\omega}{c} (n\cos\psi - 1) (\vec{\tau}_0 \vec{r}),$$

где использовано тождество  $\cos\psi = \frac{\cos\theta \sqrt{n^2 - \sin^2\theta} + \sin^2\theta}{n}$ .

Выполним численный расчет скалярного произведения  $(\vec{\tau}_0 \vec{r}) = r\cos\alpha$  угол  $\alpha$  изменяется в пределах от  $-\pi$  до  $\pi$ , примем, что  $r$  будет с расстоянием от источника лазерного излучения, луч которого падает на торец ОВ, при этом ОВ помещено в начало системы координат до фиксированной точки пространства.

Определим разность хода преломленного и падающего лучей:

$$\delta x = dtg\gamma = \frac{d\sin\theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta}},$$

Тогда разность фаз между падающей и преломленной волной принимает вид

$$\phi - \phi_0 = \frac{\omega}{c} \frac{d\sin\theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}. \quad (22)$$

При комбинации выражений (21), (22) и принятых обозначениях  $u = \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}$  составим уравнение, которое позволит рассчитать показатель преломления ОВ [128-138]

$$u^2 - u \cos\theta - \frac{d\,tg\theta}{(\vec{\tau}_0 \vec{r})} = 0, \quad (23)$$

$$u_{1,2} = \frac{\cos\theta \mp \sqrt{\cos^2\theta + \frac{4\,d\,tg\theta}{r\cos\alpha}}}{2}.$$

В зависимости от результата анализа полученных числовых значений вещественных корней уравнения (23) и конечного значения  $n$  будет определяться только одним из значений  $u_{1,2}$ .

Рассмотрим процессы взаимодействия электромагнитной волны оптического диапазона с ОВ

$$\vec{u} = \vec{u}_0 \cdot \exp(i\omega t - (\vec{k}\vec{r})) = \vec{u}_\omega(t) \vec{u}_k(\vec{r}).$$

ОВ можно классифицировать как диэлектрик

$$\vec{\nabla}^2 \vec{u}_k + k^2 \vec{u}_k = 0.$$

Переходим к безразмерной переменной  $\xi = \frac{\vec{r}}{a}$ ,

$$\frac{\partial^2 \vec{u}_k}{\partial \xi^2} + (\vec{k}a)^2 \vec{u}_k = 0.$$

Нужно принять условие, что возникающие оптические эффекты протекают в пространственной области, по размерам сопоставим с постоянной решетки  $a$ , в широких диапазонах длины волны оптического спектра. Учитывая оптический диапазон

$$(\vec{k}\vec{a}) \approx \frac{2\pi a}{\lambda} \ll 1 \text{ и соответственно } (\vec{k}\vec{r}) = \frac{2\pi(\vec{v}\vec{r})}{\lambda v} = \frac{2\pi r}{\lambda} \cos\alpha \ll 1,$$

выразим электрическую и магнитную составляющую световой волны

$$\begin{aligned}\vec{E} &\cong \vec{E}_0 \cdot \exp(i\omega t), \\ \vec{H} &\cong \vec{H}_0 \cdot \exp(i\omega t).\end{aligned}$$

Обусловленная электрическим полем плотность тока смещения может быть выражена следующим выражением:

$$\vec{j}(t) = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = i\omega \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \vec{E} \left( t \frac{\partial \vec{P}_{rp}(t)}{\partial t} \right),$$

Вычисляем объемную плотность мощности электрического поля электромагнитной волны в оптоволокне, в виде используя сведения из [128-138], и составим выражение:

$$P_{\partial vt} = \langle \text{Re}(\vec{E}(t) \times \text{Im}(\vec{j}(t))) \rangle \approx \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \vec{E}_0^2. \quad (24)$$

Объемную плотность мощности магнитного поля волны оптического диапазона, которая распространяется в немагнитном материале ОВ, определим с использованием приближенных равенств

$$\vec{H} = \vec{H}_0 \cdot \exp(i\omega t - \vec{k}\vec{r}) \approx \vec{H}_0 \cdot \exp(i\omega t), \quad \vec{B}(\vec{t}_0).$$

Окончательный вид уравнения, следующий:

$$P_{mvt} = \langle \text{Re}[\vec{H}(t)] \text{Im} \left[ \frac{\partial \vec{B}(t)}{\partial t} \right] \rangle \approx \frac{1}{2} \omega \mu_0 \vec{H}_0^2. \quad (25)$$

С учетом тождества установим объемную плотность мощности электромагнитного поля оптической волны

$$\mu_0 \vec{H}_0^2 = \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \vec{E}_0^2, \text{ из выражения } P_{vt} = P_{\partial vt} + P_{mvt} \approx \omega \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \vec{E}_0^2.$$

Рассмотрим интенсивность электромагнитной волны

$$I = \langle \text{Re}[|\vec{E}(t)|] \text{Im}[|\vec{H}(t)|] \rangle \approx \frac{1}{2} |\vec{E}_0| |\vec{H}_0| \text{ в виде } I \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty}{\mu_0}} \vec{E}_0^2.$$

В результате формируется параметр, связанный с распределением объемной плотности электромагнитного поля оптического излучения, при этом учитывается параметр угла  $\alpha_0$ , данный угол образуется путем пересечения вектора электромагнитной волны и нормали к поверхности фотоприемника, так как на выходе из ОВ устанавливается фотоприемник, который контролирует все изменения интенсивности светового пятна. Световое пятно можно отнести к известному пятну Пуассона [128-138]. При механическом воздействии на ОВ параметры пятна изменяются и в первую очередь меняется интенсивность.

$$P_{vt}(\zeta_0; \omega; T; d; \theta; \alpha_0) = 2\omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon_\infty} I \approx 2\omega \frac{n_\infty(\zeta_0; \omega; T; d; \theta; \alpha_0)}{c} I. \quad (26)$$

Расчетную величину  $n_{\infty}(\zeta_0; \omega; T; d; \theta; \alpha_0)$  выполним при помощи выражения (23).  $\zeta_0$  является параметром, представляющим множество различных характеристических молекулярных параметров активации релаксаторов на ионно-молекулярных химических связях: частоты собственных колебаний ионов вблизи положения равновесия (локализованных в узлах кристаллической решетки); ширина потенциального барьера для ионов и др.) и параметров структуры (зависящих от физико-химических свойств и типа и геометрии кристаллической структуры оптоволоконного образца [135-138].

Показатель преломления вещества ОВ представлен как

$$n_{\infty}(\zeta_0; \omega; T; d; \theta; \alpha_0).$$

Используются методы кинетической теории и электродинамики сплошной среды, которые дают закономерности релаксационных процессов, связанных со взаимодействием электрического и магнитного полей световой волны со структурными элементами кристаллической решетки. На показатель преломления влияют геометрические характеристики кристаллической структуры ОВ и оптико-геометрические параметры, которыми являются угол падения луча на поверхность материала  $\theta$  и угол  $\alpha_0$  между волновым вектором, преломленные в ОВ, и вектором нормали к поверхности фотоприемника. На показатель преломления вещества ОВ оказывают влияние внешние полевые воздействия, например частота  $\omega$  и амплитуда  $A$  волны и интенсивность световой волны.

Произведем усреднение по углам  $\alpha_0$  функция (27)

$$\langle P_{Vt}(\zeta_0; \omega; T; d; \theta; \alpha_0) \rangle = \frac{\omega}{c\pi} \int_0^{\pi} I(\alpha_0) n_{\infty}(\zeta_0; \omega; T; d; \theta; \alpha_0) d\alpha_0. \quad (27)$$

Используем нулевое приближение теории возмущений по безразмерным малым параметрам деформаций  $\frac{\delta d}{d}$ ,  $\frac{\delta(\vec{\tau}_0 \vec{r})}{(\vec{\tau}_0 \vec{r})_0} = \frac{(\delta \alpha)^2}{2}$  в выражении (22). Это позволит выполнить теоретический расчет значения измеряемой объемной плотности мощности электромагнитного поля волны, которая падает на поверхность фотоприемника и анализируется.

Рассмотрим влияние условий распространения оптического сигнала на его мощность. Распределение интенсивности световой волны по углам  $\alpha$  между вектором нормали к поверхности фотоприемника. Фотоприемник можно представить как круглый светочувствительный элемент или мембрану с радиусом  $R$ , которая располагается перпендикулярно по отношению к оси ОВ. У ОВ имеется внутренний радиус сердцевины и внешний радиус оболочки. ОВ имеет форму цилиндра с  $r_1$  и  $r_2$ .

$$I(\alpha_0) = I_0(r) \times \left( \frac{\sin \alpha_0}{\alpha_0} \right)^2. \quad (28)$$

По направлению нормали к фотоприемнику достигается максимальная интенсивность  $I_0(r)$ . Согласно закону экспоненциального распределения интенсивность электромагнитной волны по радиальной компоненте выражается как

$$I_{00}(r) = I_0(0) \times \frac{1}{Ar_1}.$$

В итоге получаем уравнение

$$I_{02}(r) = I_0(0) \times \left[ \exp(-Lr) + \exp(-Br_2) + \frac{1}{Ar_1} - \exp(-Br_1) - \exp(-Lr_2) \right].$$

$$I_0(0) = I \frac{W}{S \exp},$$

где  $W$  – мощность светового потока (определяемая характеристиками источника излучения на данной длине волны),

$$S = \pi r_1^2; A \approx 1,25 \cdot \frac{1}{r_1}; B \approx \sqrt{\frac{n_{\infty 1}}{n_{\infty 0}}} \cdot \frac{1}{r_1}; L \approx \sqrt{\frac{1}{n_{\infty 1}}} \cdot \frac{1}{r_2};$$

$n_{\infty 0} n_{\infty 1}$  – показатель преломления материала внутреннего (центрального), внешнего слоя оптоволоконного элемента.

Используя (27) и (28) получим

$$\langle P_{Vt}(\zeta_0; \omega; T; d; \theta; \alpha_0) \rangle = 2 \frac{\omega I_0(r)}{c \pi} \int_0^\pi \left( \frac{\sin \alpha_0}{\alpha_0} \right)^2 n_{\infty}(\zeta_0; \omega; T; d; \theta; \alpha_0) d\alpha_0. \quad (29)$$

С учетом (29) для областей ОВ:

$$\text{В области } 0 \leq r \leq r_1, \text{ когда } I_{00}(r) = I_0(0) \times \frac{1}{Ar_1},$$

имеем

$$\begin{aligned} \langle P_{Vt}(\zeta_{00}; \omega; T; d; \theta; \alpha_0) \rangle &= \\ &= 2 \frac{\omega}{c \pi} \times I_{00}(r) \int_0^\pi \left( \frac{\sin \alpha_0}{\alpha_0} \right)^2 n_{\infty 0}(\zeta_{00}; \omega; T; d; \theta; \alpha_0) d\alpha_0. \end{aligned} \quad (29.1)$$

В области  $r_1 \leq r \leq r_2$ , когда

$$I_{01}(r) = I_0(0) \times \left( \exp(-Br) + \frac{1}{Ar_1} - \exp(-Br_1) \right), \text{ имеем}$$

$$\begin{aligned} \langle P_{Vt}(\zeta_{01}; \omega; T; d; \theta; \alpha_0) \rangle &= \\ &= 2 \frac{\omega}{c \pi} \times I_{01}(r) \int_0^\pi \left( \frac{\sin \alpha_0}{\alpha_0} \right)^2 n_{\infty 1}(\zeta_{01}; \omega; T; d; \theta; \alpha_0) d\alpha_0. \end{aligned} \quad (29.2)$$

В области  $r_2 \leq r < \infty$ ,

$$I_{02}(r) = I_0(0) \times \left[ \exp(-Lr) + \exp(-Br_2) + \frac{1}{Ar_1} - \exp(-Br_1) - \exp(-Lr_2) \right], \text{ имеем}$$

$$\langle P_{Vt}(\zeta_{02}; \omega; T; \rho; \alpha_0) \rangle = 2 \frac{\omega}{c \pi} \times I_{02}(r) \int_0^\pi \left( \frac{\sin \alpha_0}{\alpha_0} \right)^2 d\alpha_0. \quad (29.3)$$

Рассмотрим частный случай, когда ОВ находится в горизонтальной монолитной железобетонной балке с уточненными нагрузками, при этом воздействие осуществлялось в центре балки. Выполним математическое моделирование процесса неупругой деформации в горизонтальной монолитной железобетонной балке с учетом закона Гука, точность расчета до члена четвертой степени. Произведем разложение потенциальной энергии напряженно-деформированного тела балки по смещениям

$$U(x) \approx \frac{kx^2}{2} + \frac{\beta x^4}{4}. \quad (30)$$

выражении (30) использованы уже известные основы теории упругости, а именно коэффициенты

$$\beta = \frac{k\beta_V}{l^2}, k = \frac{ES}{l}, \beta = \frac{ES\beta_V}{l^3} = \frac{k\beta_V}{l^2},$$



где  $E$  – модуль Юнга материала балки.

Коэффициент относительного объемного расширения равен  $\beta_V = \mu \varepsilon_{\parallel}^2$ ,

где  $\varepsilon_{\parallel} = \frac{\Delta l}{l}$  – относительное продольное удлинение (или сжатие),

$\mu = \frac{\beta_V}{\varepsilon_{\parallel}^2}$  – коэффициент Пуассона, рассчитываемый с учетом параметра

$$\beta_V = \frac{\Delta V}{V}.$$

Принимая  $\beta_V = \frac{\Delta S \Delta l}{S l} = \varepsilon_{\perp} \varepsilon_{\parallel}$ ,

где  $\varepsilon_{\perp} = \frac{\Delta S}{S}$  – относительное поперечное расширение (удлинение или сжатие),

получим  $\mu = \frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\parallel}}$ .

На основании выражения  $\varepsilon_{\parallel} = \frac{\Delta l}{l}$ ,  $\varepsilon_{\perp} = \frac{\Delta S}{S}$

запишем  $\mu = \frac{l \Delta S}{S \Delta l}$ ,

Поперечное сечение ОВ является круглым.

В зоне малых отклонений от закона Гука, принимая  $\beta l^2 = k \beta_V \ll k \varepsilon_{\parallel}^2$ , или  $\beta_V \ll \varepsilon_{\parallel}^2$ , с учетом  $\beta_V = \varepsilon_{\perp} \varepsilon_{\parallel}$ , имеем  $\varepsilon_{\perp} \ll \varepsilon_{\parallel}$ ,  $\frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\parallel}} \ll 1$ , равносильно  $\mu \ll 1$ , что

позволяет перейти к приближению  $U(x) \approx \frac{kx_{\parallel}^2}{2}$  и, на этой основе, из условия предельного смещения  $mg \Delta l = \frac{k(\Delta l)^2}{2}$  получим абсолютное продольное удлинение (или сжатие)

$$\Delta l = \frac{2mg}{k} = \frac{2mgl}{ES}, \quad (31)$$

где  $S = \pi r_1^2$  – площадь поперечного сечения недеформированной балки массой  $m$ .

Используя математические выражения (30) в (31), получим

$$\mu = ES \frac{\left| \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1 \right|}{2mg} = \frac{E \pi r_1^2 \left| \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1 \right|}{2mg}. \quad (32)$$

Коэффициента Пуассона (32) может быть различный для случаев продольного расширения  $r_2 > r_1$ ,

$$r_2 = r_1 \sqrt{1 + \frac{2mg\mu}{E \pi r_1^2}} \quad (33)$$

или сжатия  $r_2 < r_1$ , когда

$$r_2 = r_1 \sqrt{1 - \frac{2mg\mu}{E \pi r_1^2}}. \quad (34)$$

Окончательным выражением для абсолютного и относительного поперечного удлинения и сжатия будет следующая обобщенная формула

$$r_2 - r_1 = r_1 \left( \sqrt{1 + \frac{2mg\mu}{E \pi r_1^2}} - 1 \right), \quad \frac{r_2 - r_1}{r_1} = \sqrt{1 + \frac{2mg\mu}{E \pi r_1^2}} - 1, \quad (35)$$

$$r_2 - r_1 = r_1 \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2mg\mu}{E\pi r_1^2}} \right), \frac{r_2 - r_1}{r_1} = 1 - \sqrt{1 - \frac{2mg\mu}{E\pi r_1^2}} \quad (36)$$

Распределение объемной плотности мощности электромагнитного поля волны в ОВ, при условии, что в расположенном вдоль оси горизонтальной деформируемой балки имеется угол  $\alpha_0$ , который формируется при падении световой волны на поверхность фотоприемника, установленного на торце ОВ, подвергающегося деформации, при этом будет потеря оптической мощности передаваемой по волокну, так как формируется микроизгиб и возникают дополнительные потери. Деформацию балки можно контролировать по потерям мощности. Окончательные выражения для контроля параметров оптической волны сгенерированной лазерном источником излучения, которое помещено в тело горизонтальной или вертикальной монолитной железобетонной балки с уточненными нагрузками можно представить двумя выражениями.

При отсутствии деформации балки и ОВ

$$\begin{aligned} P_{Vt} \left( \zeta_0^{(0)}; \omega; T; l_1; r_1; \theta; \alpha_0 \right) = \\ = 2 \frac{\omega I_0(r)}{c\pi} \int_0^\pi \left( \frac{\sin \alpha_0}{\alpha_0} \right)^2 n_\infty \left( \zeta_0^{(0)}; \omega; T; l_1; r_1; \theta; \alpha_0 \right) d\alpha_0. \end{aligned} \quad (37)$$

При деформации балки и ОВ

$$\begin{aligned} P_{Vt} \left( \zeta_0^{(1)}; \omega; T; l_2; r_2; \theta; \alpha_0 \right) = \\ = 2 \frac{\omega I_0(r)}{c\pi} \int_0^\pi \left( \frac{\sin \alpha_0}{\alpha_0} \right)^2 n_\infty \left( \zeta_0^{(1)}; \omega; T; l_2; r_2; \theta; \alpha_0 \right) d\alpha_0. \end{aligned} \quad (38)$$

Представленные математические выражения дают полное описание всех процессов, связанных с деформацией ОВ и оптической волны сгенерированной лазерном источником излучения, проходящей по сердцевине ОВ, которые можно зафиксировать и преобразовать в численные значения измеряемой величины.

## 2.5 Компьютерное моделирование механических нагрузок на оптическое волокно при его растяжении и микроизгибе

Для компьютерного моделирования использовалась информация, полученная из данных статей [139, 140]. В конце 70-х годов 20 века исследователи фирм «Bell-Labs» и «Corning» разработали метод модифицированного химического парофазного осаждения (MCVD) [141, 142], что позволило выйти на потери до 0,2 дБ/км для длины волны 1550 nm. В 2002 году удалось довести значение потерь до 0,148 дБ/км [141]. Эти события стали началом развития промышленного использования волоконно-оптической техники и перехода систем телекоммуникации на ОВ [141]. Был предложен стандарт для ОВ и его диаметр установили равным 125 мкм. В данной работе уделено внимание важной проблеме – сроку службы ОВ. Так как ВОД находится в теле железобетонной балки и подвергается деформации, то необходимо примерно оценить срок службы ВОД. Необходимо понять, как изменится срок службы ВОД при удлинении ОВ, когда балка будет расширяться или сжиматься, а также если образуется трещина и балка

будет разорвана на две части, то что будет с ОВ. ОВ достаточно прочное и при отсутствии в его теле микротрещин имеет сопротивляемость на разрыв, аналогичную стальной нити одинаково диаметра. ОВ еще применяют для производства арматуры. Если ОВ имеет трещины, то его прочность снизится более, чем в 3 раза. ОВ требует защиты от влаги и загрязнений, для его защиты наносится внешнее покрытие из винила или других материалов. Разрабатываемый ВОД должен иметь ОВ с защитным покрытием. Защитное покрытие из акрилового лака увеличивает диаметр до 245 -248 мкм. Покрытие увеличивает прочность ОВ и защищает его от микротрещин [144, 145]. Анализ литературы [145-147] показал, что ведутся работы, связанные с повышением прочности ОВ и его покрытий, так как минимальный срок эксплуатации волоконно-оптического кабеля и ВОД, должен быть не менее 20-25 лет, а в идеале и 50. Технология производства ОВ уже известна и описана в [143]. Показатель преломления  $n_1 < n_2$  остаётся неизменным в течение всего срока эксплуатации, но он может меняться при механическом воздействии на ОВ, а также при изменении его температуры [148]. Имеется публикация, где рассмотрены вопросы влияния механических нагрузок на срок службы ОВ [149], статья является основой данного раздела. У ОВ есть важные характеристики, это прочность. Как известно, разрушение любого материала при действии нагрузки происходит при преодолении значения предела прочности самого материала, когда в его теле формируются критические значения механических напряжений и деформации. Нужно учитывать, что ВОД будет растягиваться и изгибаться при нагружении, которое вызовет разрушение балки, без учета микроизгиба ОВ. Моделирование было основано на данных, полученных экспериментальным путем в лабораторных условиях. Использован стандарт G 652 диаметром 125 мкм. Эксперименты с испытанием 50 образцов показали, что при растяжении отрезка ОВ длиной 1 м и скорости удлинения 20 мм/мин ОВ удлинялось на 7 % (72 мм), время испытаний составило 2 мин. Испытуемое ОВ разрушалось при нагрузке от 54 до 58 Н при удлинении более 7%. Заводские характеристики прочности ОВ несколько выше – в пределах 180 Н и относительном удлинении до 26%. Появилось некое расхождение теоретической и технической прочности ОВ, но использование совпало теории Гриффитса, позволяет объяснить этот феномен. Испытуемое ОВ содержало на поверхности значительное число микротрещин Гриффитса [147 – 149]. Микротрещины снижают прочность ОВ и сокращают его срок службы, поэтому о реальном сроке службы ОВ можно рассуждать только с определенной долей вероятности [149]. Трещины распределяются вдоль ОВ случайным образом, их можно частично ликвидировать нанесением защитного покрытия.

Результаты практических экспериментов были использованы при выполнении численного моделирования в программе ANSYS, результаты которого помогли построить график зависимости влияния нагрузки на прочность ОВ. Время эксплуатации ОВ определяется с определенной долей вероятности и использованием формулы Вейбулла. На рисунке 39 показано фото, на котором видна трещина на ОВ.

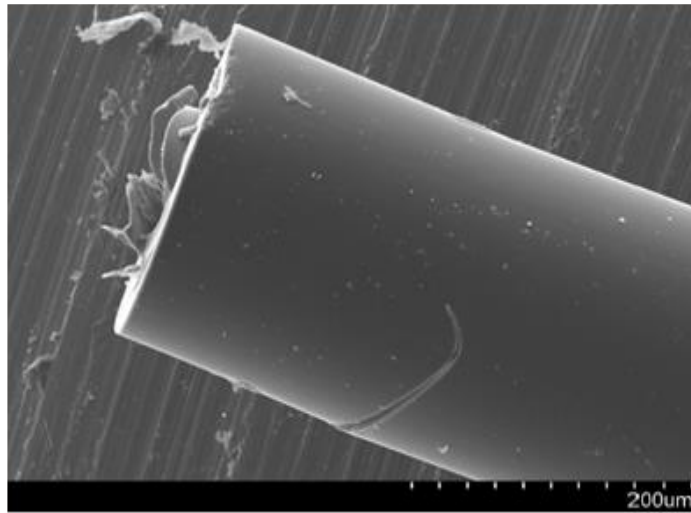


Рисунок 39 – Фото дефектов ОВ типа G652

Влияние дефектов на прочность ОВ может быть учтено только статистически. На рисунке 40 представлены результаты численного моделирования по определению прочности ОВ [149].

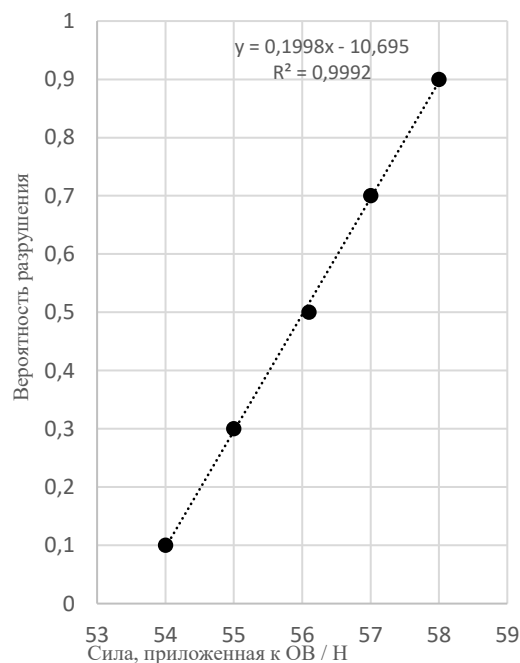


Рисунок 40 – Зависимость вероятности разрушения ОВ стандарта G652 при растяжении от приложенной силы [149]

Полученная картина визуализации НДС, сформулированная в ОВ при его растяжении вследствие приложения механической нагрузки, представлена на рисунке 41, ранее представленные результаты уже опубликованы в статье [149]. Для моделирования была использована программа ANSYS, которая позволяет всесторонне исследовать НДС, а также выполнить имитацию процесса трещин в случае достижения критического растяжения ОВ.

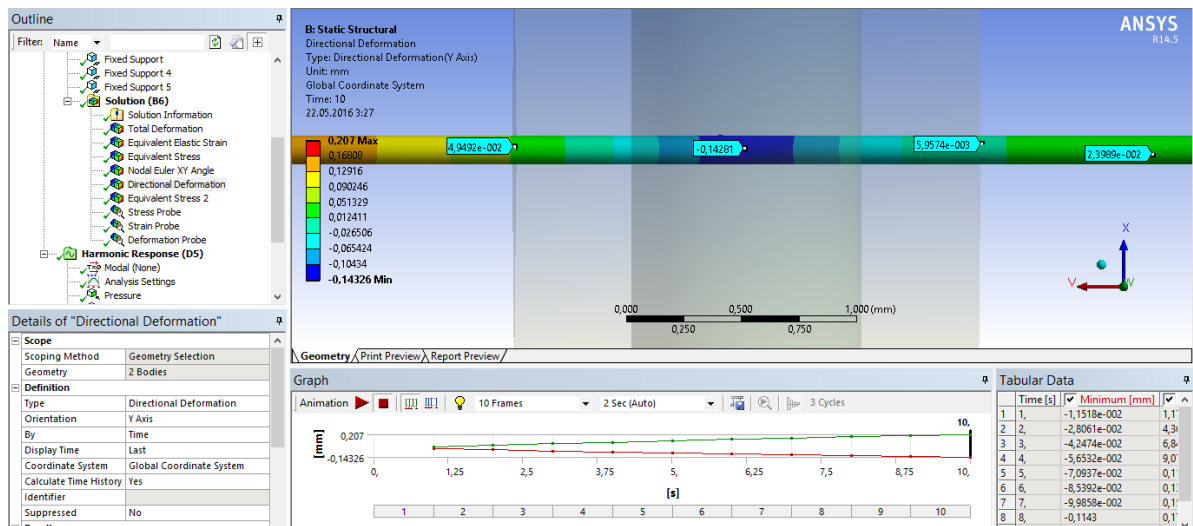
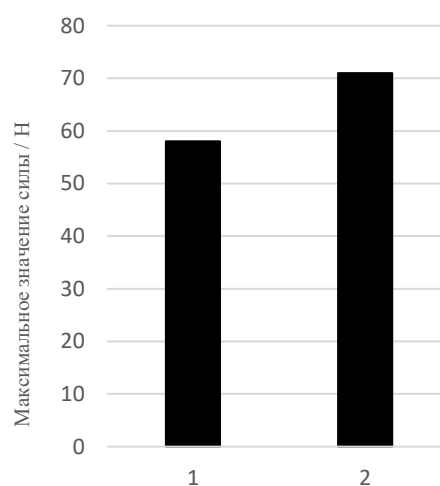


Рисунок 41 – Компьютерная модель ОВ типа G652 при растяжении

Относительное удлинение ОВ напрямую связано с параметрами НДС. Известно, что ОВ изготавливается из кварцевого стекла, его деформация подчиняется известному закону Гука и описывается выражением ( $\sigma = E \cdot \varepsilon$ ). НДС меняется в широком диапазоне значений от начального значения приложения нагрузки до момента разрушения ОВ. В процессе моделирования ОВ одним концом закреплялась к неподвижной поверхности, а другим концом растягивалась. Выполнено моделирование с учётом цикличности нагрузки, так как ВОД, находящийся в теле железобетонной балки, может неоднократно растягиваться и сжиматься, это приводит к формированию усталостных трещин в теле ОВ. При формировании трещин имеет значение амплитуда напряжений, а также длительность и количество циклов нагружения. Имеется расхождение в результатах моделирования и реальных экспериментов, при моделировании максимальной допустимой нагрузки при растяжении оно составило менее 15%. (рисунок 42).



1- данные, полученные экспериментальным путем; 2 – данные, полученные при моделировании

Рисунок 42 – Сравнение результатов

Можно отметить, что использование защитного полимерного покрытия незначительно влияет на увеличение прочности ОВ, на основании того, что модуль Юнга для полимерных покрытий будет значительно меньше модуля Юнга ОВ, но покрытие связывает трещины и сдерживает их развитие, а также защищает ОВ от влаги загрязнений. Использование защитного покрытия для ОВ обязательно, так как это позволит повысить надёжность ВОД. Покрытие способно повысить прочность ОВ в пределах 15%. Нужно рассмотреть применение металлического покрытия, например, легирование его титаном, для увеличения прочности ОВ ориентировочно в два раза, соответственно до 30 % легирование остановит деградацию и старение ОВ. Для обеспечения требуемого срока службы ОВ, а значит, и самого ВОД в пределах 20 лет необходимо, чтобы его относительное удлинение не превышало значение 0,8 % от его длины. Например, если ВОД имеет длину 1000 метров, то его удлинение не должно превышать 8 метров (рисунок 43).

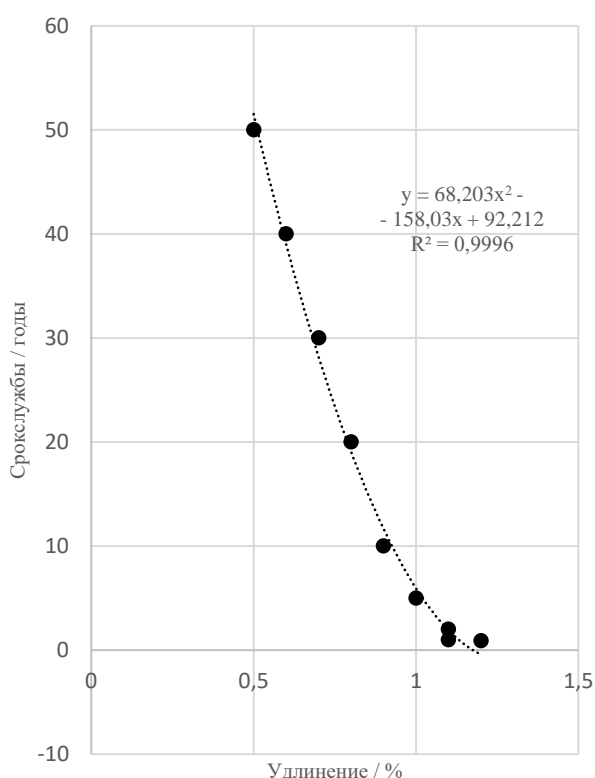
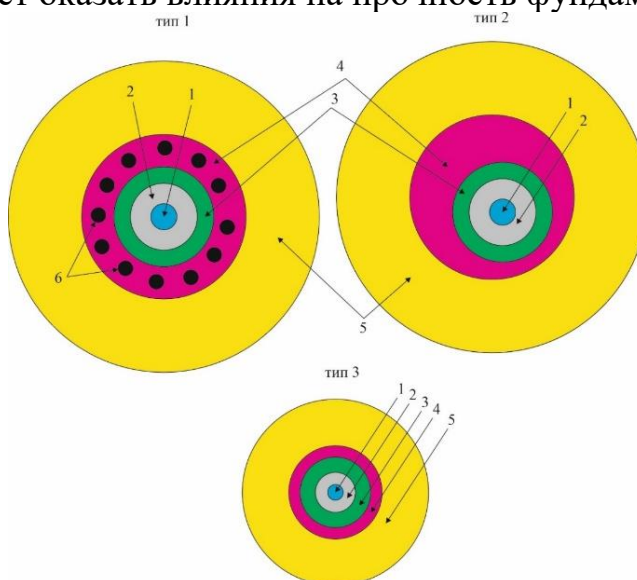


Рисунок 43 – Зависимость срока службы ОВ при его относительном удлинении

Учитывая вышесказанное, для повышения надежности ВОД принята следующая компоновка защитного покрытия ОВ. Защитное покрытие будет состоять из нескольких слоев, каждый из которых обеспечит защиту ОВ, находящегося в теле железобетонного фундамента. Так как есть опасность, что при разрушении фундамента из-за раскрытия трещин произойдет удлинение ОВ, возможно до критических значений 0,8 % от его длины, то есть необходимость усиления защитного слоя. Если разрушения фундамента не происходит, то удлинения ОВ мало значительны и не превышают значение 0,3 % от его длины, так как железобетонный фундамент не способен изменять свою длину в большем

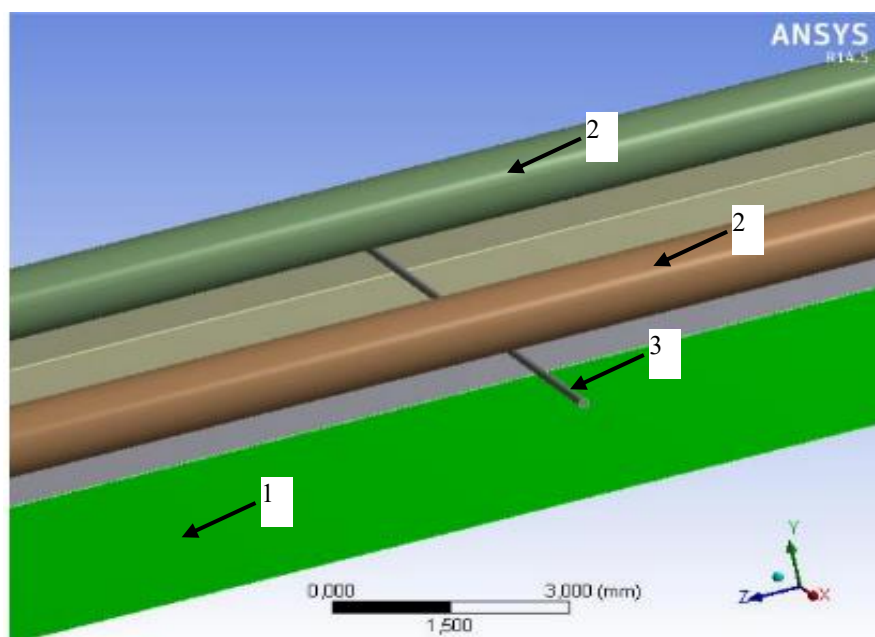
значении. Тогда ОВ будет служить достаточно долго, вероятно, в пределах 50 лет, так как его удлинение будет незначительным. Моделирование показало, что ОВ не может быть разрушено, а срок его службы снижен при отсутствии полного разрушения фундамента и раскрытия нескольких десятков трещин. Данная ситуация маловероятна в условиях эксплуатации. ВОД способен на ранних этапах определить изменения механических напряжений и деформаций и точно установить место формирования трещин. Предлагается три варианта защитного покрытия ОВ, каждое выбирается согласно условиям эксплуатации ВОД, а также как будет заливаться раствор в опалубку будущего фундамента. Нужно понимать, что обычное волокно в защитной виниловой оболочке будет повреждено и, вероятно, разорвано. Конечно, необходимо закладывать резервные ОВ для большей надежности ВОД. Рекомендуется дополнительно от 1 до 4 резервных ОВ помимо основного ОВ. На рисунке 44 представлены 3 типа рекомендуемого защитного покрытия для ОВ, которое будет помещено в тело железобетонного фундамента. Диаметр ОВ в защитном покрытии может быть от 0,9 до 3 мм, столь малый диаметр не может оказать влияния на прочность фундамента.



- 1 – сердцевина ОВ диаметром 9 мкм, 2 – оболочка ОВ диаметром 125 мкм,
- 3 – защитное акриловое или виниловое или легированное покрытие диаметром 242-250 мкм, 4 – буфер (гель или воздух) толщиной 100 мкм или более, 5 – силиконовая или пластиковая оболочка диаметром от 0,9 до 3 мм,
- 6 – армировка (кевларовые или синтетические нити)

Рисунок 44 – Рекомендуемые 3 варианта защитного покрытия для ОВ, которое будет помещено в тело железобетонного фундамента

На рисунке 45 показана компьютерная модель ВОД, созданная в программе ANSYS. ОВ размещено в теле балки и на него оказывается механическое воздействие двумя арматурными стержнями на ОВ, которое лежит на твердом основании.



1-основание; 2 -металлические стержни; 3 -оптическое волокно  
Рисунок 45 – Компьютерная модель ВОД

Данная модель имитирует механическое воздействие на ВОД и визуализирует картину напряженно-деформированного состояния ОБ. ANSYS используется для численного анализа и моделирования воздействия на ОБ и его напряженно-деформированного состояния. Используется метод конечных элементов ANSYS STATIC STRUCTURAL. Программа позволяет имитировать микроизгиб ОБ при приложении на него различной по значению нагрузки. При проведении моделирования решались следующие задачи, которые напрямую связаны с планированием эксперимента, определение параметров будущих моделей, выброс способа аппроксимации и оценки качества модели, поиск решения в ходе дискриминации и оценки отклонения.

При проведении компьютерного моделирования задавалось граничное условие, что количество шагов увеличения нагрузки будет равно 10, 1 шаг составляет 1 МПа. Соответственно нагрузка изменялась от 1 до 10 МПа, это является граничным условием заданой нагрузки. Время одного шага равнялось 1 секунде. Волокно подвергалось растяжению и микроизгибу. После получения численных результатов моделирования, данные были обработаны при помощи компьютерной программы. Была выполнена оценка точности полученных результатов по критерию среднеквадратического отклонения, которая выражалась в процентах. Был установлен критерии оценки полученных данных, при этом среднеквадратичное отклонение не должно превышать 20 %. Для оценки точности результатов были использованы регрессивный анализ и оценка по критерию Фишера. Для обработки полученных данных использовалась компьютерная программа ANETR. Для получения высокой достоверности 0,99 должен быть достигнут  $F \geq F_{001}$ , а при достоверности равное 0,95 критерии Фишера должен быть достигнут значения  $F \geq F_{005}$ . Выбранная компьютерная программа



обеспечивает работу матрицы планирования, при следующих условиях, что  $m$  является показателем количества видимых независимых переменных. Параметр  $n$  устанавливает значения уровня для каждой переменной, при этом каждая матрица имеет определенное количество независимых переменных, которое можно изменять. Принимаются условия для достижения необходимой точности полученных результатов и соблюдения следующего условия, когда параметр  $m$  должен отвечать условию при  $n+1$ . Полученная матрица планирования эксперимента сочетает в себе данные полученные в результате проведения нескольких экспериментов, количество которых выбрано согласно критерия Стьюдента. Выполнена оценка регрессивной зависимости и дисперсии всех полученных данных. Количество необходимых повторений при проведении экспериментов должно быть не менее 10. Изучены процессы изменения НДС при изменения нагрузки на исследуемую железобетонную балку в которой находится одномодовое оптическое волокно. Было выполнено пошаговое увеличение давления на металлические стержни, которые вызывали микроизгиб ОВ. Программа ANSYS обеспечила численное вычисление параметров напряжений и деформации ОВ при приложении нагрузки в границах 10 шагов, когда нагрузка постепенно увеличивалась от минимума до максимума. Позволило рассчитать перемещения, деформации, напряжения, внутренние усилия, возникающие в теле под действием статической нагрузки. Все параметры нагрузки, материалы и размер конечного элемента задаются в приложении Mechanical программы ANSYS. В численном компьютерном эксперименте учитывалось контактное взаимодействие ОВ, металлических стержней и основания. Были получены численные результаты изменения напряженно-деформированного состояния в зависимости от изменения нагрузки. Визуализация механического воздействия стального стержня на ОВ и картина его напряженно-деформационного состояния представлена на рисунке 46. Результат компьютерного моделирования представлен на рисунке 2А, Приложение А, с графиком изменения нагрузки от времени в течение 10 шагов.

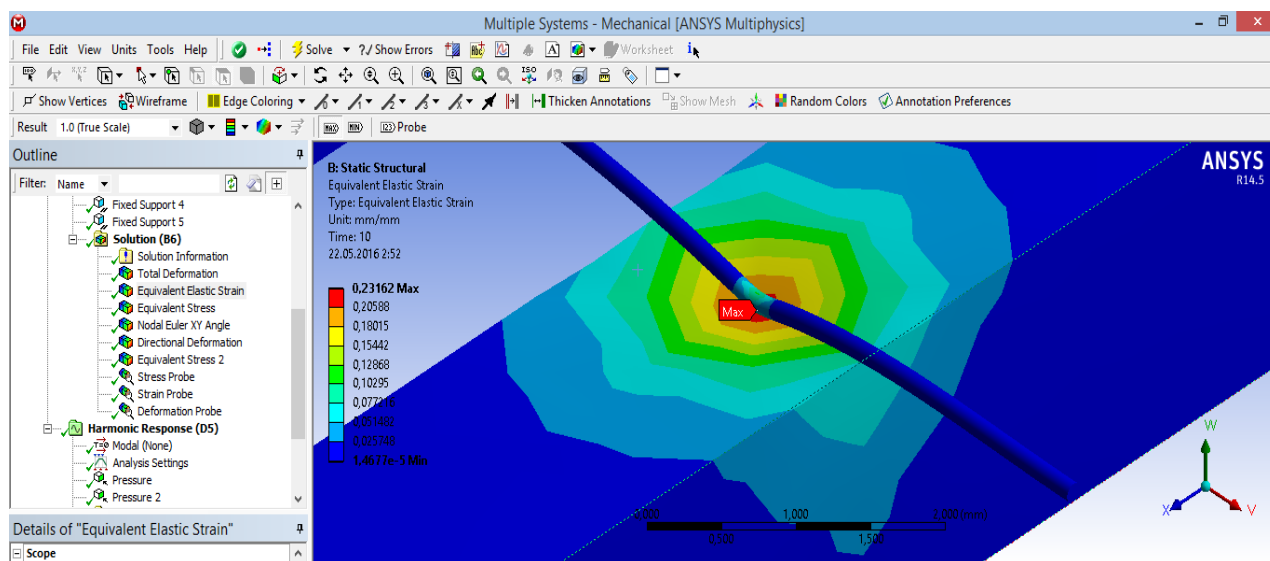
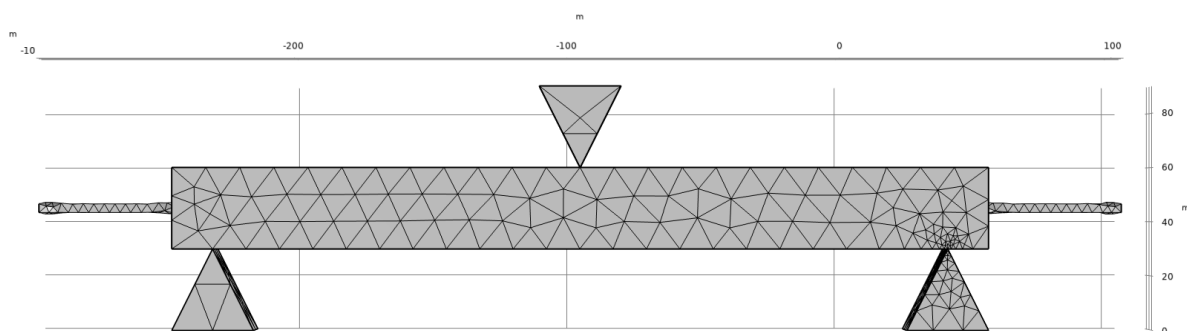


Рисунок 46 – Визуализация механического воздействия стального стержня на ОВ

Использованы методы визуализации трехмерного моделирования механических напряжений в программном COMCOL. Данная программа имеет достаточно развитый инструментарий. А также признана инженерами и учеными всего мира как наиболее эффективное средство моделирования различных конструкций, устройств и процессов практически во всех областях науки или техники. С помощью программы COMCOL возможно выполнить анализ отдельных и взаимосвязанных физических процессов, решать контактные задачи. В данной программе использован метод конечных элементов. Программа обеспечивает проведение все этапов моделирования, начиная с создания геометрической 3D – модели и задание свойств используемых материалов до выполнения численного расчёта и анализа полученных результатов моделирования. Например, может быть визуализирована картина механических напряжений и деформации железобетонной балки и встроенного в нее ОВ. Компьютерная модель железобетонной балки с ОВ, которая выполнена в программе COMCOL, представлена на рисунке 47.



1 – балка; 2 – ОВ; 3 – элемент давления на балку; 4 – неподвижные опоры.

Рисунок 47 – Компьютерная модель железобетонной балки с ОВ выполнена в программе COMCOL

На рисунке 48 представлена визуализация картины механических напряжений при приложении нагрузки в центр балки. Зоны возникших механических напряжений показаны различными цветами. Видно, что максимальные напряжения сконцентрированы в центре балки, где прилагается нагрузка. Размещенное в теле балки ОВ тоже в равной степени подвергается нагружению, и в нем возникают напряжения и деформации, которые ведут к изменению параметра преломления и свойств проходящей световой волны. Соответственно выдвинутая ранее гипотеза, что ОВ будет воспринимать нагрузку, находясь в теле балки, подтвердилась.

При деформации ОВ возникает микроизгиб, который вызывает фотоупругий эффект, что в свою очередь изменяет интенсивность световой волны и потери ее оптической мощности.

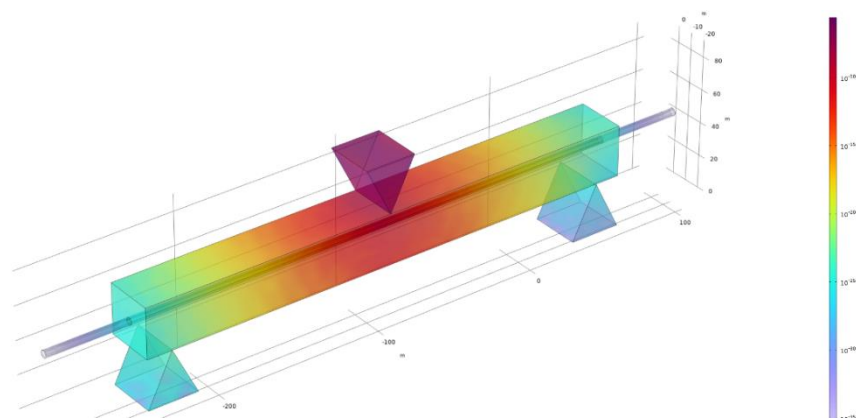


Рисунок 48 – Визуализация картины механических напряжения

На рисунке 49 показано, как деформируется балка и ОВ при приложении нагрузки. При деформации балки деформируется и само ОВ.

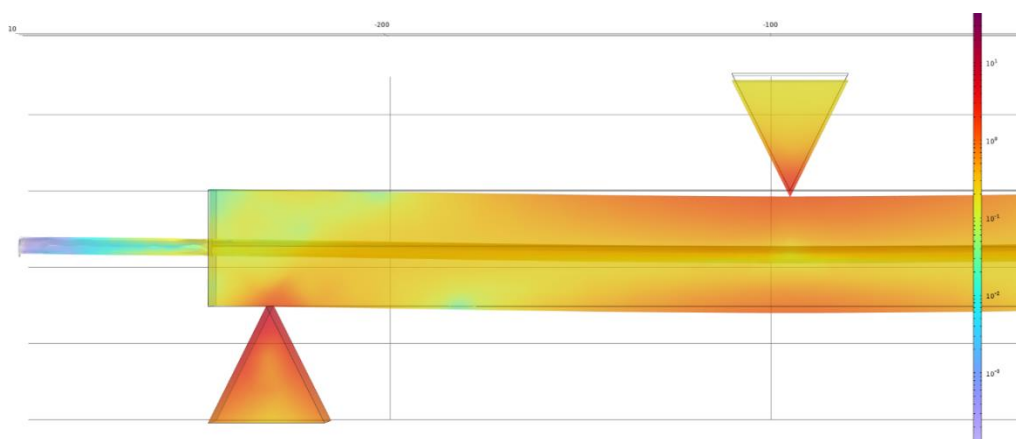


Рисунок 49 – Визуализация картины деформации балки и ОВ

Приступаем к расчету механических напряжений и деформаций в теле балки при различной нагрузке. Балка будет разделена на 3 основные зоны концентрации механических напряжений (рисунок 50)

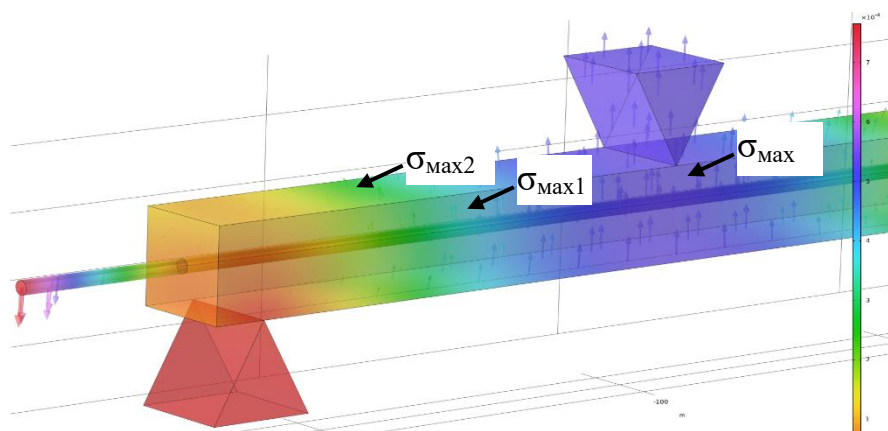


Рисунок 48 – Разделение балки на 3 основные зоны концентрации механических напряжений

Вычислим механические напряжения, сформированные в балке после приложения нагрузки. Выведем математическое выражение которое поможет определить параметр максимальных механических напряжений  $\sigma_{\max}$ , которые формируются в железобетонной балки при приложении к ней нагрузки  $P_{\text{раб}}$ .

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= F(P_{\text{раб}}). \\ \Sigma_{\max} &= F(P_{\text{раб}}),\end{aligned}$$

$$\sigma_{\max} = P_{\text{раб}} / 0,303, \text{ Н},$$

где  $P_{\text{раб}}$  – значение приложенной нагрузки, Н.

$$\text{СКО}\% = 0,01. \text{ Коэффициент Фишера } F = 1723 \cdot 10^{20}.$$

Выведем математическое выражения для установления параметров механических напряжении в зоне 1, которой обозначен как  $\sigma_{\max 1}$ . Данный параметр зависит от значений нагрузки  $P_{\text{раб}}$ .

Функции будут иметь вид  $\sigma_{\max 1} = F(P_{\text{раб}})$ .

$$\Sigma_{\max 1} = F(P_{\text{раб}}),$$

$$\sigma_{\max 1} = P_{\text{раб}} / (0,67567 + 8,36165 \cdot 10^{-21} \cdot P_{\text{раб}}), \text{ Н},$$

где  $P_{\text{раб}}$  – значение приложенного давления, Па.

$$\text{СКО}\% = 0,15. \text{ Коэффициент Фишера } F = 3560,9514 \cdot 10^{20}.$$

Составим уравнения, позволяющие определить значение напряжений в зоне 2  $\sigma_{\max 2}$  в зависимости от значений приложенной нагрузки  $P_{\text{раб}}$ . Функции будут иметь вид  $\sigma_{\max 2} = F(P_{\text{раб}})$ .

$$\Sigma_{\max 2} = F(P_{\text{раб}}),$$

$$\sigma_{\max 2} = P_{\text{раб}} / 0,45045, \text{ Н},$$

где  $P_{\text{раб}}$  – значение приложенного давления Н.

Составим уравнения, позволяющие определить значение максимальной деформации  $\varepsilon_{\max}$  в зависимости от приложенного давления  $P_{\text{раб}}$ . Функции будут иметь вид  $\varepsilon_{\max} = F(P_{\text{раб}})$ .

$$E_{\max} = 4,93 \cdot 10^{-3} \cdot P_{\text{раб}},$$

где  $P_{\text{раб}}$  – значение приложенного давления, Н.

$$\text{СКО}\% = 0,4.$$

Алгоритм моделирования показан на рисунке 3А, там же представлены трехмерные компьютерные модели, выполненные в программе COMCOL, Приложение А.

## Выводы по главе 2

1. Выбрана среда для проведения трехмерного компьютерного моделирования и визуализации механических напряжений и деформаций железобетонной балки с ОБ. С помощью программ ANSYS и COMCOL возможно выполнить анализ

отдельных или взаимосвязанных физических процессов, решать контактные задачи.

2. Выбраны компьютерные программы для математического моделирования Wolframalpha и ANETR, которые также возможно использовать для обработки экспериментальных данных. Для построения графиков и аппроксимации кривых выбраны программы Wolframalpha и Microsoft Excel

3. Разработана физико-математическая модель оптико-механических процессов механического воздействия на волоконно-оптический сенсор, что позволит создать ВОД, способные контролировать напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкции.

4. Основой предлагаемого ВОД является известный фотоупругий эффект, когда возникают изменения свойств световой волны при возникновении микроизгиба оптического волокна стандарта G652.

5. При помощи математического аппарата установлена взаимосвязь между температурой, дополнительными потерями и изменениями показателей преломления зависимости от приложенной нагрузки на боковую грань оптического волокна. Полученная физико-математическая модель изменения параметров интенсивности оптического излучения распространяющегося по сердцевине ОВ в зависимости от расстояния от его центра. Установлено, что деформацию балки можно контролировать по уровню изменения потерь, интенсивности и объемной плотности оптического излучения проходящего по сердцевине ОВ.

6. Разработана схема волоконно-оптического двухлучевого интерферометра Маха-Цендера для контроля протяженного объекта. Установлено, что данный интерферометр не пригоден для создания системы контроля технического состояния строительных конструкций на основе волоконно-оптических датчиков, а больше пригоден для проведения физических опытов и демонстраций.

7. Изучена теоретическая основа двухлучевого оптического интерферометра Маха-Цендера. Установлено, что сумма двух векторов напряженностей поля электромагнитных световых волн  $E_1$  и  $E_2$ , изменение параметров  $E_1$  и  $E_2$  способствуют изменению параметра интенсивности световой волны  $I$ .

8. На изменение параметров световой волны оказывают влияние температура и микроизгиб, который возникает при механической нагрузке. Микроизгиб вызывает дополнительные потери  $A$ , также меняется показатель преломления  $\Delta n$ , что изменяет фазу распространения световой волны. Установлена взаимосвязь между параметрами преломления и дополнительных потерь при изменении внешней температуры.

9. Динамический диапазон измерений, когда сигнал будет в наименьшем значении обратного рассеяния оптического сигнала, то отраженный от последнего оптического перехода или точки механического воздействия может выражаться следующим уравнением  $\xi > \xi_T + \alpha_1 \cdot l$ . Построен график изменения параметра интенсивности световой волны, распространяющейся по сердцевине ОВ в зависимости от расстояния от центра ОВ.

10. Разработана физико-математическая модель оптико-механических процессов в оптическом волокне при его деформации с использованием законов геометрической, волновой оптики и волнового уравнения Даламбера.

11. Выполнено компьютерное моделирование механических нагрузок на оптическое волокно при его растяжении и микроизгибе. Установлено, что использование защитного покрытия для ОВ обязательно, так как это позволит повысить надёжность ВОД. Для обеспечения требуемого срока службы ОВ, а значит, и самого ВОД в пределах 20 лет необходимо, чтобы его относительное удлинение не превышало значение 0,8 % от его длины. Если ВОД имеет длину 1000 метров, то его удлинение не должно превышать 8 метров. Было выполнено пошаговое увеличение давления на металлические стержни, которые вызывали микроизгиб ОВ. Программа ANSYS обеспечила численное вычисление параметров напряжений и деформаций ОВ при приложении нагрузки в границах 10 шагов, когда нагрузка постепенно увеличивалась от минимума до максимума.

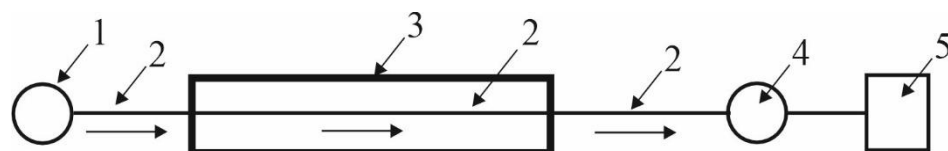
12. В программе COMCOL была разработана трехмерная модель железобетонной балки, в теле которой располагалось ОВ. Были получены численные данные напряженно деформированного состояния балки и ОВ, а также визуализирована картина механических напряжений и деформации железобетонной балки и встроенного в нее ОВ. Составлены уравнения для определения значения напряжений  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\max 1}$ ,  $\sigma_{\max 2}$  и деформаций  $\epsilon_{\max}$  в зависимости от значений приложенной нагрузки  $P_{\text{раб}}$ . Выполнена оценка качества моделей по критериям СКО% и коэффициенту Фишера.

13. На основании результатов компьютерного моделирования разработаны рекомендации по защите ОВ от механических воздействий, предложены 3 типа защитного покрытия ОВ с диаметром от 0,9 до 3 мм.

### 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАБОРАТОРНЫХ ОБРАЗЦОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ, РАЗМЕЩЁННЫХ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ

#### 3.1 Материалы и методы исследования

Основой любой измерительной системы, основанной на использовании ОВ, являются следующие основные компоненты: источник излучения, ОВ, фотоприемник. На данном принципе основана поясняющая упрощенная схема проведения экспериментов (рисунок 51). При проведении исследований использовались лазеры с различной длиной волны 650, 850, 1310, 1550 нм. Излучение проходит по ОВ и падает на поверхность фотоприемника. Фотоприемник преобразовывает световой сигнал в электрический, а далее уже работает устройство обработки и вывода данных. При механическом воздействии на железобетонную балку возникают деформации, которые передаются ОВ, что в свою очередь вызывает микроизгиб. Проходящее излучение меняет свое свойство интенсивности, изменение фиксируются фотоприемником.



- 1- источник оптического излучения (полупроводниковый лазер),  
2 – ОВ, 3 – железобетонная балка, 4 – фотоприемник,  
5 – устройство обработки и вывода данных.

Рисунок 51 – Упрощенная схема проведения экспериментов

Для имитации железобетонного фундамента были изготовлены несколько образцов бетонных балок различных габаритов. Например, были изготовлены 10 балок с использованием цемента марки ПЦ-400Д и песка с добавлением воды. Размер балки прямоугольного сечения по осям  $X=50$  мм;  $Y=50$  мм;  $Z=400$  мм. Каждая балка была армирована четырьмя стальными арматурными стержнями диаметром 4 мм. ОВ закреплялось на арматурных стержнях с помощью пластиковых стяжек в количестве 3-4 штук на один стержень, дополнительно ОВ фиксировалось при помощи пластиковой изолянт. На одном арматурном стержне было закреплено от 1 до 2 ОВ. Было использовано ОВ с защитной оболочкой диаметром от 0,9 до 3 мм. Каждая железобетонная балка имела не менее 4 ОВ, выведенных наружу с обеих сторон. Для измерения напряженно-деформированного состояния (НДС) балки достаточно одного ОВ, остальные являлись резервными на случай повреждения основного ОВ. Во всех экспериментах было использовано одномодовое ОВ стандарта G652. ОВ имеет диаметр оболочки 125 мкм и диаметр сердцевины 9 мкм, а также акриловое защитное покрытие, которое нанесено поверх стеклянной оболочки, с ним диаметр увеличился до 248 мкм, поверх покрытия размещена защитная пластиковая

оболочка диаметром 0,9-3 мм. Производитель ОВ фирма Corning (США). Показатели преломления соответствуют неравенству  $n_1 < n_2$ , численные показатели преломления оболочки  $n_1=1,4570$  и сердцевины  $n_2=1,4625$ . Оболочка выполнена из кварцевого стекла с более низкой плотностью, чем сердцевина. Балки заливались в специально изготовленную деревянную опалубку. После заливки балки выдерживались 28 суток для набора прочности. На рисунке 52 представлена опалубка и показано, как размещались арматурные стержни с закрепленными на них ОВ.

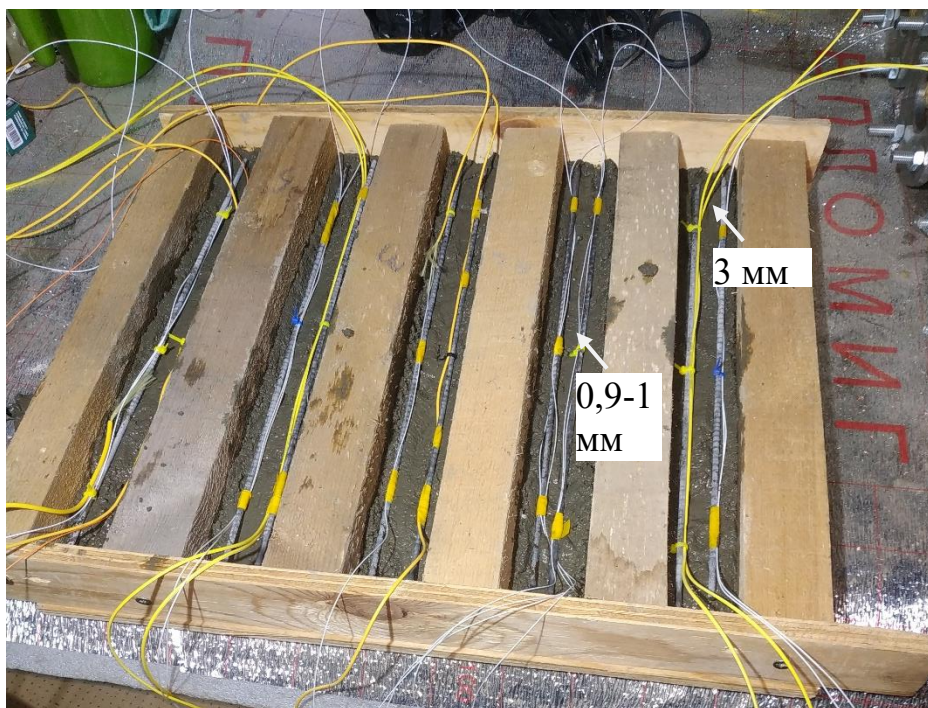


Рисунок 52 – Опалубка для заливки железобетонных балок

ОВ выводилось наружу с обоих торцевых концов балок и с помощью сварочного аппарата DVP 740 (производства Китай) была выполнена сварка заранее подготовленных отрезков ОВ, с одной стороны уже имевших оптические коннекторы типа SC. Каждый ВОД имеет два оптических коннектора типа SC с каждой стороны, это необходимо для коммутации с оптическими патчкордами, приборами, лазером и блоком обработки данных. Были выбраны оптические коннекторы SC с полировкой UPC и диаметром ферула 2,5 мм. На рисунке 53 представлено фото, на котором показаны инструменты и оборудование для сварки ОВ, выходящего из тела железобетонной балки. Как видно на фото, каждая балка имеет минимум 4 ОВ. Это также необходимо для одновременного контроля НДС и нагрузки при помощи различных приборов для дальнейшего сопоставления результатов, полученных разными методами контроля. Предварительно с ОВ снимается защитная оболочка и слой акрила при помощи специального инструмента, называемого стриппер. Далее торец ОВ подготавливается к сварке



при помощи скалывателя. Затем оба подготовленных конца ОВ свариваются в аппарате и тестируются на качество сварки.

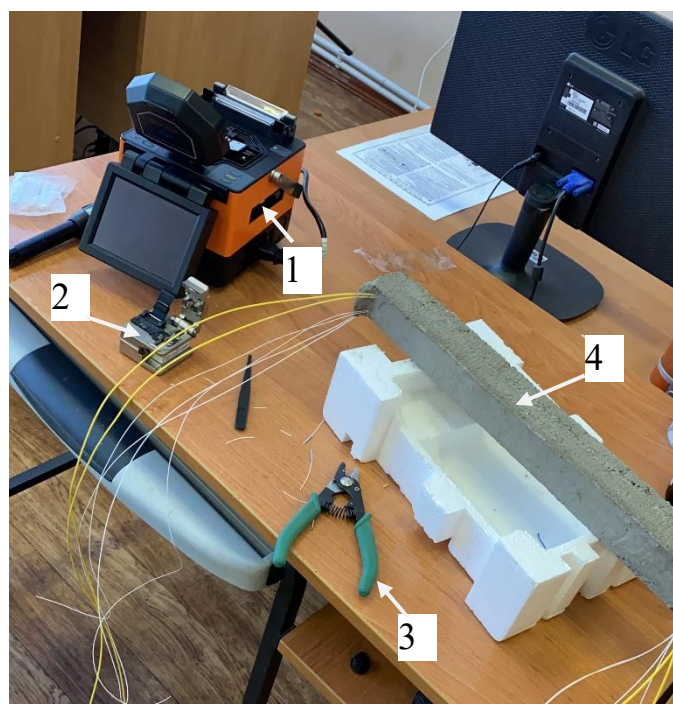


Рисунок 53 – Инструменты и оборудование для сварки ОВ

Применяемые при проведении экспериментов методы исследования уже рассмотрены в главе 2 и подробно рассмотрены в [119-122, 150]. Также использованные методы исследования и обработки полученных результатов были изложены в собственных публикациях автора по теме диссертационной работы [151-159]. Согласно выбранной методике обработки полученных данных, которая была рассмотрена ранее в главе 2, количества проведенных опытов выбрана согласно рекомендации метода Стьюдента. При этом минимальное количество повторяющихся одинаковых изменений равнялось 10. Методология обработки полученных данных была выбрана согласно рекомендации приведённых в источнике [150]. Для достижения необходимой точности установлен коэффициент вариации  $K_{\text{вар}}$ . Численное исследование и обработка данных выполнены с помощью программ Wolframalpha и Microsoft Excel, которые способны производить обработку результатов экспериментов и строить аппроксимации различных видов, а также работать с массивами данных.

По формуле было определено необходимое число повторений опытов с учетом коэффициента вариации [150]:

$$K_{\text{вар}} = \frac{100 \cdot \delta_0}{\chi}, \% \quad (39)$$

где  $\delta$  – среднее квадратичное отклонение коэффициента  $K_{вар}$  и требуемой степени точности;

$\chi$  – среднее арифметическое.

По формуле было определено значение среднеквадратичного отклонения [150]:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{N-n}}, \quad (40)$$

где  $\delta_i$  - отклонения отдельных результатов от групповых средних;

N- общее число опытов;

n – число групп опытов.

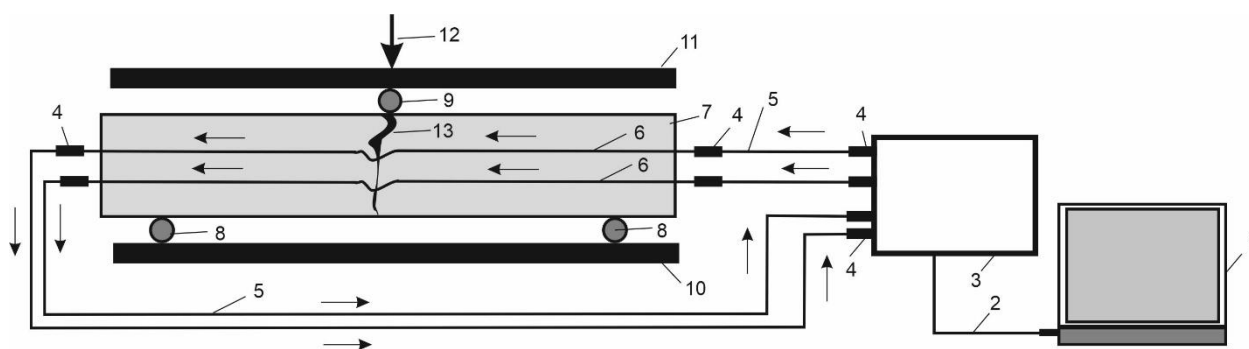
### **3.2 Исследование балок с волоконно-оптическими датчиками по схеме №1 при их нагружении с помощью пресса П-125**

Для нагружения образцов железобетонных балок был использован пресс с электромеханическим приводом марки П-125. Данный пресс используется для испытания строительных материалов. Пресс оснащен измерительным блоком, в котором расположен торсионный силоизмеритель и диаграммный аппарат, а также имеется пульт управления и стрелочный указатель развиваемой нагрузки с ценой деления 1,25 кН. Пресс развивает нагрузку от 0 до 625 кН. Измерительная часть прессы имеет допустимую погрешность измерения нагрузки в случае прямого хода в пределах 10 %. В процессе нагружения железобетонная балка была установлена на двух опорах, которые располагались на нижней плите прессы. Воздействие на балку оказывалось третьей опорой, которая была установлена сверху и прижималась к балке верхней плитой прессы. Верхняя опора располагалась ровно посередине балки и воздействовала на центр балки. Контроль хода плит прессы выполнялся электронным штангенциркулем с цифровой индикацией (производства Китай). Диапазон измерения составлял от 0 до 150 мм. Данный измеритель имел разрешение в 0,01 мм и точностью  $\pm 0,01$  мм. На рисунке 54 показан процесс разрушения балки и как осуществлялось измерение хода плит прессы. Также показано, как располагались нижние опоры, а также как располагалась верхняя опора, которая обеспечила разрушение балки. Нагрузка прилагалась к балке до ее полного разрушения, когда в центре балки образовывались трещины. Можно отметить, что в процессе испытания ОВ находилось в защитной оболочке и после разрушения балки оставалось в рабочем состоянии. Температура в помещении не менялась на протяжении всего эксперимента и колебалась в пределах 22-23 °С, что не повлияло на работу контрольно-измерительных приборов и АПК. АПК показал хорошую устойчивость в работе и стабильность в выдаче результатов измерения.



Рисунок 54 – Процесс разрушения балки

На рисунке 55 показана схема № 1, использования для проведения эксперимента по разрушению балки с ВОД при помощи пресса П-125. В экспериментах использован персональный компьютер 1, на котором был установлен аппаратно-программный комплекс (АПК) для измерения нагружения балки и установления момента ее разрушения.



- 1- персональный компьютер; 2 – кабель USB; 3 – блок обработки данных;  
 4- оптический адаптер; 5 – оптический патч-корд; 7 – ВОД; 8, 9 – опоры;  
 10, 11 – плиты пресса; 12 – направление приложения силы; 13 -очаг с трещинами или зона разрушения.

Рисунок 55 – Схема № 1

АПК, компьютер и ВОД образуют единую автоматическую систему контроля (АСК). Компьютер является устройством окончательной обработки данных и вывода информации на экран, он соединен с блоком обработки данных 3 при помощи гибкого кабеля USB, который обозначен позицией 2. Блок обработки данных содержит источник излучения, которым является полупроводниковый лазер. Использовался лазер типа InGaAs мощностью излучения 20 mW, длиной волны  $650 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ . Выбор мощности лазера был выполнен произвольно и взят со значительным запасом, так как в дальнейшем длина измерительного канала будет увеличена до 1 км. Тип используемого лазера соответствует уровню

безопасности Laser launcher level CLASS IIIb. Данной мощности достаточно, чтобы нанести вред сетчатке глаза при прямом и длительном контакте. Данная ситуация при проведении экспериментов возникнуть не могла, но определенные меры безопасности были приняты, например, были использованы специальные защитные очки. Блок обработки данных также содержит фотоприёмник и процессор для предварительной обработки данных, а также имеется устройство для согласования с компьютером через кабель USB. Используемая в эксперименте АСК имеет ряд существенных отличий от своих аналогов, так как при использовании оптического интерферометра или рефлектометра в качестве фотоприемника используется фотодиод, а для построения системы контроля на основе ВОД с решетками Брэгга нужен оптический анализатор спектра. В отличие от известных конструкций с фотоприемником [128-138], было принято решение установить непосредственно на выходе из оптического волокна фотоматрицу КМОП (CMOS) высокого разрешения с графическим процессором. На каждый измерительный канал устанавливается своя фотоматрица. Блок обработки данных содержит оптические адаптеры 4 типа SC, которые позволяют коммутировать одномодовые оптические патч-корды 5, стандарта G652. Патч-корды имеют с обоих концов коннекторы типа SC. При помощи адаптера 4 коммутируются ВОД, позиция 6. ВОД находится внутри железобетонной балки 7 и воспринимает все изменения НДС, возникающие при нагружении балки. ВОД подвергается деформации, а проходящее по нему излучение изменению, об этом подробно сказано ранее в главе 2 [136-138]. Стрелками показано, как излучение проходит от источника излучения, находящегося в блоке, через адаптеры, патч-корды и ВОД, а затем возвращается к блоку. Там излучение формирует пятно Пуассона на поверхности фотоматрицы высокого разрешения КМОП (CMOS). Графический процессор производит предварительную обработку данных и отправляет информацию об изменениях параметров светового пятна на персональный компьютер, который при помощи АПК выдает численное значение контролируемой величины. Испытуемая железобетонная балка располагается на двух нижних цилиндрических опорах 8. Данные опоры позволяют создать пространство под нижней гранью балки и обеспечить возможность излома в центре балки. Диаметр опор 8 и 9 одинаковый и равен 20 мм. Верхняя опора 9 необходима для создания концентрации напряжений в центре балки и формирования разрушения балки по центру. Опоры 8 расположены на нижней плите пресса 10, а опора 9 прижимается к балке верхней плиты пресса 11. В эксперименте верхняя плита опускалась на нижнюю плиту. Стрелкой 12 показано направление приложения силы к балке 7. Опора 9 давила на центр балки, в которой сформировался очаг с трещинами или зона разрушения 13, после раскрытия трещин балка была разрушена по центру. После разрушения балки плита возвращалась в исходное положение и эксперимент продолжался с другой балкой. Всего было исследовано 10 одинаковых балок.

Луч лазера разделялся на два независимых измерительных канала при помощи оптического разветвителя типа PLCM-1U2U-SC с разделением на два канала и соотношением 50/50, энергия световой волны делилась в равной

пропорции на два канала. При проведении эксперимента использовались два ВОД размещенные в одной балке, остальные ОВ были резервные и не использовались. Использование двух одновременно работающих каналов и идентичных по своим характеристикам ВОД, было сделано для того, чтобы исключить ошибки в измерениях за счёт дублирования и сравнения данных от двух ВОД. АПК может работать одновременно с 32 каналами, но для этого мощность лазера должна быть увеличена примерно до 100-120 мВт при длине каналов в один километр.

Световое пятно, сформированное на поверхности фотоматрицы, по своей форме схоже с известным пятном Пуассона [136-138], как сказано ране во второй главе, профиль одномодового ОВ является ступенчатым описывается законом нормального распределения Гаусса. Сердцевина данного пятна достаточно яркая, а вот оболочка более темная, имеется также граница раздела между оболочкой и сердцевиной. Профиль светового пятна снятый фотоматрицей, представлен на рисунке 56. Световое пятно будет рассмотрено далее более подробно в деталях, но уже в четвертой главе, где будет идти речь об обработке сигналов. При механическом воздействии световое пятно меняет ряд своих параметров и геометрическую форму. Можно отметить, что фотоматрица фиксирует, в том числе, изменение интенсивности светового пятна, так как при механическом воздействии на ОВ возникает микроизгиб, при этом часть световой волны покидает сердцевину ОВ и попадает в оболочку, а также совсем покидает ОВ. При этом возникают дополнительные потери оптической мощности, которые можно зафиксировать. Слева представлено цветное изображение светового пятна, а слева чёрно-белое.

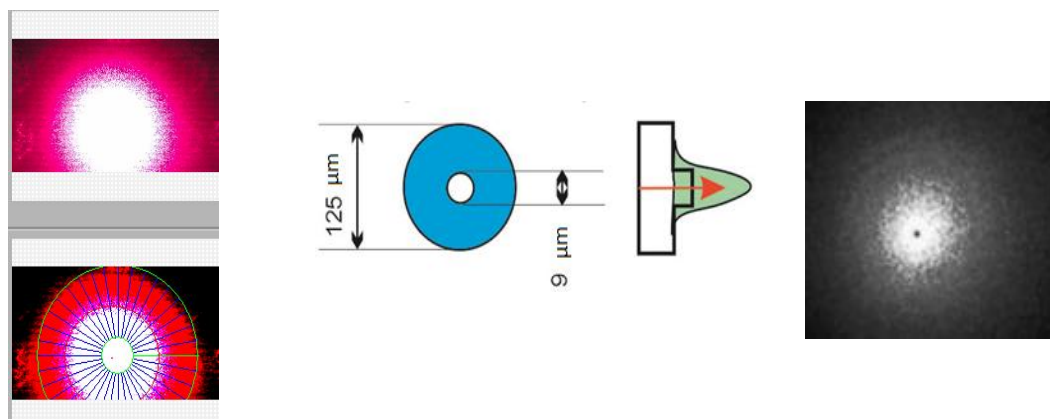


Рисунок 56 – Профиль светового пятна, снятый фотоматрицей

Механическое воздействие на ОВ приводит к возникновению дополнительных потерь и изменению интенсивности, что фиксируется АПК.

Результаты экспериментов и графики зависимости дополнительных потерь и других параметров по разделу 3.2 приведены на рисунках 1 – 3 Б, Приложение Б.

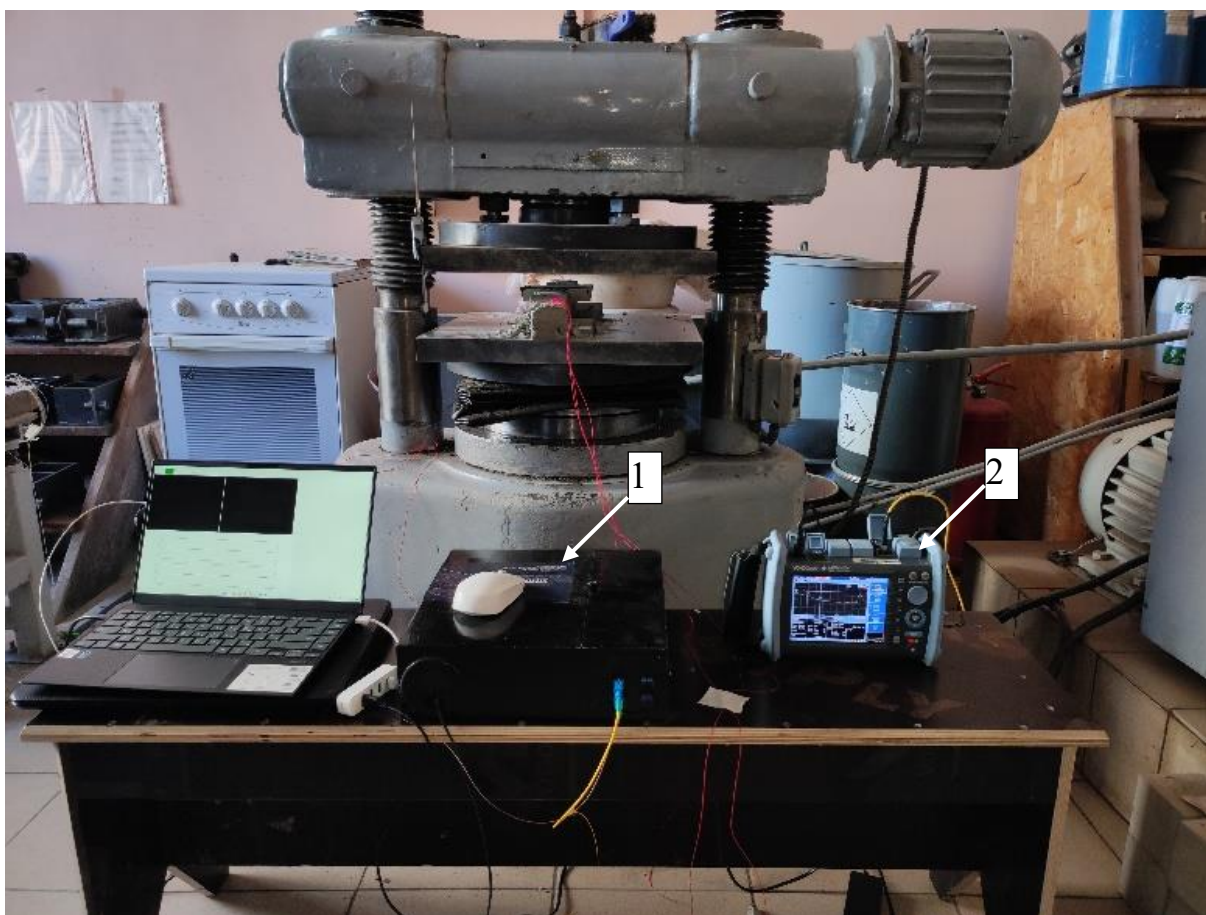
### 3.3 Исследование балок с волоконно-оптическими датчиками по схеме №2 при их нагружении с помощью пресса П-125

Эксперимент, выполненный по схеме №2, отличался от эксперимента, выполненного по схеме №1, тем, что используется дополнительное средство контроля, которым являлся оптический рефлектометр Yokogawa AQ1200E типа OTDR (Optical Time Domain Reflectometer), произведен в Японии (рисунок 57). Это многофункциональный оптический тестер, предназначенный для измерения параметров волоконно-оптических линий телекоммуникации. Данный рефлектометр обеспечивает высокую точность измерения дополнительных потерь в пределах  $\pm 0.05$  дБ. Как у всех рефлектометров у него имеется мертвая зона до 4 метров при измерении дополнительных потерь, это минимальное расстояние от оптического адаптера рефлектометра до точки измерения. В границах мертвой зоны прибор имеет значительную погрешность или вообще не может производить измерения. Мертвая зона, при измерении положения неоднородности уже значительно меньше и составляет 0,8 м. Рефлектометр способен генерировать и работать с длинами волн 1310, 1550, 1625 нм с отклонением  $\pm 10$  нм. Это спектр глубокого инфракрасного, так как АПК работает на длине оптической волны 650 нм, то возможно одновременно пропускать две световые волны разной длины, которые не будут влиять друг на друга и нарушать работу ВОД. Максимальная дистанция измерения 500 км, разрешающая способность 0,1 м при динамическом диапазоне 32 дБ. Оптический рефлектометр производит измерения на основе усреднения серии подачи импульсов и приема отражения световой волны за определенный промежуток времени, после обработки данных строятся рефлектограммы. Результаты измерения представлены в виде численных значений мгновенных показаний и усредненных значений на экране рефлектометра с использованием непрерывной рефлектограммы. Вносимые дополнительные потери возникают на отрезке ОБ в местах соединения и сварки, а также изгиба. С принципом работы и методами расшифровки рефлектограмм можно ознакомиться в открытом источнике <http://www.stroi-tk.ru/info/articles/vols-stat1/imprefl/imprefl2/>. С технической характеристикой оптического рефлектометра Yokogawa AQ1200E можно ознакомиться на сайте <https://skeo.ru/katalog/kio/reflektometry-otdr/yokogawa-aq1200>. Для измерения дополнительных потерь и уровня оптической мощности использовались два прибора: измеритель оптической мощности JDSU SmartPocket OLP-38 (производства США, бывшая торговая марка VIAVI) с абсолютной погрешностью изменения  $\pm 0,2$  дБ ( $\pm 5\%$ ) и диапазоном длин оптических волн от 800 до 1630 нм, второй прибор представляет из себя источник излучения JDSU SmartPocket OLS-35 ((производства США, бывшая торговая марка VIAVI). Длина генерируемой волны оптического диапазона от 900 до 1625 нм с отклонением в пределах  $\pm 10$  нм. Фотография рассмотренных выше приборов представлена на рисунке 57, данные приборы использовались в нескольких экспериментах, как дополнительное средство контроля дополнительных потерь и калибровке АПК.



Рисунок 57 – Оптический рефлектометр Yokogawa AQ1200E типа OTDR

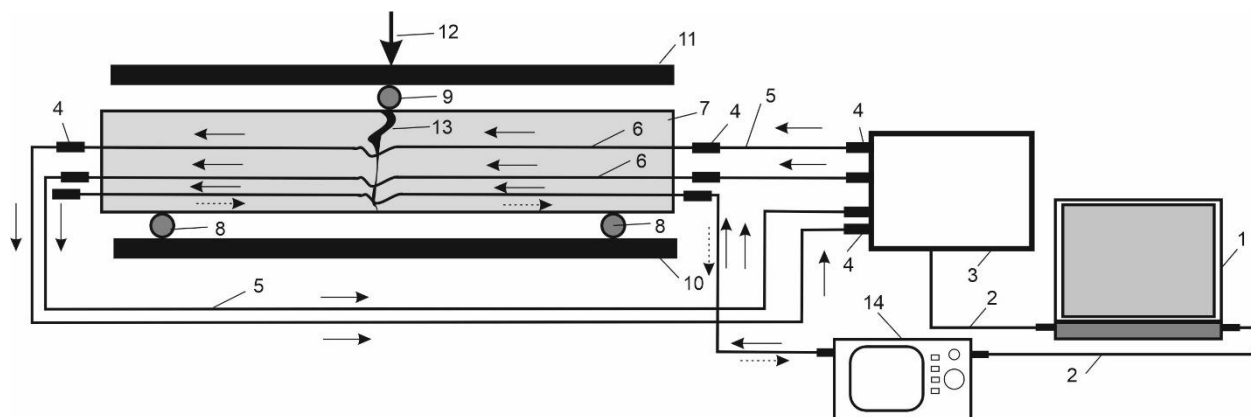
На рисунке 58 показан эксперимент по схеме № 2 с использованием АПК и оптического рефлектометра (вид сбоку показан на рисунке 4 Б, приложение).



1 – АПК с персональным компьютером; 2 – оптический рефлектометр  
Рисунок 58 – Фотография оборудования

Обработка полученных экспериментальных данных производилась с учетом рекомендации источника [150]. Характеристики пресса с электромеханическим приводом марки П-125 были рассмотрены ранее. Образцы железобетонных балок идентичны ранее уже рассмотренным. При проведении эксперимента по схеме №2 было разрушено 10 балок, так же как в эксперименте, выполненном по схеме №1. Так как в схему измерения был дополнительно добавлен оптический рефлектометр 14, эта единственная позиция, которая является основным отличием от выполненного по схеме №1, которая уже была рассмотрена ранее и подробно описана (рисунок 53). Поэтому описание будет представлено в сокращенной форме с пояснением только сущности отличия нового варианта схемы (рисунок 59). Сплошными стрелками показано движение световой волны по ВОД, пунктирными стрелками показано направление отраженной части световой волны, которую улавливает для проведения анализа оптический рефлектометр. Рефлектометр был подключен к ВОД при помощи трех оптических патч-кордов, каждый длиной 5 метров, для ликвидации мертвой зоны.

1 – персональный компьютер; 2 – кабель USB; 3 – блок обработки данных;  
4-



оптический адаптер; 5 – оптический патч-корд; 6 – ВОД; 7 – балка; 8, 9 – опоры; 10, 11 – плиты пресса; 12 – направление приложения силы; 13 – очаг с трещинами или зона разрушения; 14 – оптический рефлектометр.

Рисунок 59 – Схема № 2

Оптический рефлектометр необходим для более точного определения места повреждения балки, которая принята как модель железобетонного фундамента. АПК способен определить достаточно грубо расстояние до места повреждения фундамента, так как он работает с квази-распределенным ВОД, при этом фундамент или протяженный объект разделяется на зоны с длиной от 5 до 500 метров, поэтому АПК имеет предел в разрешающей способности 5 метров при максимальной протяженности фундамента 160 метров, что соответствует максимальному значению зон равному 32. Если протяжённость объекта значительно больше, то и длина зон, увеличится до десятка или даже сотен метров. Данный АПК способен обеспечить контроль на участке длиной в 16 км при длине каждой зоны 500 метров, это максимальный показатель. Так как АПК и ВОД составляют единую квази-распределённую АСК, то при необходимости количество одновременно работающих АСК может быть практически любым, и



тогда можно покрывать большие растения с более высоким разрешением. При использовании оптического рефлектометра и дополнительного распределенного ВОД можно увеличить разрешающую способность АПК до 1 метра при протяженности измерительного канала до 30 км, а при соответствующем развитии доработки можно выйти на уровень 0,1 метра при дистанции до 100 км, что не выходит за пределы измерения рефлектометра.

Результаты исследования представлены на графиках, а обработка данных была выполнена при помощи WolframAlpha, которая находится в открытом доступе (<https://www.wolframalpha.com/input/?i=Free>). График зависимости значений потерь в оптическом волокне при длине световой волны 1550 нм при пошаговом увеличении давления при изгибе представлен на рисунках 60-62. Дополнительные потери обозначаются символом  $A$ , механические напряжения обозначаются символом  $\sigma$ , механические деформации обозначаются символом  $\epsilon$ , нагрузка обозначаются символом  $P$ .

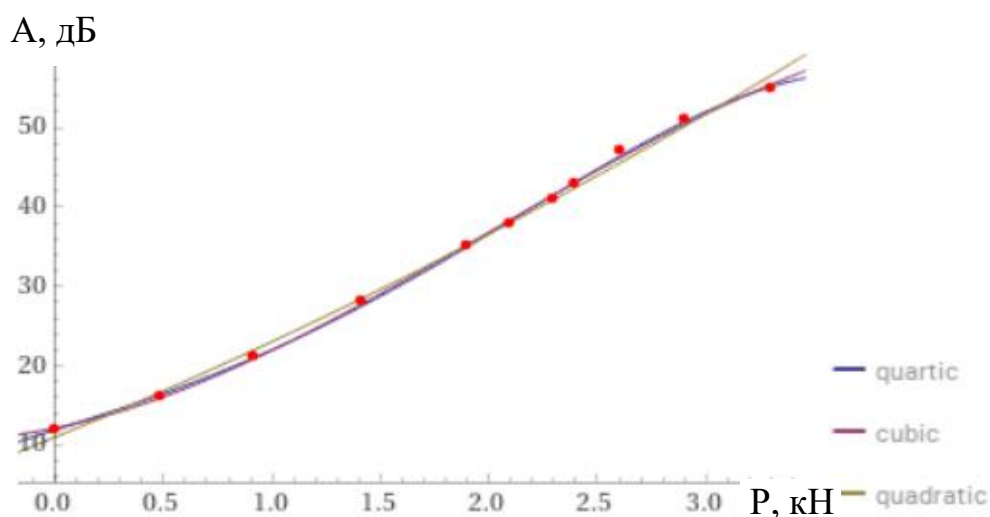


Рисунок 60 -Значение потерь в ОВ при длине световой волны 1550 нм при пошаговом увеличении нагрузки

Таблица 1 – Критерии оценки качества автоматической аппроксимации

	AIC	BIC	$R^2$	adjusted $R^2$
quartic	19.7862	22.1735	0.99945	0.999084
cubic	22.1783	24.1678	0.999127	0.998753
quadratic	36.0178	37.6094	0.996156	0.995194

При проведении автоматической аппроксимации были получены следующие результаты:

$$-0.356144 x^4 + 1.50906 x^3 + 0.234012 x^2 + 8.70285 x + 11.8969 \quad (\text{quartic})$$

$$-0.854605 x^3 + 5.11668 x^2 + 5.544 x + 12.125 \quad (\text{cubic})$$

$$0.773592 x^2 + 11.2551 x + 10.9975 \quad (\text{quadratic})$$

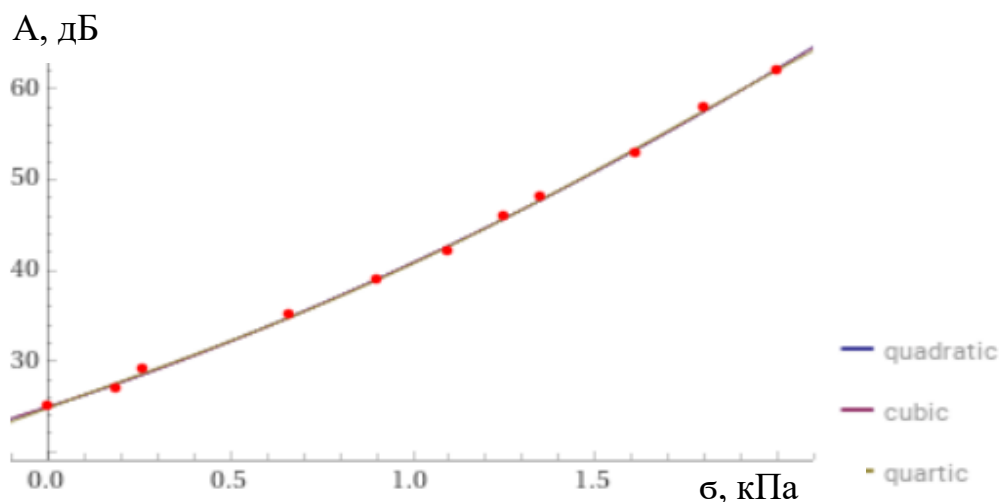


Рисунок 61 -Зависимость роста потерь в ОВ при длине световой волны 1550 нм при росте механических напряжений

При проведении автоматической аппроксимации были получены следующие результаты:

$$2.74279 x^2 + 13.1829 x + 24.9213 \quad (\text{quadratic})$$

$$-0.174503 x^3 + 3.27649 x^2 + 12.767 x + 24.9696 \quad (\text{cubic})$$

$$-0.958998 x^4 + 3.67458 x^3 - 1.58522 x^2 + 14.7757 x + 24.8373 \quad (\text{quartic})$$

Таблица 2 – Критерии оценки качества автоматической аппроксимации

	AIC	BIC	$R^2$	adjusted $R^2$
quadratic	18.5611	20.1526	0.998976	0.99872
cubic	20.9596	22.9491	0.998983	0.998547
quartic	22.9515	25.3388	0.999046	0.99841

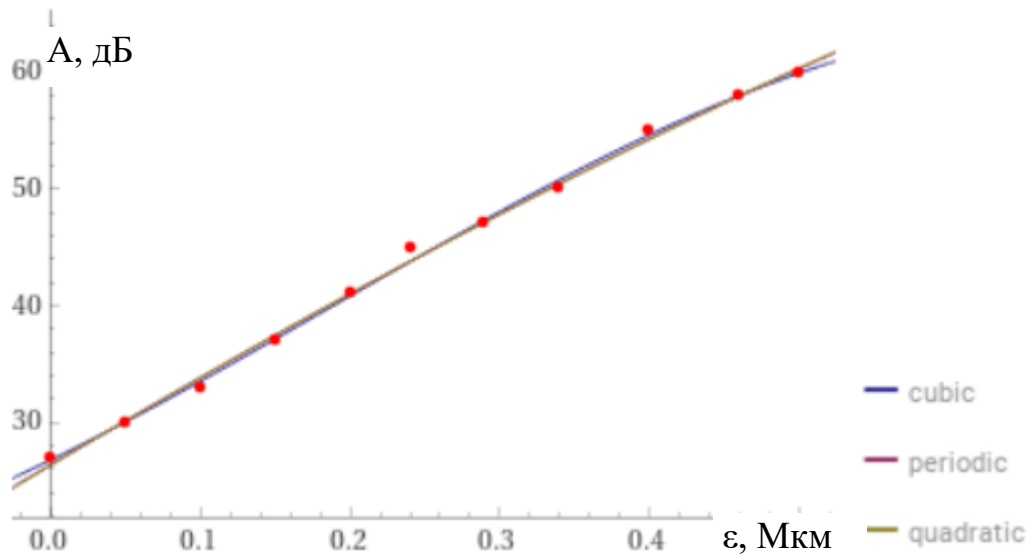


Рисунок 62 -Зависимость роста потерь в ОВ при длине световой волны 1550 нм при росте деформации

Таблица 3 – Критерии оценки качества автоматической аппроксимации

	AIC	BIC	$R^2$	adjusted $R^2$
cubic	27.2501	29.2396	0.997795	0.99685
periodic	27.3845	28.9761	0.997206	0.996508
quadratic	27.9966	29.5882	0.997046	0.996308

При проведении автоматической аппроксимации были получены следующие результаты:

$$-101.755 x^3 + 58.1374 x^2 + 62.7073 x + 26.7861 \quad (\text{cubic})$$

$$75.4817 \sin(x) + 18.3311 \cos(x) + 8.05508 \quad (\text{periodic})$$

$$-18.1031 x^2 + 77.1288 x + 26.337 \quad (\text{quadratic})$$

Остальные графики зависимости дополнительных потерь и другие результаты по разделу 3.3 приведены на рисунках 5 – 10 Б, Приложение Б. Там же представлены рефлектограммы, которые были получены в процессе экспериментов. Распределённый ВОД был подключён к оптическому рефлектометру, как показано на рисунке 60 и четко реагировал на изменение

нагрузки в широком диапазоне. Так как он находился внутри балки, то он воспринимал все изменения НДС железобетонной балки. На экране оптического рефлектометра отражены все изменения параметров дополнительных потерь при давлении на ВОД в режиме реального времени и режиме усреднения данных. При разрушении балки наблюдался незначительный всплеск и увеличение дополнительных потерь, что было зафиксировано на рефлектометре. Схема № 2 полностью подтвердила свою работоспособность и позволила установить место повреждения железобетонной конструкции при помощи распределённого ВОД. Фотографии рефлектограмм, полученных при проведении эксперимента по схеме № 2, представлены на рисунках 11-14 Б, Приложение Б, более подробная информация о принципах работы АПК будет представлена в четвертой главе.

### **3.4 Исследование балок с волоконно-оптическими датчиками по схеме №3 при их нагружении с помощью пресса П-125**

Эксперимент, выполненный по схеме №3, имел отличия от экспериментов, выполненных по схеме №1 и №2, были использованы более крупные по своим размерам железобетонные балки (рисунок 63). Параметры балок: длина 1300 мм; ширина 100 мм; высота 140 мм. Для их производства использовался цемент марки ПЦ-400Д, балласт и песок с добавлением воды. Форма для заливки железобетонных балок представлена на рисунке 1 В, приложение В. После заливки бетонным раствором форма была установлена на вибрационный стол для уплотнения. После заливки балки выдерживались 28 суток для набора прочности. Было изготовлено 9 балок одинаковой формы и размеров. Балки имеют два арматурных стержня диаметром 10 мм, связанных четырьмя перемычками из той же арматуры.



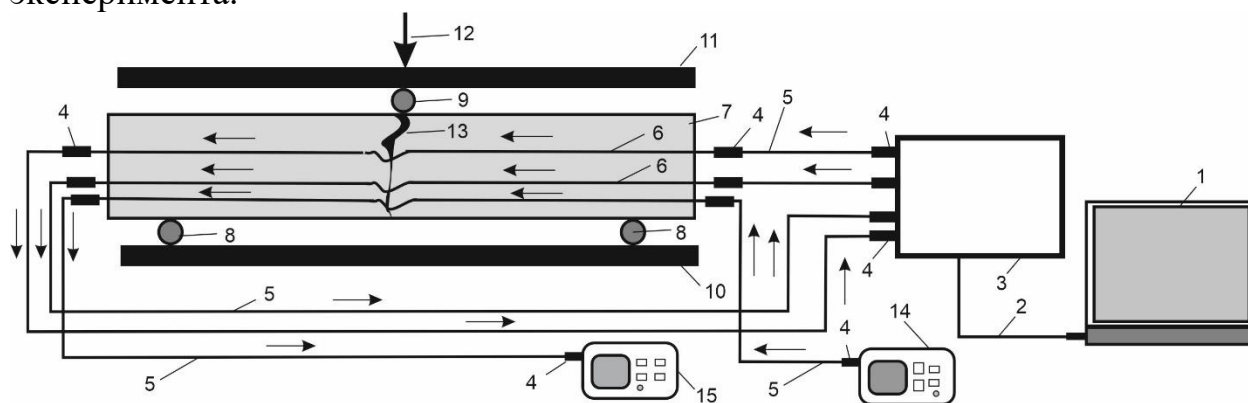
Рисунок 62 – Заливка формы

На рисунке 62 представлено фото проведения эксперимента по схеме №3.



Рисунок 64 – Проведение эксперимента по схеме №3

На рисунке 65 представлена схема №3, использованная при проведении эксперимента.



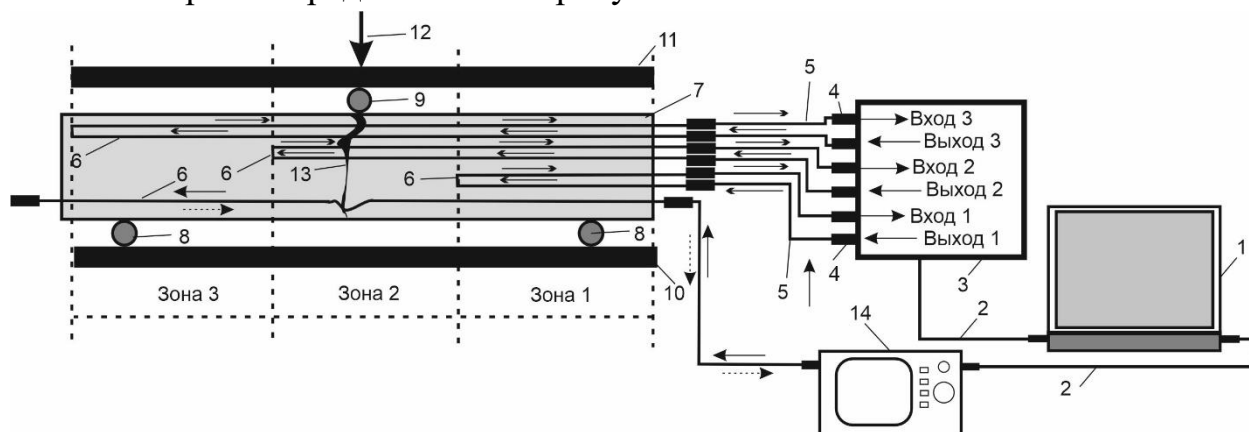
1 – персональный компьютер; 2 – кабель USB; 3 – блок обработки данных; 4- оптический адаптер; 5 – оптический патч-корд; 6– ВОД; 7 – балка; 8, 9 – опоры; 10, 11 – плиты пресса; 12 – направление приложения силы; 13 -очаг с трещинами или зона разрушения; 14 – источник излучения; 15- измеритель оптической мощности.

Рисунок 65 – Схема проведения эксперимента по схеме № 3

Эксперимент, выполненный по схеме №3, имел отличия от экспериментов, выполненных по схемам №1 и №2, так как в испытаниях были использованы балки больших размеров. Имеются различия в построении схемы измерения, а также расположении ВОД. Схема содержит АСК на основе АПК и ВОД, как и в предыдущих схемах, но уже вместо оптического рефлектометра используется два

прибора: измеритель оптической мощности и источник излучения, фото которых представлены на рисунке 58. Данные приборы использованы для дублирования при измерении дополнительных потерь и оптической мощности для калибровки АПК по данным параметра. В данной схеме имеется отличие по двум позициям. Луч от источника излучения 14 проходит через оптический адаптер 4 и оптический патч-корд 5 и попадает в ВОД 7. Проходя через ВОД, излучение подвергается изменению, так как на ОВ оказано механическое воздействие, процесс изменения показателя преломления был рассмотрен во второй главе. В остальной части схемы №3 работают идентично схеме №1, так как основным отличием является использование дополнительного ВОД, подключенного к оптическим приборам 14 и 15. Пройдя через ВОД, излучение подвергается изменению, если на балку оказано механическое воздействие, если воздействия нет, то волна проходит без изменения своих свойств, например интенсивности и фазы распространения. Если балка подвергается деформации при увеличении нагрузки, то и ВОД тоже подвергается деформации, что было зафиксировано АСК и измерителем оптической мощности. Балки доводились до разрушения, в центре балки формировались трещины, которые приводили к ее частичному разрушению. ОВ, находящееся внутри балки и закрепленное на арматуре, оказалось в работоспособном состоянии, а также осталось не поврежденным. Вид разрушенных балок представлен на фото рисунках 2 – 4 В, Приложение В.

В процессе эксперимента отработывалась возможность АСК определять расстояние до зоны повреждения, для этого были разработаны два варианта ВОД. Схема измерения представлена на рисунке 65.



1 – персональный компьютер; 2 – кабель USB; 3 – блок обработки данных; 4- оптический адаптер; 5 – оптический патч-корд; 6– ВОД; 7 – балка; 8, 9 – опоры; 10, 11 – плиты пресса; 12 – направление приложение силы; 13 – очаг с трещинами или зона разрушения; 14 – оптический рефлектометр.

Рисунок 65 – Схема измерения с распределенным и квази – распределенными ВОД

Один вариант, когда ВОД является распределенным с более высокой разрешающей способностью и точностью определения места расположения трещины в теле балки, а также второй вариант, когда ВОД является квази-распределенным, но разрешающая способность и точность будут значительно ниже. Температура в помещении не менялась на протяжении всего эксперимента и

колебалась в пределах 23-24 °С, что не повлияло на работу контрольно-измерительных приборов и АПК. АПК показал хорошую устойчивость в работе и стабильность в выдаче результатов измерения.

В первом случае АСК будет значительно сложнее и дороже, а во втором случае проще и дешевле, так как в измерительной схеме отсутствует оптический рефлектометр, который имеет значительную стоимость и требует разработки отдельного программного обеспечения для согласования его работы с АПК. Для квази-распределенной АСК для уточнения места повреждения можно использовать оптический рефлектометр, но уже отдельная операция, проходящая в ручном режиме измерения с участием оператора. АСК способна работать одновременно с четырьмя каналами, к которым подключены квази-распределенные ВОД. Так как АПК имеет четыре окна для настройки каналов, соответственно к нему можно подключить четыре квази-распределенных ВОД. В эксперименте №3 были использованы три квази-распределенных ВОД, при этом балка была разделена на три равные зоны, для каждой зоны был выделен свой квази-распределенный ВОД. К рефлектометру был подключен ВОД, который является распределенным.

Как показано на рисунке 64 балка разбита на три равных зоны, при помощи трех квази-распределенных ВОД, которые подключены к блоку обработки данных. Также в балке находится один распределенный ВОД, который подключен к оптическому рефлектометру. Как показано на схеме трещина находится в зоне 2, где работают два квази-распределенных ВОД. АПК обрабатывает данные от ВОД и сам определяет зону разрушения балки. Распределенный ВОД способен более точно определить участок повреждения. Квази-распределенный ВОД работает одновременно с двумя ОВ, так как одно ОВ пропускает световую волну в прямом направлении от источника излучения к ВОД, а второе ОВ возвращает световую волну к блоку обработки данных, где находится фотоприемник, стрелками показан путь прохождения световой волны. На схеме показаны входы и выходы квази-распределенных ВОД.

Испытания образца АСК показали достаточно высокую надежность срабатывания для квази-распределенного ВОД, при воздействии на одну из трех зон 1-3 и точность определения зоны, где сформировалась трещина (рисунок 66).

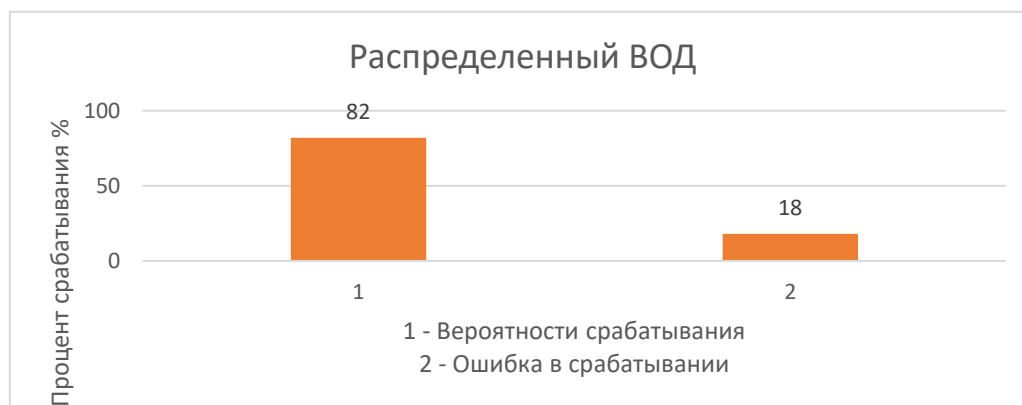


Рисунок 66 – Надежность срабатывания для квази-распределенного ВОД

Значение вероятности срабатывания составили 0,86. Ошибка в срабатывании составляет в пределах 14%. В дальнейшем будет повышена вероятность срабатывания до 0,9, при снижении вероятности ложного срабатывания до 0,1.

Испытания образца АСК показали достаточно высокую надежность срабатывания, распределённого ВОД, который способен определить расстояния до места разрушения и формирования трещины с точностью до 1 м. Значение вероятности срабатывания составило 0,82. Ошибка в срабатывании составляет в пределах 18%. В дальнейшем будет повышена вероятность срабатывания до 0,9, при снижении вероятности ложного срабатывания до 0,1 (рисунок 67).



Рисунок 67 – Надежность срабатывания для распределённого ВОД

### 3.5 Исследование балок с волоконно-оптическими датчиками по схеме №4 при их нагружении с помощью гидравлического пресса ПГИ – 500

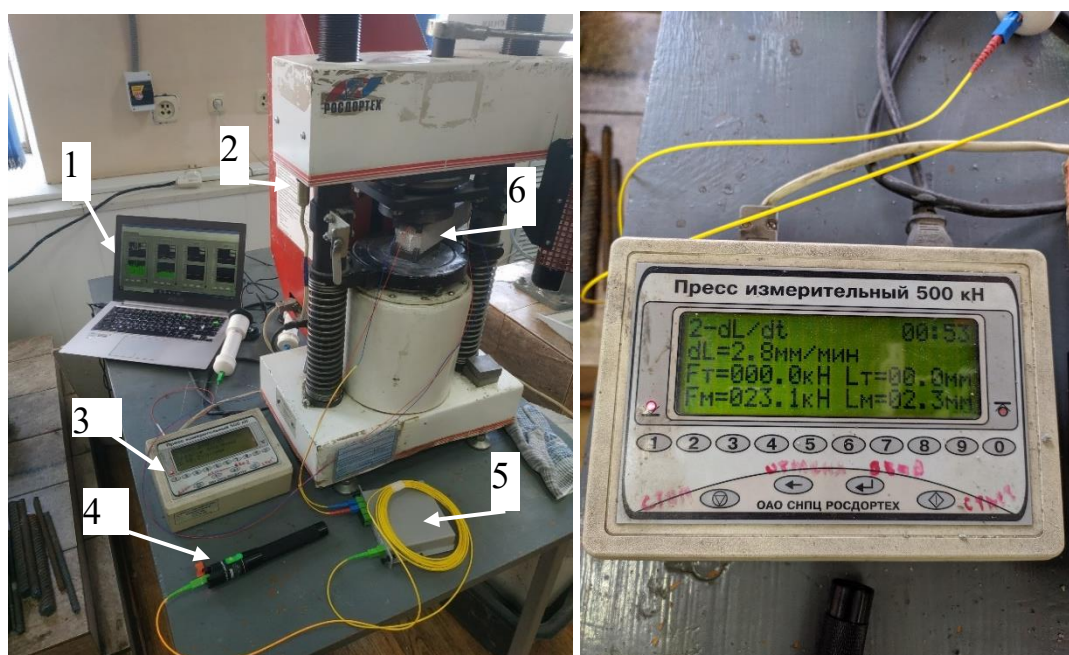
Эксперимент, проведенный по схеме № 4, существенно отличается от схем 1-3, так как был использован другой пресс – ПГИ – 500. Для проведения данного эксперимента были изготовлены железобетонные балки размерами 40x40 мм и длиной 200 мм, изготовленные из цемента марки ПЦ-400 с использованием песка и воды (рисунок 68). Каждая балка была армирована двумя стальными стержнями диаметром 3 мм. На каждом стержне было закреплено по одному ВОД. Фотографии процесса изготовления балок и армирования балки с закреплением на стержнях ВОД представлены на рисунках 5 В и 6 В, приложение В. Раствор укладывался в специальную форму, после чего подвергался воздействию вибрации на вибрационном столе в течение 1-2 минут. Затем балки хранились в течение 28 суток при условии естественного твердения.





Рисунок 68 – Образец железобетонной балки размером 40x40 мм и длиной 200 мм

Вероятно, разрыву и разрушению ОВ препятствовало то, что оно находилось в защитной пластиковой оболочке. После разрушения балки по ОВ все равно проходило излучение, несмотря на трещину в теле балки, бетон был разрушен, а ОВ осталось не поврежденным. На рисунке 7Б, Приложение Б представлено фото разрушенной балки крупным планом. Далее балки были подвергнуты сжатию на гидравлическом прессе ПГИ – 500 (производства бывшего СССР, заводской номер 166). Максимальное усилие 500 кН. На рисунке 69 показано использованное испытательное оборудование.



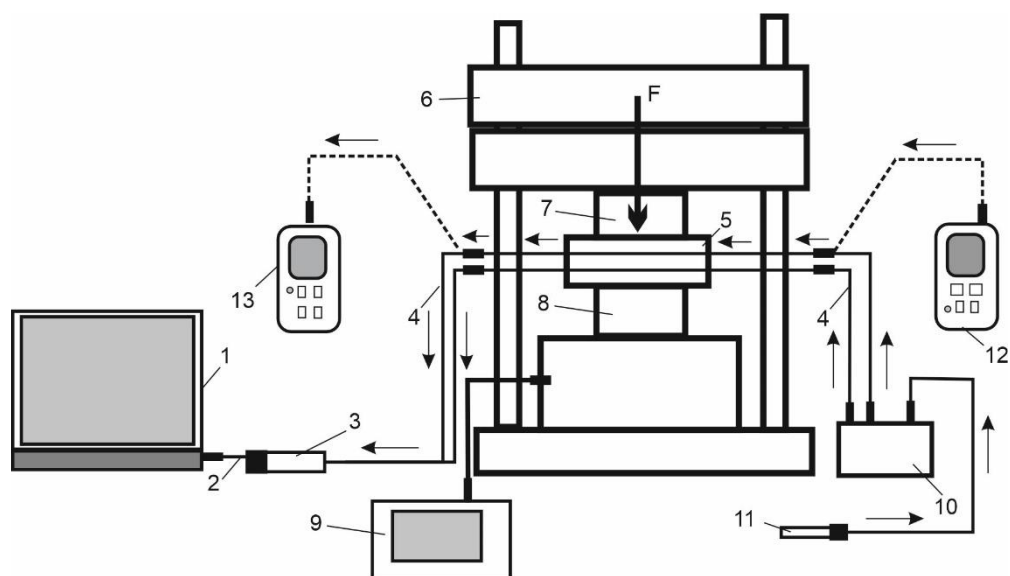
1 – персональный компьютер с АПК; 2 – ПГИ – 500; 3 – пульт управления с экраном для отображения данных; 4 -источник излучения; 5 – оптический разветвитель; 6 – балка с ВОД.

Рисунок 67 – Гидравлический пресс ПГИ – 500

Данный пресс используется для сжатия строительных материалов в лабораторных условиях и содержится в исправном состоянии, а также проходит периодическое техническое обслуживание и поверку (номер сертификата о поверке ВЛ-2-03-18000654). АПК предварительно был настроен и откалиброван при

помощи оптического ваттметра и источника излучения (рисунок 8В, Приложение В). Также на рисунке приведена фотография, где показан процесс испытания балок, в которых размещены ВОД (рисунок 9В, Приложение В). В данном эксперименте измерялись дополнительные потери при помощи АПК, которые возникали в ОВ при микроизгибе возникшем вследствие механического воздействия на ОВ.

На рисунке 70 показана условная схема проведения испытаний балок с использованием гидравлического пресса ПГИ – 500. В балки на этапе их заливки были установлены ВОД, по два на каждую балку, параметры балок и используемый материал для их изготовления уже был рассмотрен ранее. В экспериментах участвовало 10 балок, у которых было по два ВОД, каждый ВОД оснащен двумя оптическими коннекторами SC для коммутации с измерительными приборами.



1 – персональный компьютер с АПК; 2 – кабель USB; 3 – блок обработки данных с фотоприемником и микропроцессором; 4 – ВОД; 5 – балка с ВОД; 6 – ПГИ – 500; 7 – подвижная плита; 8 – неподвижная плита; 9 – пульт управления с экраном для отображения данных; 10 – оптический разветвитель; 11 – источник излучения 650 нм; 12 – источник излучения 1310-1550нм; 13 - измеритель оптической мощности.

Рисунок 68 – Схема испытаний балок с использованием гидравлического пресса ПГИ – 500

Эксперимент проводился следующим образом: луч проходил от источника излучения через ВОД, который размещался в теле балки до фотоприемника, после чего полученные данные обрабатывались АПК. В данном эксперименте контролировались дополнительные потери оптической мощности, которые росли по мере увеличения нагрузки на балку, а значит, и на сам ВОД непосредственно. ОВ, находящееся внутри балки, подвергалось микроизгибам, которые в свою очередь вызывал фотоупругий эффект. О работе ВОД уже было сказано ранее, во второй главе. АСК представляет собой АПК и ВОД. В схему измерения включен персональный компьютер 1, на котором установлен четырехканальный АПК.

Функция АПК – окончательная обработка данных и вывод численных значений измеряемой величины, в данном случае измерялись дополнительные потери оптической мощности. Компьютер соединяется кабелем USB, позиция 2 блоком обработки данных 3, в котором находится с фотоприемник и микропроцессором. Компьютер получал данные от фотоприемника, который преобразовывал световую волну в электрический сигнал. При возрастании нагрузки на балку 5 возрастает нагрузка на ВОД, позиция 4. Соответственно потери оптической мощности в ВОД возрастают по линейной зависимости, при этом нагрузка тоже растет по линейному закону. Нагрузка на балку создавалась при помощи пресса ПГИ – 500, позиция 6. Балка размещалась на неподвижной плите пресса 8, а сверху на нее давила подвижная плита 7.

Данная схема позволяет создать условия для сжатия балки и исследовать реакцию ВОД на это сжатие. Все показания, связанные с нагружением балки выводились на экран пульта управления. Луч от источника излучения, которым являлся полупроводниковый лазер 11, разделялся в пропорции 50/50 и подавался в оба ВОД одновременно. Стрелками показано движение световой волны по ОБ. Луч лазера разделялся на два независимых ВОД при помощи оптического разветвителя типа PLСМ-1U2U-SC. Соответственно в эксперименте одновременно работало сразу два ВОД, это позволило исключить ошибки в измерениях и путем корреляции получить более точные значения в сравнении если бы использовался один ВОД. Длина световой волны, излучаемая лазером, составляла 650 нм. Длина световой волны, излучаемая лазером 12 (VIAVI (JDSU) SmartPocket OLS-35) составляла 1310 и 1550 нм. Измеритель оптической мощности 13 (VIAVI (JDSU) SmartPocket OLP-38). Соответственно в эксперименте одновременно использованы длины волны 650; 1310; 1550 нм, это позволило исключить ошибки в измерениях и путем корреляции получить более точные значения.

Результаты экспериментов представлены на рисунках 71-73 графиками зависимости дополнительных потерь  $A$  от величины нагрузки, приложенной к балке при длине волны 650; 1310; 1550 нм.

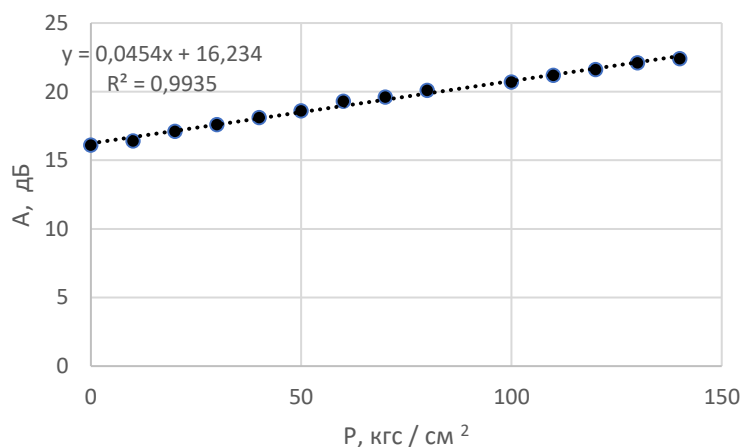


Рисунок 71 – График зависимости дополнительных потерь  $A$  от величины нагрузки, приложенной к балке при длине волны 1310 нм.

В экспериментах использованы два источника излучения видимого диапазона 650 нм и инфракрасного диапазона 1310 и 1550 нм, так как световые волны находятся в разных частотных диапазонах и имеют различную длину волны, то не оказывают влияния друг на друга и без проблем одновременно проходят по сердцевине ОВ. Одновременно проводилась калибровка АПК и измерение дополнительных потерь на длине волны 1310 и 1550 нм.

АПК работал с источником излучения с длиной волны 650 нм, это вызвало большие дополнительные потери в ОВ, но при этом фотоприемник имеет меньшую стоимость, чем фотоприемник, работающий на длине волны 1310 и 1550 нм. Так как длина железобетонного фундамента обычно не превышает значения 1-3 км, то выгоднее перейти на длину волны 650 нм, так как лазеры, фотоприемник и другое оптическое оборудование будут значительно дешевле.

При этом лазер с длиной волны можно использовать для дистанции до 30 км, что более чем достаточно. Потери мощности можно компенсировать за счет увеличения мощности лазера с 10 до 100 и более мВт. Конечно, для длины волны 1310 и 1550 нм понадобится лазер мощностью 5 мВт для аналогичной дистанции, но это в плане энергозатрат не критично. В любом случае мощность полупроводникового лазера даже при использовании максимального числа квази-распределенных ВОД, равного 32 для дистанции до 10 км, потребует мощности излучения в пределах 1 Вт. Это позволит создать АСК более простую по конструкции и значительно меньшей стоимости. Для протяженных объектов длиной более 30 км необходимо использовать распределенный ВОД работающий на длине волны 1310 – 1550 нм. Температура в помещении лабораторий не менялась на протяжении всего эксперимента и колебалась в пределах 21-23 °С, что не повлияло на работу контрольно-измерительных приборов и АПК. АПК показал хорошую устойчивость в работе и стабильность в выдаче результатов измерения. Для оценки влияния внешней температуры на ВОД и АПК был выполнен нагрев ВОД до температуры 60 °С, но повышение температуры не вызвало нарушения работы АПК, так как он имеет функцию корректировки «нуля» при повышении температуры ВОД.

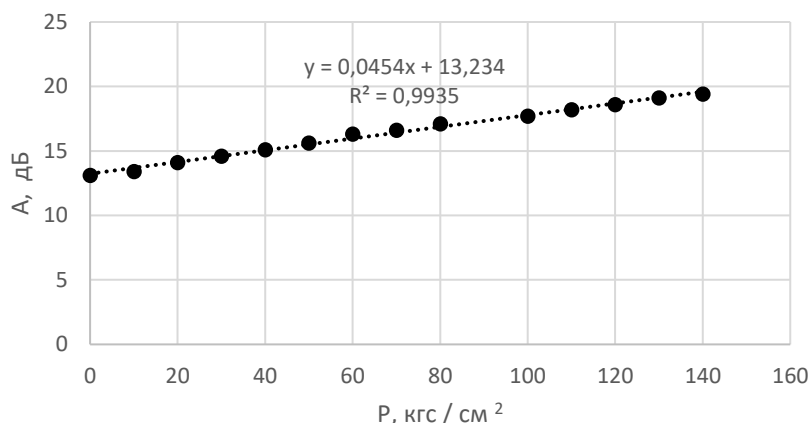


Рисунок 72 – График зависимости дополнительных потерь  $A$  от величины нагрузки, приложенной к балке при длине волны 1550 нм.

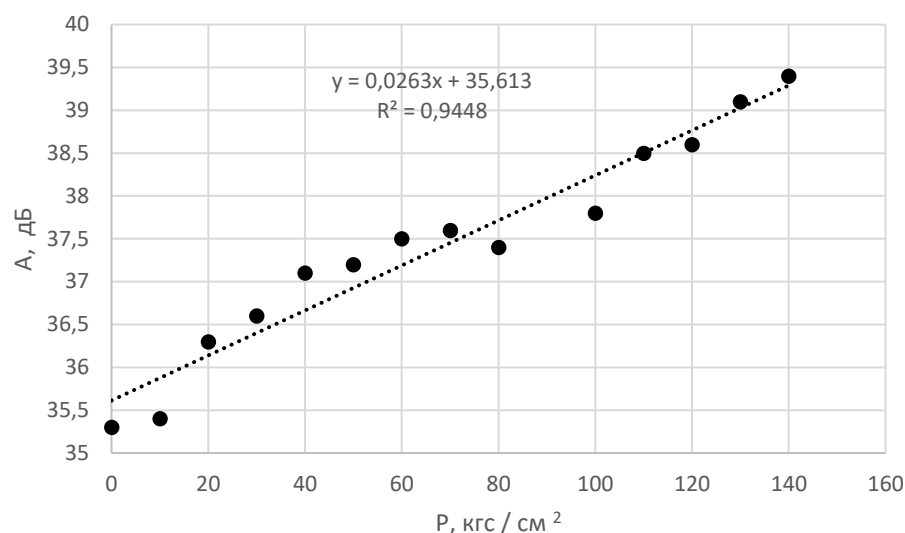


Рисунок 73 – График зависимости дополнительных потерь  $A$  от величины нагрузки, приложенной к балке при длине волны 650 нм.

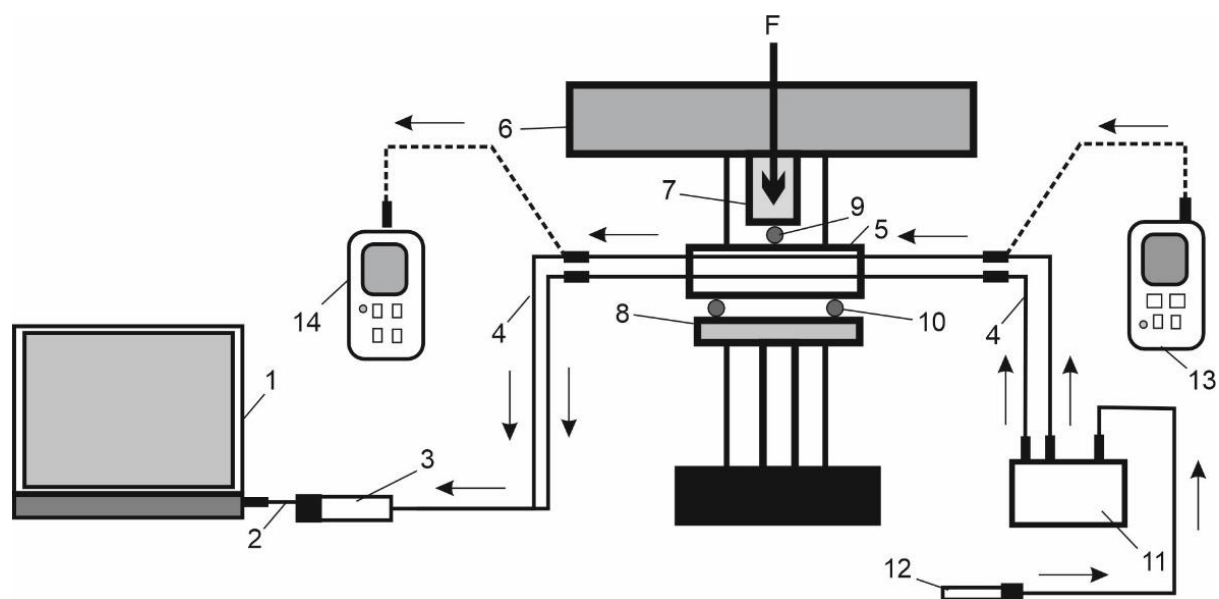
Из графиков видно, что излучение длиной 1550 нм имеет меньшие дополнительные потери оптической мощности  $A$ , чем длина волны 650 нм, при том же уровне нагружения. Расхождение в показаниях ВОД составило менее 5 %. Балки доводились до полного разрушения, но вот ОБ в 90% случаев оставалось в неповрежденном виде и сохраняло способность пропускать световую волну.

### 3.6 Исследование балок с волоконно-оптическими датчиками по схеме №4 при их нагружении с помощью гидравлического пресса МИИ–100

Были проведены лабораторные испытания железобетонных балок по схеме, представленной на рисунке 74. Был проведен двухопорный изгиб балки при помощи испытательной машины МИИ–100 (производства бывшего СССР, заводской номер 239). Данная испытательная машина используется для проведения строительных материалов в лабораторных условиях для определения предела прочности на изгиб в единицах измерения кгс/см<sup>2</sup> образцов бетонных и железобетонных балок (ГОСТ 310.4-81). Скорости нарастания нагрузки 5 кгс / сек. Рабочий диапазон нагрузок от 20 до 100 кгс / см<sup>2</sup>. Цена деления измерительного прибора 0,1 кгс / см<sup>2</sup>, погрешность не более 1 %. Приборы для калибровки АПК при испытаниях балок на машине МИИ–100 показаны на рисунке 10 В, Приложение В.

Эксперимент проводился аналогично ранее рассмотренной схеме на рисунке 69, но отличием является использование испытательной машины МИИ–100, которая в отличие от пресса ПГИ–500 формирует изгиб балки, а не ее сжатие. Конструкция рабочего органа МИИ–100 устроена так, что палка лежит на двух цилиндрических опорах, а третья давит на нее сверху точно в центре. Нагрузка постепенно нарастает до момента, когда материал преодолевает предел сопротивления изгибу и балка разрушается. Внутри балки расположены два ВОД,

которые воспринимают нагрузку и соответственно выдают увеличение дополнительных потерь при увеличении нагрузки по линейному закону.



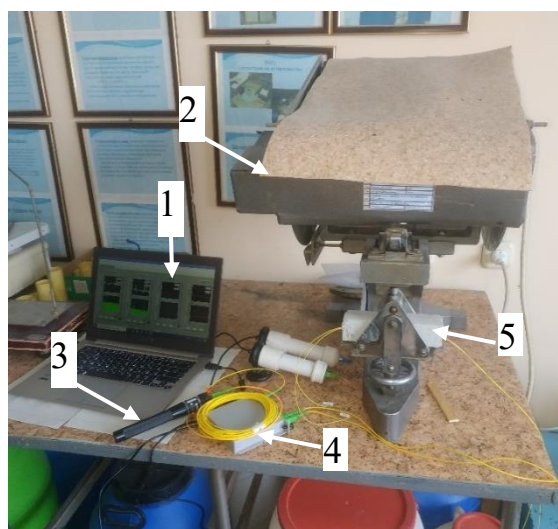
1 – персональный компьютер с АПК; 2 – кабель USB; 3 – блок обработки данных с фотоприемником и микропроцессором; 4 – ВОД; 5 – балка с ВОД; 6 – МИИ–100; 7 – подвижная плита; 8 – неподвижная плита; 9 – воздействующий стержень; 10 – стержни нижней опоры; 11 – оптический разветвитель; 12 – источник излучения 650 нм; 13 – источник излучения 1310-1550 нм; 14 – измеритель оптической мощности.

Рисунок 74 – Схема испытаний балок с использованием машины МИИ–100

Как и в случае, рассмотренном ранее с использованием пресса ПГИ–500 (рисунок 70), луч проходил от источника излучения через ВОД, который размещался в теле балки до фотоприемника, после чего полученные данные обрабатывались АПК. В этом соблюдается полная идентичность, так как источник света, балка, ВОД и фотоприемник с процессором. Отличием является использование другой машины для создания нагрузки на балку и формирования изгиба, а не равномерного сжатия. В данном эксперименте, так же, как и в предыдущем, контролировались дополнительные потери оптической мощности, которые росли по мере увеличения нагрузки на балку, а значит, и на сам ВОД непосредственно. ОВ, находящееся внутри балки, подвергалось микроизгибы, который в свою очередь вызывал фотоупругий эффект. Как сказано ранее, АСК представляет собой АПК и ВОД. В схему измерения включен персональный компьютер 1, на котором установлен четырехканальный АПК. Функция АПК окончательная обработка данных и вывод численных значений измеряемой величины, в данном случае, измерялись дополнительные потери оптической мощности. Так как схемы, представленные на рисунках 70 и 74 работают аналогично, содержат одинаковые оптические элементы и производят одинаковые

измерения, можно только подчеркнуть их различия. Схемы также имеют одинаковый принцип работы и их измерения при использовании испытательной машины для разрушения балок. Поэтому для понимания принципа работы схемы на рисунке 74 можно обратиться к описанию предыдущей схемы, но имеются незначительные отличия схемы, так как используется иная испытательная машина – МИИ–100, а не ПГИ–500, то балка размещалась на неподвижной плите 8, на которой находилось два стержня нижней опоры, а сверху на нее давила подвижная плита 7, но воздействие на балку оказывал стержень 9. Длина световой волны, излучаемая лазером 12, составляла 650 нм. Аналогично схеме, рассмотренной на рисунке 70, в измерениях источника излучения лазером 13 с длиной 1310 и 1550 нм и измеритель оптической мощности 14. Стрелками показано движение световой волны по ОВ. Соответственно в эксперименте одновременно использованы два ВОД и источники с различной длиной: 650; 1310; 1550 нм. Это позволило исключить ошибки в измерениях и путем корреляции получить более точные значения, в сравнении если бы использовался один ВОД. Расхождение в показаниях ВОД составило менее 5 %.

Данная схема позволяет создать изгиб балки и исследовать реакцию ВОД в случае изгиба балки. Все показания, связанные с нагружением балки, отображались на измерителе МИИ–100. Луч от источника излучения, которым являлся полупроводниковый лазер 12, разделялся в пропорции 50/50 и подавался в оба ВОД одновременно. Луч лазера разделялся на два независимых ВОД при помощи оптического разветвителя типа PLCM-1U2U-SC. Балки доводились до полного разрушения, но вот ОВ в 90% случаев оставалось в неповрежденном виде и сохраняло способность пропускать световую волну. Защитная оболочка вокруг ОВ играет положительную роль в обеспечении целостности ОВ и позволяет ВОД продолжать свою работу при образовании трещины в железобетонной конструкции, которой может быть фундамент. На рисунке 75 показана фотография испытательной машины МИИ–100.



1 – персональный компьютер с АПК; 2 – МИИ–100; 3 – источник излучения;  
4 – оптический разветвитель; 5 – балка с ВОД.

Рисунок 75 – Испытание балок с помощью машины МИИ–100

В процессе испытаний балки были разрушены, но ОВ, находящееся внутри балки, осталось не поврежденным и не разорванным. На рисунке 76 представлены железобетонные балки после разрушения, видно, что балки имеют раскрывшуюся трещину, но при этом балки не разделились, так как между их частями осталась связь за счет арматурных стержней и ОВ.

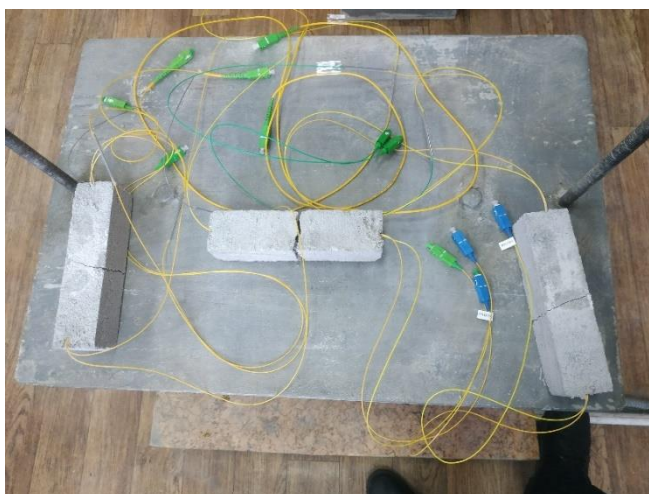


Рисунок 76 – Образцы железобетонных балок после разрушения

Из графиков видно, что излучение длиной 1550 нм имеет меньшие дополнительные потери оптической мощности  $A$ , чем длина волны 650 нм, при том же уровне нагружения. Расхождение в показаниях ВОД составило менее 5 %. Балки доводились до полного разрушения, но вот ОВ в 90% случаев оставалось в неповрежденном виде и сохраняло способность пропускать световую волну.

Результаты экспериментов представлены на рисунках 77-79 графиками зависимости дополнительных потерь  $A$  от величины нагрузки, приложенной к балке при длине волны 650; 1310; 1550 нм.

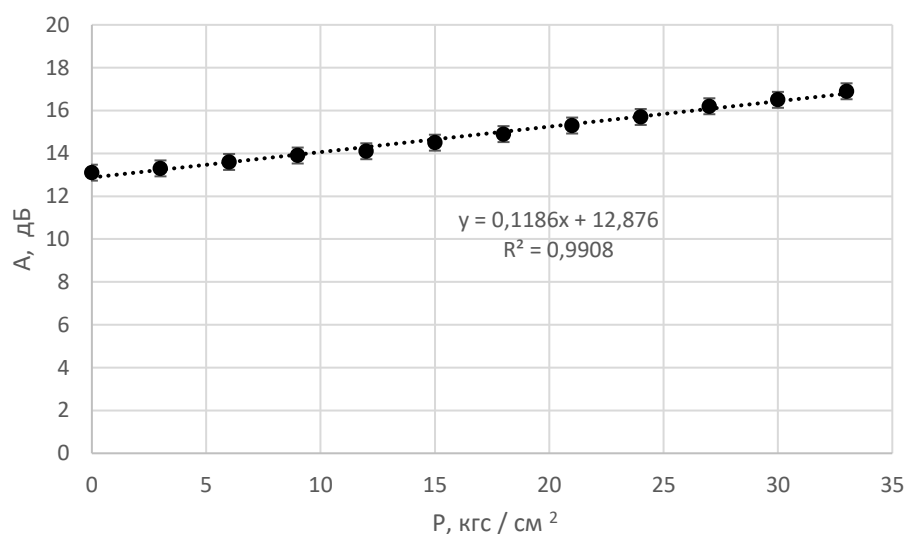


Рисунок 77 – График зависимости дополнительных потерь  $A$  от величины нагрузки, приложенной к балке при длине волны 1310 нм.



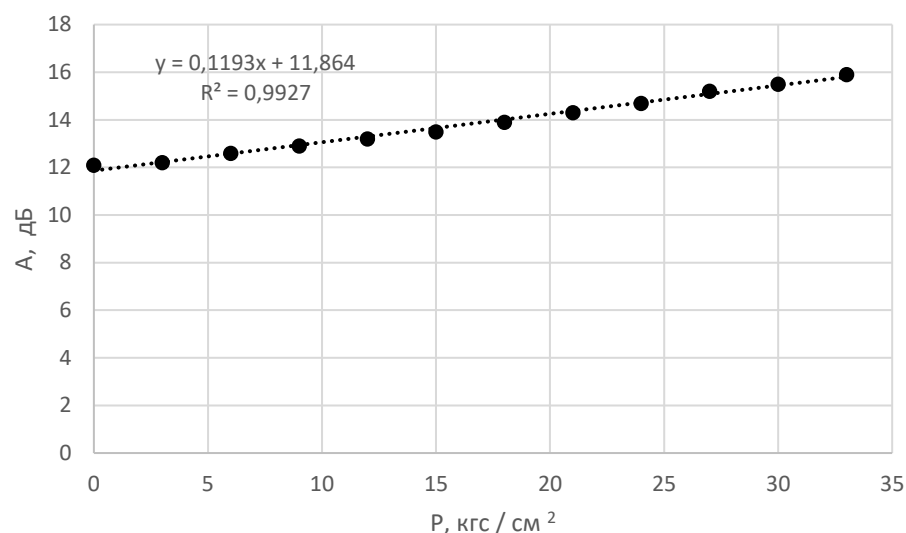


Рисунок 78 – График зависимости дополнительных потерь  $A$  от величины нагрузки, приложенной к балке при длине волны 1550 нм.

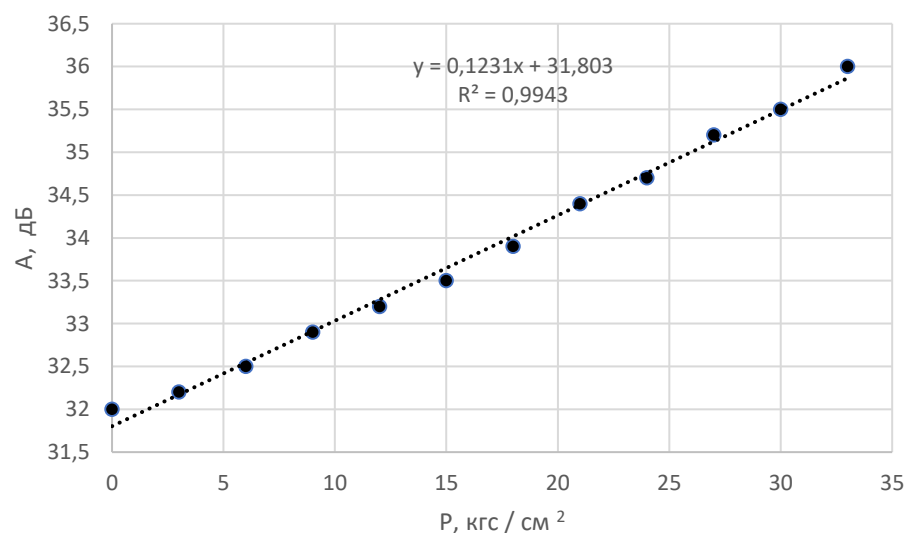


Рисунок 79 – График зависимости дополнительных потерь  $A$  от величины нагрузки, приложенной к балке при длине волны 650 нм.

### Выводы по главе 3

1. Подробно рассмотрены материалы и методы, которые были использованы при проведении натуральных экспериментов. При проведении исследований использовались лазеры с различной длиной волны 650, 850, 1310, 1550 нм. Излучение проходило по ОВ и падала на поверхность фотоприемника. Фотоприемник преобразовывал световой сигнал в электрический, а далее уже работало устройство обработки и вывода данных. Установлено, что при механическом воздействии на железобетонную балку возникали деформации, которые передавались ОВ, которое в свою очередь подвергалось микроизгибу.

Проходящее излучение меняло свои свойства и в первую очередь фазу распространения и интенсивность. Все изменения параметров световой волны были зафиксированы фотоприемником.

2. Численное исследование и обработка данных выполнены с помощью программ Wolframalpha и Microsoft Excel, которые способны производить обработку результатов экспериментов и строить аппроксимации различных видов, а также способны работать с массивами данных.

3. Световое пятно, сформированное на поверхности фотоматрицы, по своей форме схоже с известным пятном Пуассона и описывается законом нормального распределения Гаусса. Сердцевина данного пятна достаточно яркая, а вот оболочка более темная, имеется также граница раздела между оболочкой и сердцевиной. Можно отметить, что фотоматрица фиксирует в том числе и изменение интенсивности светового пятна, так как при механическом воздействии на ОВ возникает микроизгиб, при этом часть световой волны покидает сердцевину ОВ и попадает в оболочку, а также совсем покидает ОВ. При этом возникают дополнительные потери оптической мощности, которые можно зафиксировать. Механическое воздействие на ОВ приводит к возникновению дополнительных потерь и изменению интенсивности, что фиксируется АПК.

4. Установлено, что оптический рефлектометр необходим для более точного определения места повреждения железобетонного фундамента, его разрешающая способность составляет 1 метр при протяженности измерительного канала до 30 км, а при соответствующем развитии доработки можно выйти на уровень 0,1 метра при дистанции до 100 км, что не выходит за пределы измерения рефлектометра.

5. АПК определяет расстояние до места повреждения фундамента достаточно грубо, так как он работает с квази-распределенным ВОД, при этом фундамент или протяженный объект разделяется на зоны с длиной от 5 до 500 метров, поэтому АПК имеет предел в разрешающей способности 5 метров при максимальной протяженности фундамента 160 метров, что соответствует максимальному значению зон, равному 32.

6. На экране оптического рефлектометра были отражены все изменения параметров дополнительных потерь при давлении на ВОД в режиме реального времени и режиме усреднения данных. При разрушении балки наблюдался незначительный всплеск и увеличение дополнительных потерь, что было зафиксировано на рефлектометре.

7. Испытания образца АСК показали достаточно высокую надежность срабатывания для квази-распределённого ВОД, при воздействии на одну из трех зон 1-3, и точность определения зоны, где сформировалась трещина. Вероятность срабатывания составила 0,86. Ошибка в срабатывании составляет в пределах 14%. В дальнейшем будет повышена вероятность срабатывания до 0,9, при снижении вероятности ложного срабатывания до 0,1.

8. Испытания образца АСК показали достаточно высокую надежность срабатывания, распределённого ВОД, который способен определить расстояния до места разрушения и формирования трещины с точностью до 1 м. Значение вероятности срабатывания составило 0,82. Ошибка в срабатывании составляет в

пределах 18%. В дальнейшем будет повышена вероятность срабатывания до 0,9, при снижении вероятности ложного срабатывания до 0,1.

9. АПК работал с источником излучения с длиной волны 650 нм, это вызвало большие дополнительные потери в ОВ, но при этом фотоприемник имеет меньшую стоимость, чем фотоприемник, работающий на длине волны 1310 и 1550 нм. Так как длина железобетонного фундамента обычно не превышает значения 1-3 км, то выгоднее перейти на длину волны 650 нм, так как лазеры, фотоприемник и другое оптическое оборудование будут значительно дешевле. Для протяженных объектов длиной более 30 км необходимо использовать распределенный ВОД, работающий на длине волны 1310 – 1550 нм.

10. Температура в помещении лабораторий при проведении экспериментов практически не менялась и колебалась в пределах 1-2 °С, что не повлияло на работу контрольно-измерительных приборов и АПК. АПК показал хорошую устойчивость в работе и стабильность в выдаче результатов измерения. Для оценки влияния внешней температуры на ВОД и АПК был выполнен нагрев ВОД до температуры 60 °С, но повышение температуры не вызвало нарушения работы АПК, так как он имеет функцию корректировки «нуля» при повышении температуры ВОД.

АПК показал достаточно высокую линейность при измерениях. Установлено, что излучение длиной 1550 нм имеет меньшее значение дополнительных потерь  $A$ , чем длина волны 650 нм, при том же уровне нагружения. Расхождение в показаниях ВОД составило менее 5 %. Балки доводились до полного разрушения, но вот ОВ в 90% случаев оставалось в неповрежденном виде и сохраняло способность пропускать световую волну.

#### **4 АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ**

В данной главе будут рассмотрены вопросы, касающиеся разработки АПК контроля технического состояния СЖК на основе ВОД. АПК является частью АСК, к нему подключаются ВОД, этим образуется единая система контроля. АСК может контролировать техническое состояние любых СЖК зданий и сооружений, к которым можно отнести фундаменты, мосты, путепроводы, тоннели, плотины, насыпи и иные протяженные объекты. АСК способна не только контролировать техническое состояние любых СЖК зданий и сооружений, но и отслеживать перемещение грунта насыпей или платин. По данной диссертации имеются публикации статей [151-160] и патентов [161-162], изучив которые можно получить полное представление о предлагаемой АСК и АПК, также можно понять основные преимущества распределённых или квази-распределённых ВОД и многое другое, что касается их работы. Так как ВОД располагаются внутри объекта контроля, то перемещение горной породы или грунта тоже можно контролировать при помощи АСК. АСК может быть использована не только для железобетонных фундаментов, но и для контроля целостности грунтовых оснований, например, можно обнаружить подмыв основания фундамента, что немаловажно, так как это в дальнейшем вызовет разрушение самого фундамента. Для этого АПК оснащен не только измерительной частью, но и сигнализацией, которая контролирует изменение в короткий промежуток времени резкое параметров контролируемого объекта. В настоящей диссертации рассматривается только контроль технического состояния СЖК, а именно фундаментов, что крайне необходимо для модернизации существующей базы дефектоскопии. Использование ВОД позволит вывести дефектоскопию и раннюю диагностику на новый оптический и цифровой уровень развития. Как сказано ранее, у строителей достаточно ограниченные возможности по проведению постоянного мониторинга при помощи распределённых или квази-распределённых датчиков. Контроль технического состояния СЖК проводится с помощью ручных или переносных средств дефектоскопии, реперов, маяков, тензодатчиков и др. Проводится визуальное и инструментальное наблюдение с участием инженеров и геодезистов, которые используют ряд специфических приборов, позволяющих выполнять геодезические работы. Иногда человеческий фактор влияет на качество контроля за техническим состоянием СЖК, случаются ошибки и упущения, которые впоследствии приводят к аварийным ситуациям. Еще одной проблемой наблюдения и осмотра с участием человека является то, что не всегда есть доступ к СЖК, например, часть фундамента скрыта под грунтом. Тогда приходится производить земляные работы и удалять часть грунта, делать так называемые шурфы. Это занимает достаточно много времени на подготовку при выполнении осмотра. Бывают ситуации, когда СЖК полностью не доступна к осмотру, тогда можно строить только прогнозы о ее фактическом состоянии. Конечно, не всё так плохо и безнадежно в строительной отрасли с методами и средствами контроля

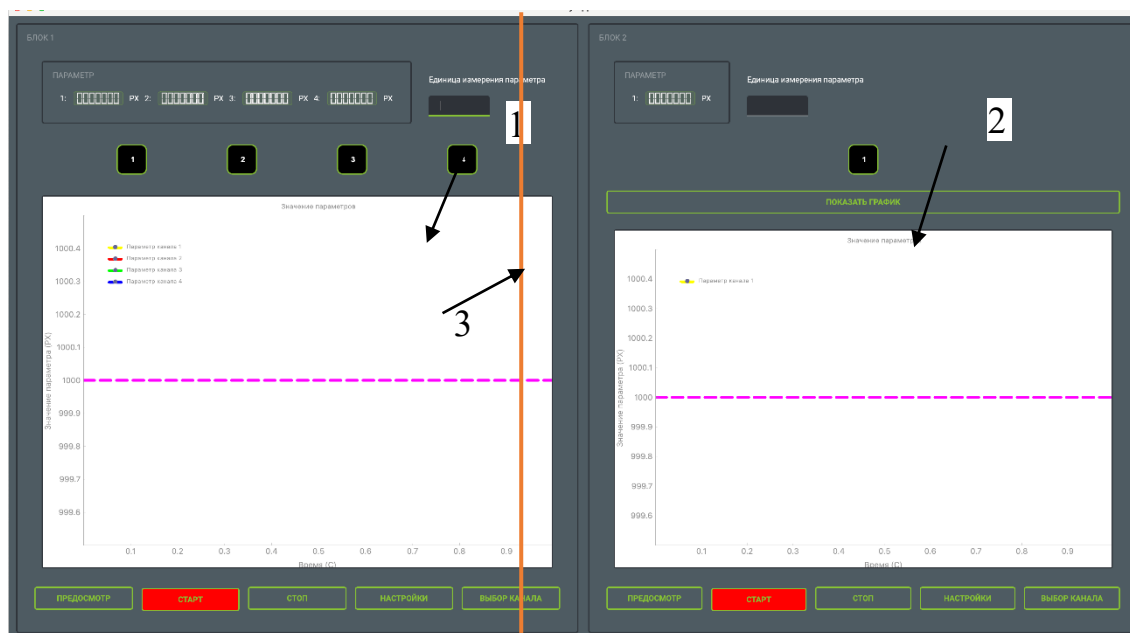
технического состояния СЖК, но они во многом сложны, неудобны и финансово затратные при практической реализации на реальных объектах. Во-первых, нужно отметить, что в контроле участвует человек, он принимает решения на основании своих суждений, уровня знаний и квалификации, поэтому не исключается ошибка или упущение в его работе. Во-вторых, выпускаются различные средства диагностики и контроля, соответственно уровень качества и точности их различный. Опасность внезапного обрушения здания или сооружения несет риски для жизни и здоровья персонала, сохранности оборудования и приводит к существенным финансовым затратам. Поэтому формируется естественная потребность в недопущении указанных проблем. Частично эту задачу можно решить за счёт внедрения АСК с распределёнными и квази-распределёнными ВОД, а также интеллектуальным АПК для обработки данных. В-третьих, уровень квалификации специалистов различный, что в свою очередь может отразиться на качестве контроля и диагностики, специалисты высокого уровня не бывают в достаточном количестве, а на их подготовку уходят годы. В-четвёртых, весь контроль, выполняемый человеком, является периодичным, согласно графику работы, утверждённому на определенный период времени или разово, на основании необходимости вне утвержденного графика, могут быть иные ситуации, которые послужили поводом для выполнения указанных работ. Эта ситуация складывается из-за отсутствия методов и средств постоянного мониторинга СЖК в режиме реального времени. В последнее время на рынке можно приобрести отдельные тензодатчики для точечного определения аварийно-опасных зон с трещинами. Примеры уже были приведены в первой главе, но данные системы контроля выполняют измерения только в одной точке СЖК, соответственно для контроля всего фундамента, тензодатчиков нужно будет сотни штук, что будет просто финансово неприемлемо, так как один датчик «Автограф» и его аналоги стоят в пределах 50–80 тысяч рублей, и это только датчик без микропроцессорного блока обработки данных и медного кабеля. При этом имеется ограничение по длине медного кабеля в 500-800 метров. Протянуть медный кабель к каждому тензодатчику будет весьма затратно, не нужно забывать о проблемах его сохранности и целостности в условиях реального строительства. Энергозатраты при использовании систем контроля с медными кабелями, по которым передаются электрические сигналы, будут намного выше, чем у ВОД. Если рассмотреть стоимость ОВ и медного кабеля, то ОВ явно выигрывает со значительной разницей в стоимости. При этом ОВ не чувствительное к электромагнитным помехам, а это важно в условиях в условиях реального строительства, где могут создаваться данные помехи при работе различного оборудования. В-пятых, при помощи тензодатчиков невозможно создать распределённую и квази-распределённую систему контроля, а вот ВОД подходят для этого идеально. В-шестых, тензодатчики «Автограф» и его аналоги, размещаются только на поверхности СЖК или, можно сказать, на ее боковых гранях, а ВОД, напротив, может быть встроен непосредственно внутрь СЖК или также быть размещенным на боковой поверхности СЖК, как размещается тензодатчик. Для электрического тензодатчика недостижимо быть

распределенным, так как отдельных датчиков понадобится сотни или тысячи на протяженный участок. Здесь даже не рассматривается проблема коммутации при помощи медных кабелей, общая стоимость и энергозатраты — это техническая проблема, которую невозможно решить с учетом возможностей ВОД. Только ВОД имеет возможность быть распределённым и квази-распределенным, а также точечным средством контроля, что существенно расширяет границы и возможности его применения в условиях реального строительства. АСК, имеющая АПК, способный работать с распределёнными и квази-распределенными ВОД, является средством ранней диагностики повреждения СЖК, что позволяет на раннем этапе контролировать аварийно-опасные зоны, в которых формируются усталостные трещины, так как предшественником является изменение картины НДС и формирования концентраторов напряжения. Контроль зон концентрации напряжений является весь важным обстоятельством, так как участок или место, где могут образоваться трещины, можно точно установить. Это позволит инженерам принять меры для недопущения аварии или, по крайней мере, знать об опасности и выполнять какие-то контрдействия. Естественно, тензодатчики не могут быть средством ранней диагностики по своему принципу и сути. Нельзя с приемлемой вероятностью определить место будущего разрушения СЖК и заранее установить тензодатчики для контроля процесса формирования трещин. Тензодатчики устанавливаются только на место уже сформировавшейся трещины и служат для автоматического контроля ее развития. Здесь прослеживается различие принципа действия тензодатчиков и распределённых или квази-распределенных ВОД.

Процесс создания АПК и самой АСК был растянут во времени и занял несколько лет. В данной диссертационной работе сначала будет рассмотрен АПК с распределённым и квази -распределенным ВОД, а после будет приведена версия АПК только с квази -распределенным ВОД, которая являлась первоначальным истоком и прототипом. Автором данной диссертационной опубликован ряд статей в отечественных и зарубежных журналах [151-160], а также имеются патенты [161-163] и выступления на научных конференциях с докладом для апробации результатов исследования [163-168], которые содержат достаточно информации для понимания принципа работы предлагаемого АПК как последней, так и первоначальной версии. В научных публикациях и патентах [151-167] отражен ряд важных, моментов касающихся принципа работы АПК его настроек и возможностей, но и отражены вопросы совершенствования его работы и поиска новых технических решений, направленных на улучшение предлагаемого средства автоматического контроля, работающего в режиме реального времени. В процессе подготовки данной диссертационной работы первоначально выдвинутые гипотезы были проверены на практике, затем шел процесс модернизации и совершенствования АПК для достижения наилучшего результата его работы [151-168]. Исключать первоначальную версию АСК, созданной на базе АПК только с квази-распределенным ВОД, нет смысла, так как эта система, во-первых, послужила прообразом и основой последней версии АПК с распределённым и квази -распределенным ВОД, который состоит уже не из

одного, а двух независимых блоков. АПК с квази-распределенным ВОД основан на интеллектуальном оптико-электронном анализе изменения параметров светового пятна, падающего на поверхность фотоприемника высокого разрешения, и способен контролировать только определенную зону, границы которой могут быть от нескольких до сотен метров. Усовершенствованный и модернизированный АПК будет обозначен №1. АПК №1 имеет много общего с прототипом, который обозначим АПК №2 как более ранний вариант, но отличается от него наличием второго блока, который, предназначен для работы с распределенным ВОД. Так как используется распределенный ВОД, тоже используется метод оптической рефлектометрии. Об этом уже говорилось в главе 3. Усовершенствование последней версии будут представлено ниже. Также будет подробное объяснение функций АПК и его настроек. Как сказано ранее, рассмотрена сначала будет более поздняя версия АПК, а затем более ранняя.

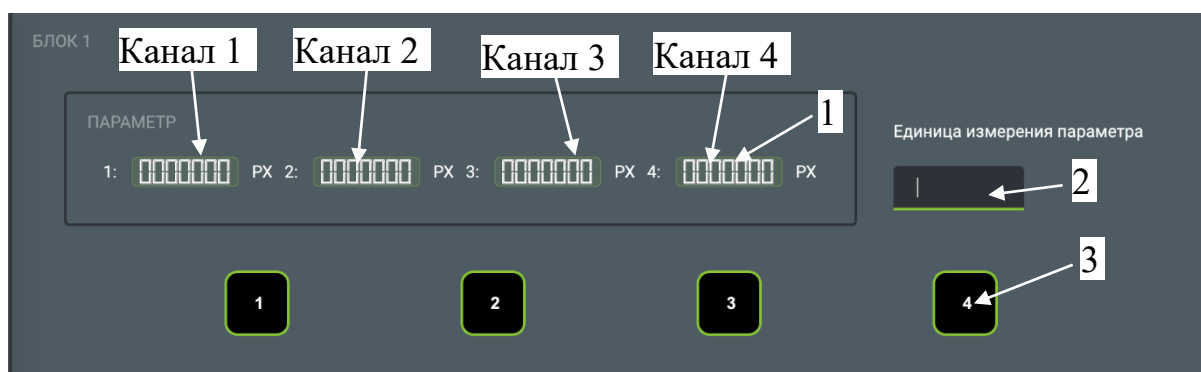
Интерфейс АПК №1 представляет собой главное окно (рисунок 80), как сказано ранее, АПК №1 имеет два независимых блока.



1 -блок 1; 2 – блок 2; 3- граница разделов блоков АПК  
Рисунок 78 – Окно АПК №1

АПК №1 в блоке1 имеет четыре независимых измерительных канала, к которым подключены четыре квази-распределенных ВОД, разрешающая способности колеблются в широких пределах от 5 до 500 метров в зависимости от настроек и поставленных задач по контролю технического состояния СЖК. Зона контроля соответственно может быть протяженностью от 5 до 500 метров. В диссертации рассматривается четырехканальная версия, но возможно увеличение каналов до 32. Блок 2 содержит только один измерительный канал, к которому подключен один распределенный ВОД. При необходимости количество каналов можно расширить за счёт увеличения количества портов рефлектометра и достаточно серьезного усложнения аппаратной и программной части. Для этого

понадобится автоматический оптический коммутатор, который будет переключать рефлектометр на каждый канал через определенный промежуток времени. Соответственно рефлектометр будет подключен к каждому распределенному ВОД по очереди и на короткий срок. Вторым вариантом будет использование не одного, а нескольких оптических рефлектометров. Помимо усложнения аппаратно-программной части, это многократно увеличит стоимость самой АСК. Все измерения производит блок 1, это основной орган контроля технического состояния СЖК, а блок 2 нужен в большей мере для определения точного места расположения поврежденного участка СЖК с точностью до 1 метра, тогда достаточно использования одного распределенного ВОД. Каждый блок содержит своё меню для настройки и управления его работой. АПК №1 и №2 работают в режиме реального времени, а все данные хранятся на жёстком диске компьютера и при необходимости могут быть востребованы. Также хранятся все события, связанные с сигнализацией, которая срабатывает при резком изменении НДС вследствие изменения нагрузки на фундамент. Сигнализация также может контролировать сейсмическое воздействие на СЖК. На рисунке 81 изображен модуль измерения, который показывает изменение количества пикселей в зависимости от приложенной нагрузки на ВОД.



- 1 - отображение численного значения измеряемого параметра;  
 2 – наименование единицы измерения; 3 – индикатор сигнализации.

Рисунок 81 – Модуль измерения, блок 1

На рисунке 81 представлены единицы измерения пиксели, но их можно заменить на иные, программа автоматически производит корректировку их соотношений и размерностей. Для измерения единиц измерения разработан программный алгоритм, используемая единица измерения как пиксель была необходима для построения графиков зависимости. Каждый канал имеет численное отображение измеряемой величины, запятая устанавливается автоматически. Каждый канал имеет индикаторы сигнализации опасной ситуации и представлен черными квадратами с цифрами 1–4, что соответствует числу каналов АПК №1. Индикаторы 1–4 показывают статус канала: зеленый – работает, красный – опасная ситуация. Красный индикатор загорается при резком всплеске и увеличении параметров, когда количество зарегистрированных срабатываний (детекции толчков), пришедших подряд за установленный отрезок времени, повысил заданный порог уставки АПК №1.





Рисунок 82 – Имитация работы сигнализации

На рисунке 82 показана имитация работы сигнализации, когда подряд было несколько мощных импульсных воздействий на три ВОД блока 1 и один ВОД блока 2. Разность настроек ВОД третьего канала не позволила сигнализации сработать, так как чувствительность ВОД была намеренно снижена. Четвертый канал был настроен немного иначе и его чувствительность была немного выше, чем у третьего канала, поэтому его сигнализация тоже сработала. Срабатывание сигнализации полностью зависит от настройки чувствительности канала и других параметров.

В блоке 2 рефлектметр тоже выполнил идентификацию механического воздействия, но настройка порога его сигнализации была завышена больше, чем у каналов блока 1. Воздействие зафиксировано всеми каналами без исключения, но сработали сигнализации не всех каналов, только те у которых был превышен порог срабатывания. Отдельно можно показать экран блока 1, на котором отображаются кривые изменения пикселей каждого канала с течением времени (рисунок 83). Изменение картины пикселей сопровождается изменением свойств проходящей световой волны по сердцевине ОВ, которая падает на поверхность фотоматрицы имеющей высокое разрешение. При механическом воздействии на ВОД в нем возникает фотоупругий эффект, что влечет за собой изменения коэффициента преломления. Как сказано в главе 3, любое механическое воздействие на ОВ вызывает различный по паромерам микроизгиб, который приводит к изменению свойств световой волны и светового пятна, падающего на поверхность фотоприемника. Меняется интенсивность световой волны и возникают дополнительные потери. В главе 3 уже сказано, что чем выше нагрузка на ВОД, тем больше белых пикселей формируется.

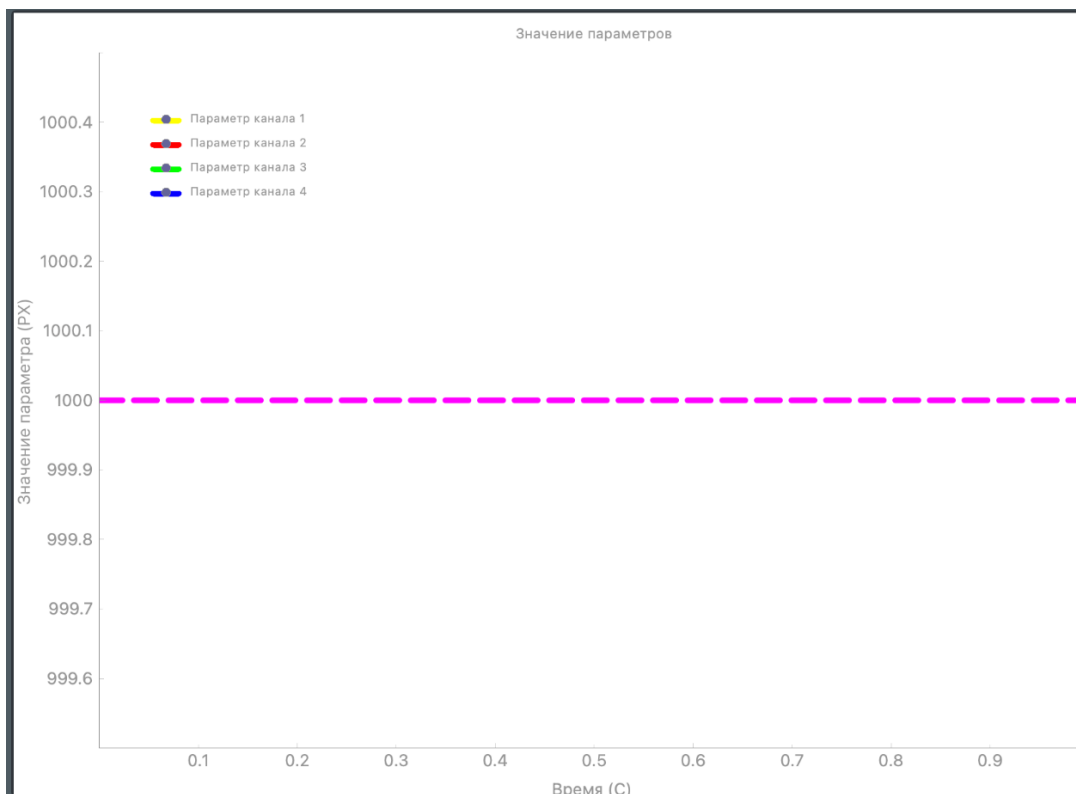


Рисунок 83 – Экран блока 1

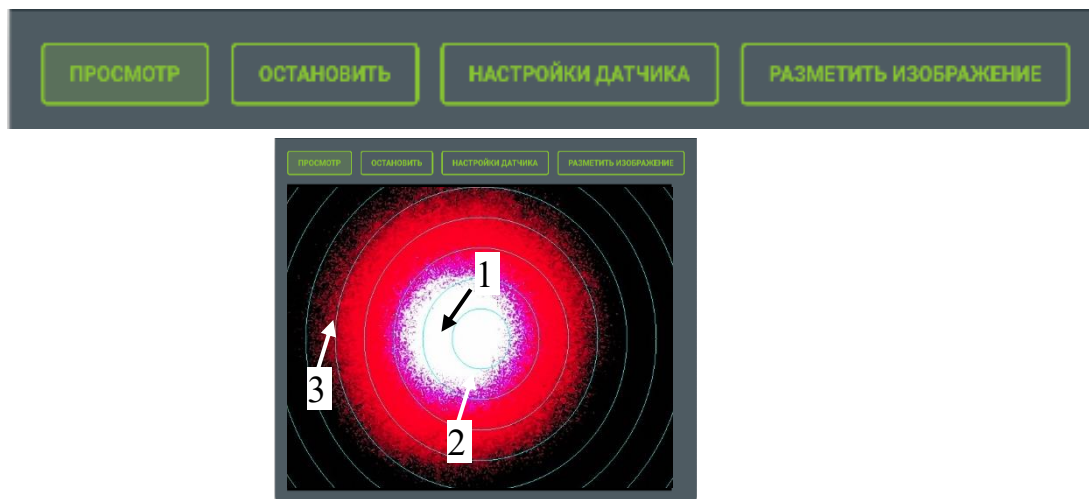
Каждый блок имеет одинаковый модуль настройки, где имеется набор функциональных кнопок для настройки и управления программой (рисунок 84)



Рисунок 84 – Модуль настройки

Модуль настройки содержит пять функциональных кнопок, при нажатии на которые открываются различные окна, в которых можно выполнить необходимые для работы АПК №1 настройки. При нажатии на кнопку «Предпросмотр» можно увидеть изображение с выбранной фотоматрицы для калибровки позиции светового пятна. На рисунке 85 показаны кнопки настройки всплывающего окна при активации функции «Предпросмотр», также показано изображение светового пятна, оно было детально рассмотрено в главах 2 и 3. Если нажать виртуальную клавишу «Остановить», то это будет выходом из данного меню настроек фотоматрицы высокого разрешения. Для настройки параметров светового пятна нужно нажать виртуальную клавишу «Настройка датчика», здесь можно настроить параметры: яркости, контрастности, оттенков цвета, насыщенности, гаммы, баланса белого цвета, частоты развертки и др. Если нажать виртуальную клавишу «Разметить изображение», то это позволит отцентрировать световое пятно, если оно будет смещено по кому-либо случаю, если данная настройка не решает

проблемы, нужно выполнить механическую настройку оптического коннектора вводного устройства. Световое пятно разделяется на три зоны, зоны распространения света по ОВ уже рассмотрены в главе 3. Наиболее яркая зона 1, это сердцевина, она наиболее яркая и неинформативная, она не используется в оптико-электронном анализе.



Зоны распространения света по ОВ: 1 –сердцевина; 2 –граница перехода между сердцевинной и оболочкой; 3 – оболочка.

Рисунке 85 – Кнопки настройки окна «Предпросмотр» и изображение светового пятна на экране монитора.

Следующая зона выявлена только при оптико-электронном анализе и не рассматривалась ранее, это граница раздела 2, где излучение переходит из сердцевинны в оболочку и теряется, выходя за пределы оболочки, но часть света продолжает двигаться по оболочке и достигает фотоприемника. Зона 3 является наиболее информативной и важной при оптико-электронном анализе, так как при механическом воздействии на ОВ часть световой волны выходит за пределы сердцевинны и переходит через границу раздела в оболочку, чем больше потери, тем больше по доли часть световой волны попадет в оболочку, тем больше будет белых пикселей на экране монитора после оптико-электронного анализа.

При нажатии на кнопку «Старт» АПК №1 запускается в работу и активизируется, индикаторы 1-4 меняют свой свет с черного на зеленый. Запускается алгоритм обработки данных и приходит информация об изменениях параметров светового пятна. Запускается отображение кривых на графике центрального окна блока 1. На рисунке 86 показано, что АПК запущен в работу и процесс контроля технического состояния СЖК при помощи ВОД начат.



Рисунок 86 - АПК запущен в работу

Если нажать кнопку «Стоп», то работа АПК №1 и ВОД прекращается. Индикаторы 1-4 сменяют свой цвет с зеленого на черный. Это означает, что АПК выведен в режим настройки или просто отключен при необходимости, например для проведения ремонтных работ. Следующей кнопкой является активация настройки АПК. Настройку АПК может выполнить оператор самостоятельно, если имеет соответствующие навыки, так как некорректная настройка вызовет сбой в работе АПК. Вывести АПК из строя, сбив настройку невозможно. Конечно, разработчик имеет больше навыков в настройке АПК. Для эксплуатации АПК в условиях реального здания или сооружения, на котором осуществляется мониторинг, сопряжена с рядом обстоятельств, например, настройка и обучение АПК выполняется при монтаже, а затем по мере необходимости выполняется наладка по заранее запланированному графику. Выполнение настройки случайными лицами исключается, но инженер, ознакомившись с инструкцией вполне, может выполнить настройку АПК. Эксплуатация АПК не требует специальных навыков, так как вся информация выводится автоматически на экран монитора, а также может быть отправлена в виде сообщений в различные интернет – мессенджеры, например «Телеграмм». При нажатии кнопки «Настройка» всплывает окно, где имеются строки для ввода значений настройки. Настройка выполняется при выведенном из работы АПК. На рисунке 87 показаны стоки всплывающего окна при нажатии кнопки «Настройка». После введения необходимых для настройки параметров, нужно нажать кнопку «SAVE» для сохранения настроек.

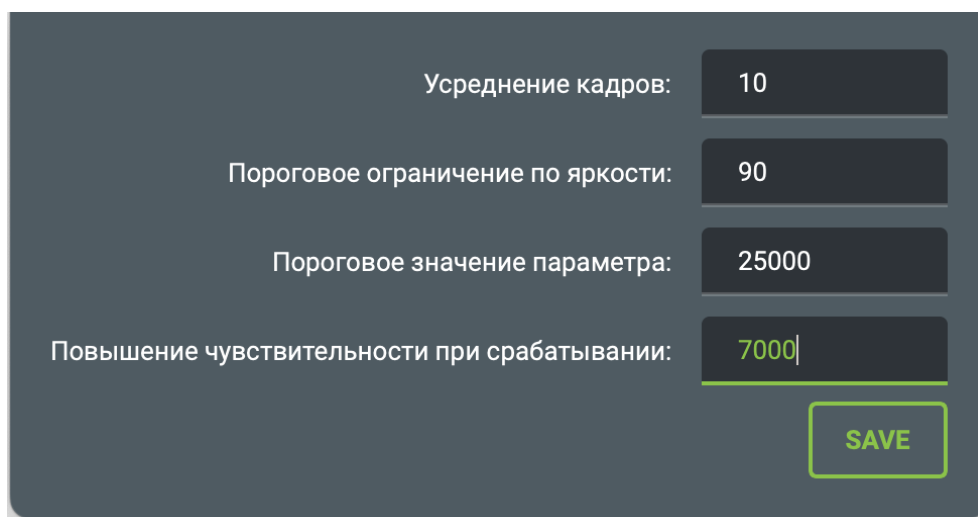


Рисунок 87 – Настройка АПК №2

Каждая строка настройки подробно рассмотрена по каждому параметру. Строка «Усреднение кадров» позволяет задать численное значение количества кадров, фиксируемого фотоматрицей в единицу времени. Количество кадров будет усреднено в одно изображение, данная операция выполняется АПК для снижения шумов, сформированных фотоматрицей. При увеличении численного значения по усреднению кадров, увеличивает время реакции детектирования параметров, приходящих от ВОД. Если учесть, что в среднем камера снимает 30 кадров в секунду, то при значении этого параметра, равном 10 кадрам, время операции займет  $10/30=1/3=0,33$  секунды на каждое получение изображения. Данный параметр напрямую влияет на чувствительность детекции и время реакции АПК. Следующая строка называется «Пороговое ограничение по яркости», оно тоже может задаваться численным значением. Этот параметр выражает значение цвета пикселя в градациях серого (от 0 до 255), при котором произойдет срабатывание при переходе пикселя из черного цвета в белый, это необходимо для подсчета изменений пиксельной картины светового пятна и выдачи численных значений измеряемой величины. Параметры настройки от 0 = черный до 255 = белый, при разнице 1-254 = оттенки серого. Данная настройка напрямую влияет на чувствительность детекции АПК. Далее идет настройка строки «Пороговое значение параметра». Это настройки численного значения порога срабатывания детекции движения и анализ количество белых пикселей, при превышении уставки загорается индикатор красного цвета. Последняя строка настройки называется «Повышение чувствительности при срабатывании». Здесь задается значение увеличения порога чувствительности на величину N, при регистрации изменения параметров в течение определенного отрезка времени. При отсутствии движения значение будет сброшено к исходному значению из поля «Пороговое ограничение по яркости».

Выбор канала позволяет выбрать фотоматрицу, которая подключена к ВОД и АПК для настройки каждого канала в отдельности. На рисунке 88 показаны строки всплывающего окна.

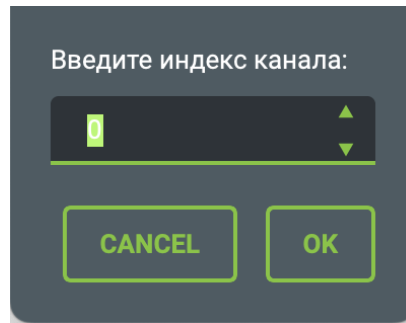


Рисунок 88 – Окно для выбора и настройки каналов

Блок 2 необходим для считывания информации с рефлектометра (рисунок 89), данный блок имеет аналогичные настройки и клавиши, как ранее рассмотренный блок 1. В отличие от блока 1 в блоке 2 только один измерительный канал и одна фотоматрица, которая контролирует изменение рефлекторами. Настройки данного блока аналогичные и уже были рассмотрены ранее при описании блока 1.

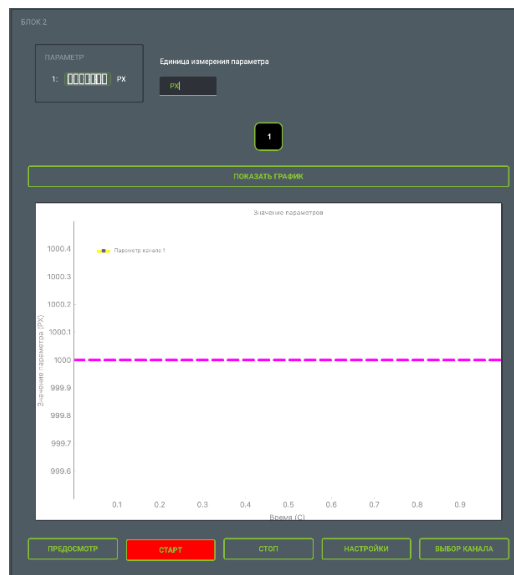


Рисунок 89 – Окно отображения графика изменения контролируемых параметров, блок 2

В блоке 2 имеется только один измеритель параметров и один индикатор, так как к измерительному каналу подключен только один ВОД. Измерительный модуль показан на рисунке 90.

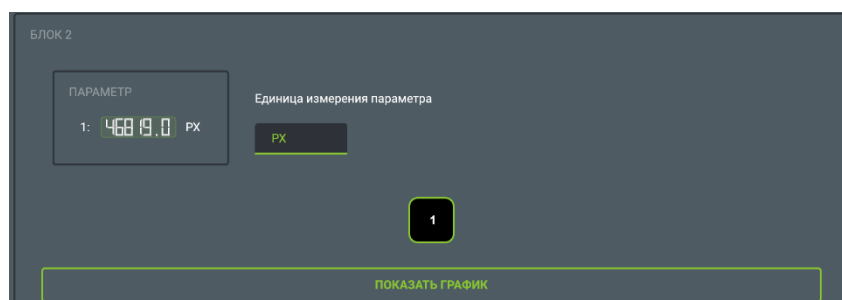


Рисунок 90 – Измерительный модуль, блок 2

Как сказано ранее, в блоке 2 имеются аналогичные настройки и индикаторы, но есть одно исключение, имеется кнопка «Показать график». При активации данной кнопки показывается график изменений рефлектограммы, которые возникают при воздействии на ВОД. Как изменяется рефлектограмма уже было сказано в 3 главе, но эти изменения возникают, когда распределенный ВОД подвергается нагружению, находясь в теле железобетонного фундамента. На рисунке 91 показаны рефлектограммы и отображения графика, показывающие изменения количества белых пикселей в течение определённого отрезка времени.

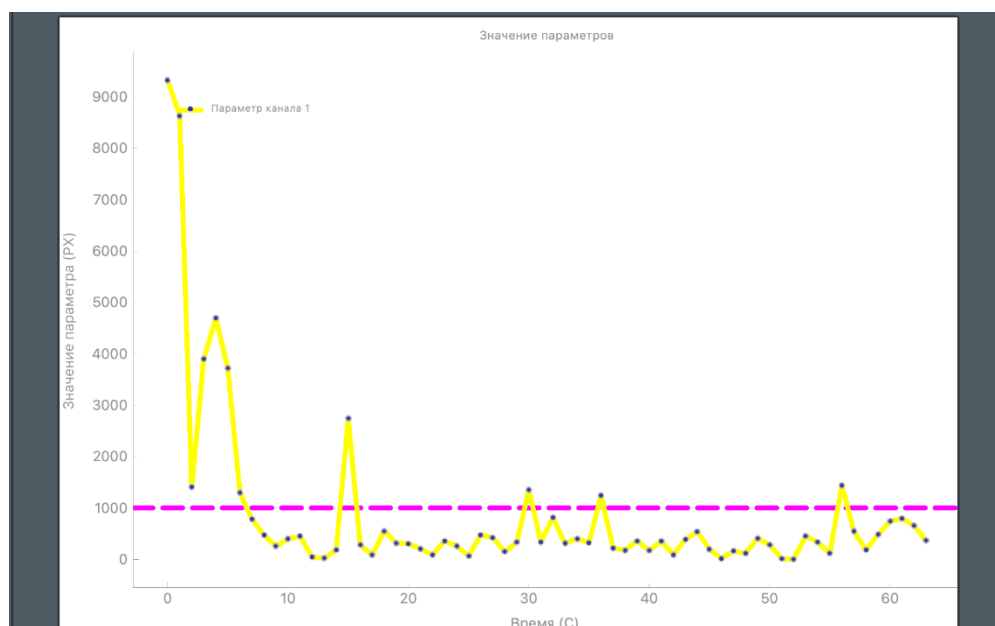


Рисунок 91 – Изменения рефлектограммы и отображения графика

Если отжать кнопку «Показать график», то на экране блока 2 будет отображаться рефлектометр с рефлектограммой. Рефлектометр физически подключается к персональному компьютеру посредством USB кабеля или Ethernet соединения. С рефлектометром можно работать через интерфейс АПК, если фотоматрица зафиксировала изменения рефлектограммы и загорелся красный индикатор. Тогда при помощи рефлектометра можно установить точное место возникновения микроизгиба ОВ. Разрешающая способность рефлектометра выше, чем у АПК и составляет 0,1 м, но для исключения ошибок и повышения надёжности результатов измерений разрешающая способность АПК ограничена до 1 метра, но при необходимости она может быть увеличена до 0,1 метра. Поиск места повреждения при помощи рефлектометра осуществляется вручную. После установки точного места повреждения необходимо произвести осмотр СЖК. На рисунке 92 показано окно блока 2 с отображением рефлектометра.

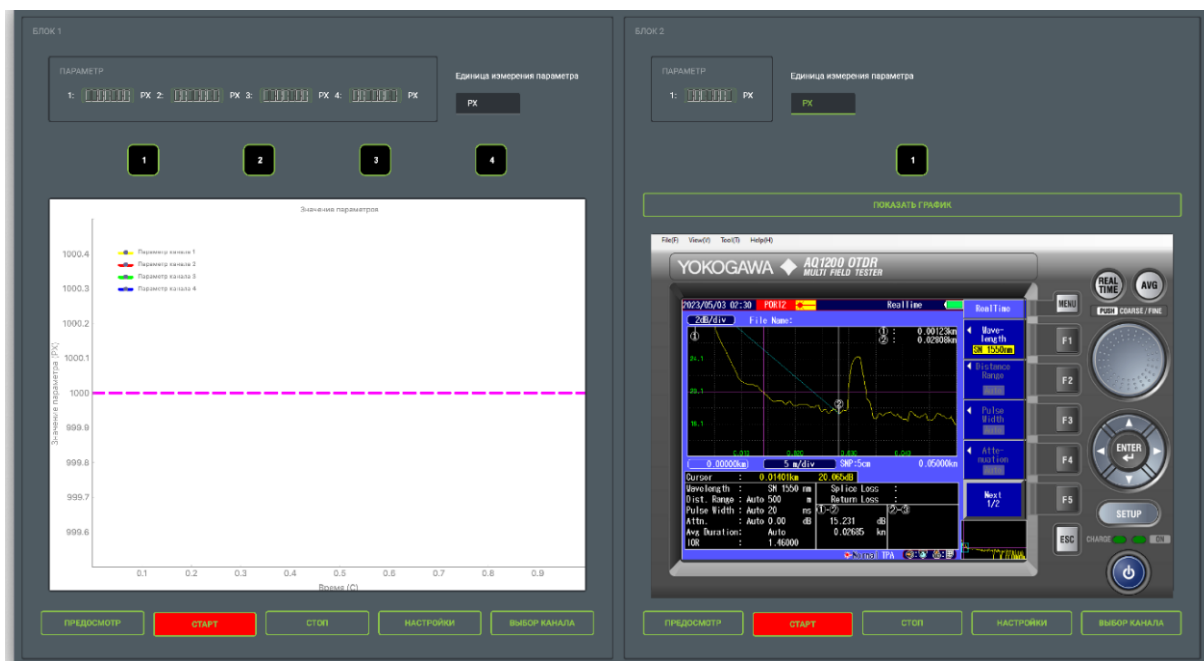


Рисунок 92 – Окно блока 2 с отображением рефлектометра

В работе АПК используется контроль дополнительных потерь при механическом воздействии на ОВ при формировании микроизгиба. При микроизгибе обязательно меняется коэффициент преломления между оболочкой и сердцевиной ОВ, а следовательно, и изменяются свойства световой волны, которая генерируется полупроводниковым лазером с длиной волны 650 нм мощностью от 10 до 30 мВт. При механическом воздействии на ОВ меняются параметр светопропускания, а дополнительные потери, резко увеличиваются.

Также ранее уже отмечалось, что меняется интенсивность световой моды. Световое пятно падает на поверхность фотоприемника, который установлен на торце ОВ. Это позволяет формировать более четкую форму светового пятна. Торцы ОВ должны быть идеально ровными. В процессе настройки определяется фокусное расстояние между концом разъема и поверхностью фотоматрицы. Эта настройка позволяет АПК записывать все изменения светового пятна при воздействии на ОВ.

АПК №1 был разработан с использованием языка программирования Python и библиотек OpenCV (Open Source Computer Vision Library). Данные библиотеки помогают создавать программное обеспечение с открытым исходным кодом, и работающее в области компьютерного зрения. С помощью OpenCV имеется возможность работы с несколькими алгоритмами для обработки видеоизображений, распознавания объектов, отслеживания движения и других задач машинного зрения. При разработке данного АПК использовалась версия OpenCV языка Python. Далее немного информации об использовании библиотеки NumPy, данная библиотека применяется для работы с многомерными массивами, линейной алгеброй и математическими операциями, она также является основой для других научных и аналитических библиотек Python. На рисунке 93 показано окно с отображением рефлектометра крупным планом (блок 2).



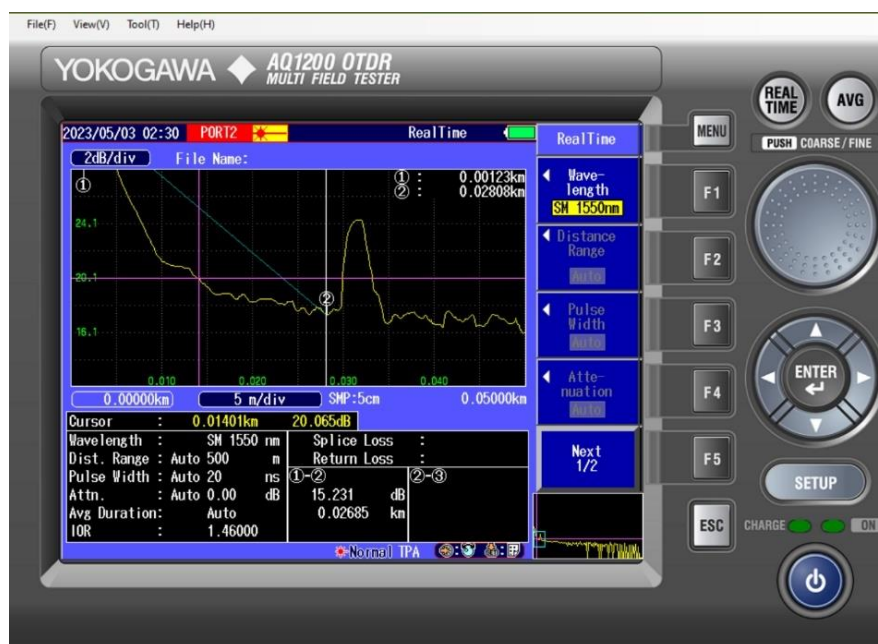
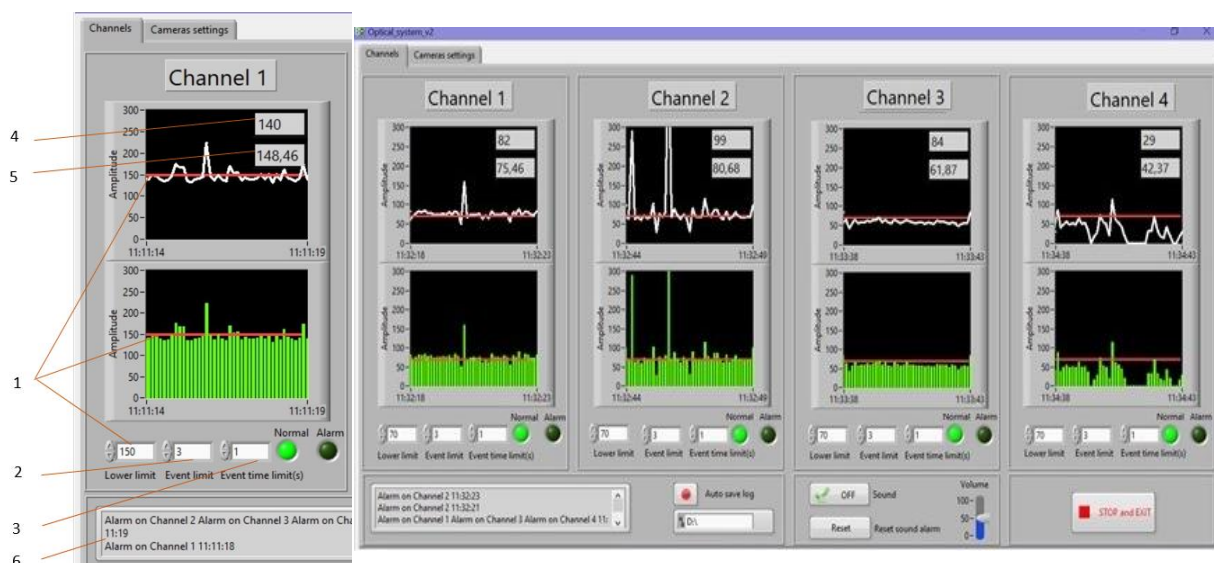


Рисунок 93 – Окно с отображением рефлектометра крупным планом (блок 2)

NumPy можно применять для выполнения оптимизации производительности при работе с большими массивами данных. Модуль PyQt6 применяется для предоставления базовых классов, что позволило работать с фреймворком Qt. Это кросс-платформа фреймворк, использованная для разработки приложений с графическим интерфейсом.

Прототип АПК №2 был разработан на базе двух вариантов АПК раннего поколения. Первый использовал секторный анализ свистового пятна и реагировал на изменения его геометрических размеров. Данный АПК был рассмотрен в статьях, опубликованных в отечественных и зарубежных научных журналах, также в них можно найти подробное описание принципа его действия [151, 153, 156, 158]. В данных источниках приведены результаты исследования ВОД и АПК №2 представлены графики зависимости и сделаны некоторые выводы, касающиеся работы АПК №2. Данный АПК №2 позволяет работать одновременно с четырьмя ВОД и достаточно хорошо реагировал на изменение дополнительных потерь. С его помощью проведено ряд лабораторных опытов по нагружению железобетонных балок, которые были рассмотрены в главе 3. Также АПК №1 был использован как основа для создания системы мониторинга рассмотренных в [151, 158]. Нужно сказать, что в процессе экспериментов были выявлены недостатки в работе АПК №2, которые заставили пересмотреть использованные методы обработки данных, полученных от ВОД. Первым и очень существенным недостатком оказалось, что АПК №2 страдает от помех, создаваемых источником излучения. Для ликвидации данной проблемы полупроводниковый лазер был оснащен дополнительным параметрическим стабилизатором тока, что повысило стабильность его работы и когерентность, что в свою очередь снизило пульсацию лазера. На рисунке 94 показан прототип АПК №2, АПК имеет четыре

независимых измерительных канала, к которым подключены четыре квази – распределённых ВОД. В левой части рисунка 94 показаны функциональные части АПК №1 и элементы настройки. Цифрами показаны два окна с диаграммами, одна представлена в виде осциллограммы, а вторая в виде столбиков (баров). По оси Y отложено численное значение измеряемой величины, например, нагрузки или смещения, а по оси X ведется отчет времени. АПК №1 имеет три основные настройки, которые задаются численными значениями. Первое: «верхний порог срабатывания». Второе: «количество событий в течение заданного времени». Третье: «количество усреднений». Лабораторные испытания показали, что данный АПК №1 имеет нестабильность в показаниях из-за плохой системы подавления помех. На рисунке 94 представлен случай, когда каждый канал был подключен к собственному источнику излучения с разной когерентностью и уровнем пульсации. Первый и третий каналы показали приемлемые результаты в стабильности измеряемых величин. Второй канал показал удовлетворительный результат. У него было отмечено два значительных всплеска и три незначительных всплеска на осциллограмме. Хуже показал себя четвертый канал, так как у него оказался провал в получении данных, получилось, что часть данных пропала.



1 –

пороговое значение измеряемой величины, 2 – количество событий в течение заданного времени, 3 – количество усреднений, 4 – среднее значение по амплитуде после усреднения данных, 5 – мгновенное значение по амплитуде, 6 – окно фиксации времени срабатывания.

Рисунок 94 – Прототип АПК №2

На все четыре ВОД, подключенных к АПК, было оказано разное по уровню механическое воздействие, при этом оно постепенно увеличивалось при одинаковых промежутках времени. Красная черта и столбики постепенно уменьшались до минимального значения, при этом нагрузка достигла своей максимальной величины. Чем выше уровень нагрузки на ВОД, тем меньше среднее значение, отображаемое в окошке 4, так как с увеличением нагрузки на ВОД

уровень дополнительных потерь увеличивается, а интенсивность световой волны снижается. АПК №2 также может иметь и обратный отсчет, когда нагрузка на ВОД увеличивается и дополнительные потери растут, то и значения измеряемой величины, отображенные в окошке 4, тоже растут. У АПК есть функция просмотра светового пятна, падающего на поверхность фотоматрицы. На рисунке 1Г, Приложение Г представлены два варианта с использованием лазера с длиной волны 650 и 850 нм. В данной работе будет рассмотрен вариант с использованием лазера с длиной волны 650 нм, так как он более массовый в производстве и имеет меньшую стоимость. Также показано как контролируются геометрические параметры светового пятна и его форма с использованием секторного анализа. При увеличении нагрузки на ВОД размеры пятна по секторам сокращались.

В окошке 4 показано среднее значение измеряемой величины по амплитуде после усреднения данных, в окошке 5 показано мгновенное значение по амплитуде. Окно 4 является измерителем для контроля нагрузки или смещения. На основании полученного опыта был сделан вывод, что когерентность лазера имеет достаточно большое значение для нормальной работы АПК №1. Также рассмотренный выше АПК №2 требовал установки более грубых настроек, так как страдал от плохой защиты от помех на программном уровне. На рисунке 2Г, приложение Г, показано как АПК среагировал на увеличение нагрузки на ВОД, при этом столбики диаграммы уменьшились пропорционально нагрузке полностью отсутствовали помехи. Нагрузка не изменялась дискретно и затем не менялась в течение определённого периода времени, и АПК четко показал, что нагрузка на ВОД сначала ступенчато возросла и более не изменялась, при этом параметры линейности и стабильности измерения были достаточно высокие (рисунок 2Г и 3Г, Приложение Г). На рисунке 4Д приведен случай возникновения помех в работе АПК.

Более совершенным и адекватным по своему поведению при проведении измерений стал прототип АПК №2, представленный на рисунке 95, это уже принципиально новый АПК №2. Можно сказать, улучшенный и модернизированный, но он относится к АПК №2. Если в первоначальном варианте АПК использовал секторный анализ светового пятна и реагировал на изменения его геометрических размеров, то от этой идеи пришлось отказаться по причине значительного числа приходящих помех, с которыми было чрезвычайно трудно бороться, а при использовании более грубых настроек терялась чувствительность АПК. Интерфейс АПК претерпел полное изменение, и функции настроек были изменены и расширены. Как сказано ранее, не оправдал себя предложенный метод секторного анализа светового пятна, взамен был предложен новый метод интеллектуального оптико-электронного анализа. АПК №2 был создан на основе прототипа №1 и использует те же методы для обработки и анализа данных. АПК №1 прошел ряд практических испытаний и апробации, а также был задействован в лабораторных исследованиях, результаты которых были опубликованы в статьях [154, 155, 157, 160, 163], также в них можно найти подробное описание принципа его действия и результатах его использования как средства контроля. В источниках [154, 155, 157, 160, 163] приведены результатов исследования ВОД и

АПК, представлены графики зависимости и сделаны некоторые выводы, касающиеся работы АПК. Данный АПК позволяет работать одновременно с четырьмя ВОД и достаточно хорошо реагировал на изменение при контроле нагрузки на железобетонную балку или смещении грунта. На рисунке 95 представлено окно АПК №2, который, как сказано послужил основой для создания АПК, его принципиальным отличием является то, что у него нет канала с распределенным ВОД, подключенным к рефлектометру, что ограничивает его разрешающую способность, отсутствие блока 2 сказывается на точности определения места повреждения СЖК.

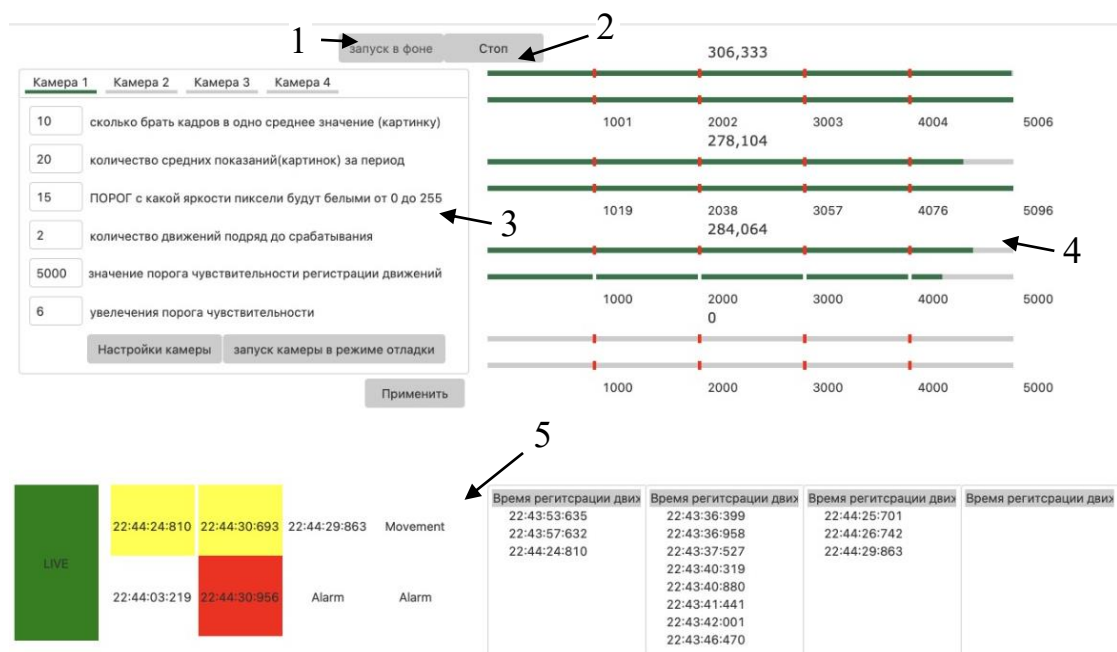


Рисунок 95 – Модернизированный и усовершенствованный АПК №2

Используется только квази- распределённый ВОД, который может указать только примерное место расположения трещины в фундаменте, так как расстояние определяется до зоны действия ВОД.

Подробно функционал АПК №2 рассмотрен в [154, 155, 157, 160, 163], но можно коснуться только особо важных моментов. Интерфейс позволяет разделить модули настроек и приборов для отображения измеряемых величин с целью удобства для пользователя на отдельные модули. Отдельным модулем представлена сигнализация.

Для запуска АПК в работу имеется кнопка «запуск в фоне» (рисунок 96), позиция 1. Для вывода АПК из работы имеется кнопка «стоп», позиция 2. При изменении настроек обязательно нужно нажать кнопку «применить».

Камера 1	Камера 2	Камера 3	Камера 4
10	сколько брать кадров в одно среднее значение (картинку)		
20	количество средних показаний(картинок) за период		
15	ПОРОГ с какой яркости пиксели будут белыми от 0 до 255		
2	количество движений подряд до срабатывания		
5000	значение порога чувствительности регистрации движений		
6	увелечения порога чувствительности		
Настройки камеры		запуск камеры в режиме отладки	
Применить			

Рисунок 96– Блок настройки камеры

Модуль «настроек», позиция 3, позволяет работать с четырьмя ВОД, настраивая каждый по очереди, нажимая кнопку «камера». Принцип и параметры настройки уже были рассмотрены ранее, когда проводилось описание блока 1, АПК №2. Модуль «настроек», позиция 3 представлен на рисунке 96. Численные значения отображаются в измерителях каждого канала, модуль «приборов для отображения измеряемых величин», позиция 4. Отдельно выделен модуль сигнализации и отправления сообщений, позиция 5. Каждая строка настройки подробно рассмотрена по каждому параметру. Строка «Сколько брать кадров в одно среднее значение» позволяет задать численное значение количества кадров, фиксируемого фотоматрицей в единицу времени. Количество кадров будет усреднено в одно изображение, данная операция выполняется АПК для снижения шумов, сформированных фотоматрицей. При увеличении численного значения по усреднению кадров увеличивается время реакции детектирования параметров, приходящих от ВОД. Если учесть, что в среднем камера снимает 30 кадров в секунду, то при значении этого параметра, равном 10 кадрам, время операции займет  $10/30 = 1/3 = 0,33$  секунды на каждое получение изображения. Строка «количество средних показаний за период времени» позволяет настроить АПК на усреднение показаний за период времени. Данные параметры напрямую влияют на чувствительность детекции и время реакции АПК. Следующая строка «Порог с какой яркостью пиксели будут белыми от 0 до 255», задаётся численными значениями. Этот параметр выражает значение цвета пикселя в градациях серого (от 0 до 255), при котором произойдет срабатывание при переходе пикселя из черного цвета в белый, это необходимо для подсчета изменений пиксельной картины светового пятна и выдачи численных значений измеряемой величины. Параметры настройки от 0 = черный до 255 = белый, при разнице 1-254 = оттенки серого. Данная настройка напрямую влияет на чувствительность детекции АПК. Далее идет настройка строк «значение порога чувствительности», это настройка численного значения порога срабатывания детекции движения и анализа

количества белых пикселей, при превышении уставки загорается индикатор красного цвета. Последняя строка настройки называется «увеличение порога чувствительности». Здесь задается значение увеличения порога чувствительности на величину N, при регистрации изменения параметров в течение определенного отрезка времени. При отсутствии движения значение будет сброшено к исходному значению из поля «Пороговое ограничение по яркости». В опциях настройки АПК №1 и №2 во многом схожи и идентичны по своим функциям [154, 155, 157, 160, 163].

АПК имеет возможность регистрации полученных данных, с введением логов по времени, записывает все показания за текущий запуск, прокрутка осуществляется колесиком мыши.

Время регитсрации движ	Время регитсрации движ	Время регитсрации движ	Время регитсрации движ
22:43:53:635	22:43:36:399	22:44:25:701	
22:43:57:632	22:43:36:958	22:44:26:742	
22:44:24:810	22:43:37:527	22:44:29:863	
	22:43:40:319		
	22:43:40:880		
	22:43:41:441		
	22:43:42:001		
	22:43:46:470		

Рисунок 97 – Блок регистрации движения с введением логов по времени

АПК имеет функцию телеметрии и возможности передачи сообщений по каналам сотовой связи или по волоконно-оптической линии связи с использованием конвертора. Отправка уведомления происходит посредством кроссплатформенной системы мгновенного обмена сообщениями (мессенджер) Telegram. Используется модуль Requests языка Python для отправки уведомления о сигнале «тревога» методом https запроса через интерфейс API Telegram (рисунок 98).

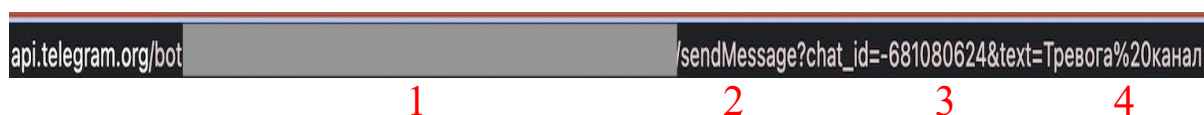


Рисунок 98 – Запроса через интерфейс API Telegram

Для отправки уведомлений используется Telegram-бот, добавленный в чат – групп, в которой будут находиться клиенты, подписанные на уведомления (рисунок 99).

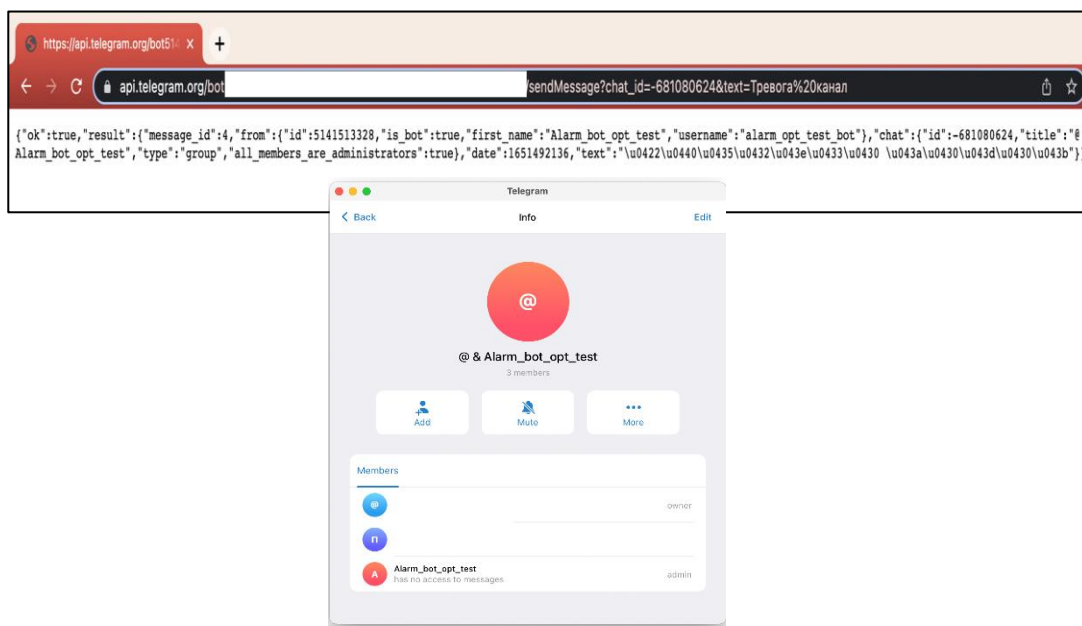


Рисунок 99 – Telegram-бот

Запрос состоит: из токен бота – это специальный ключ от бота, с помощью которого его можно подключаться к сторонним сервисам; вида запроса – sendMessage в данном случае; Id – номер чата, в который бот отправляет сообщение; текст сообщения (рисунок 100).

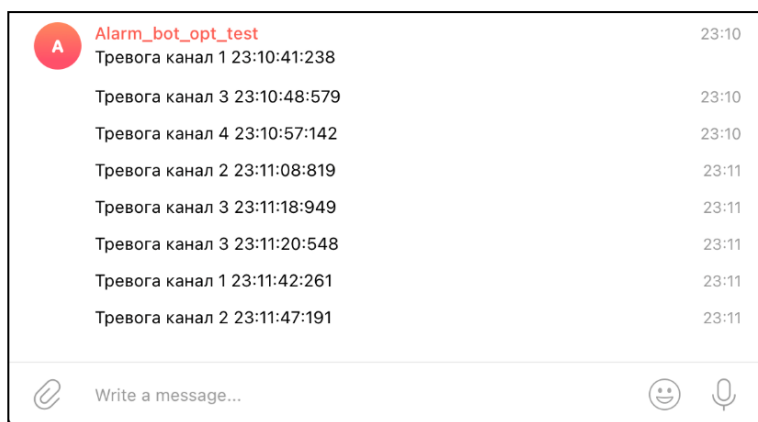


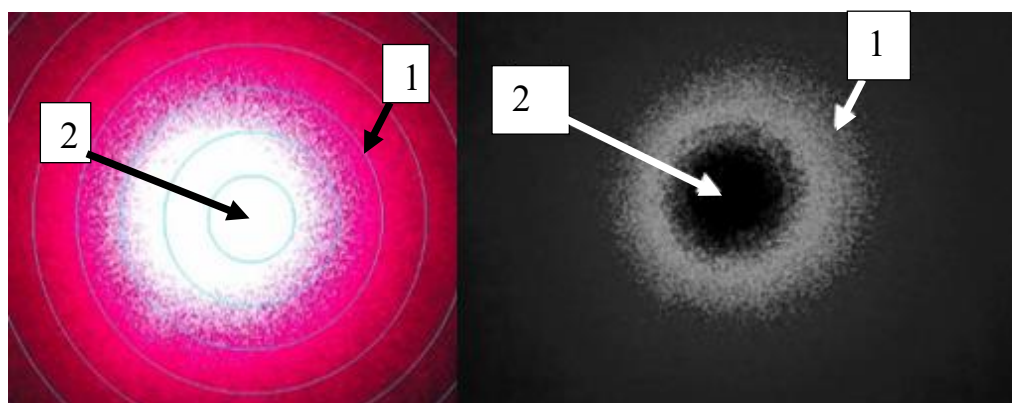
Рисунок 100 – Текст сообщения

#### 4.1 Интеллектуальный метод контроля параметров светового пятна

Некоторые вопросы и моменты работы аппаратно-программной части АСК частично были рассмотрены в публикациях [151 – 163], которые автор представленной диссертации подготовил в течение нескольких лет. Как сказано ранее, разработка АПК и соответственно конечного продукта как АСК с распределенными и квази- распределенными ВОД заняла достаточно длительный период времени, так как АПК перетерпел ряд усовершенствований и модернизаций, которые были направлены на повышение его потребительских

свойств и создание перспективы внедрения. Так как АСК, в которую входят АПК и ВОД, является универсальным средством контроля пригодным как для контроля, технического состояния СЖК и различных протяженных объектов (мосты, плотины, насыпи, трубопроводы, кабели и др.), а также смещения грунтов, то и публикации охватывают различные сферы промышленности.

Частично работа АПК и интеллектуальный метод контроля параметров светового пятна уже были раскрыты в [151 – 163], а также в главах 2 и 3, но осталось несколько важных вопросов. При нажатии кнопки «запуск камеры в режиме» выходит окно с изображением светового пятна и графиков. На рисунке 101 показана сущность метода контроля интенсивности и дополнительных потерь при помощи электронно-оптического анализа светового пятна. Первоначально световое пятно представлено в позитивном изображении (рисунок 101 а), яркая сердцевина и менее яркая оболочка, имеется еще и граница раздела, но пока она рассматриваться не будет. Световое пятно напоминает пятно Пуассона, имеет ступенчатый профиль, так как используется одномодовое ОВ и подчиняется нормальному распределению Гаусса. Позитивное изображение светового пятна преобразуется программой в негатив, как показано на рисунке 101 б, так как сердцевина слишком яркая и не информативная, а также содержит достаточно значительный уровень шума, она исключается из интеллектуального оптико-электронного анализа при помощи программы Python.



А)

б)

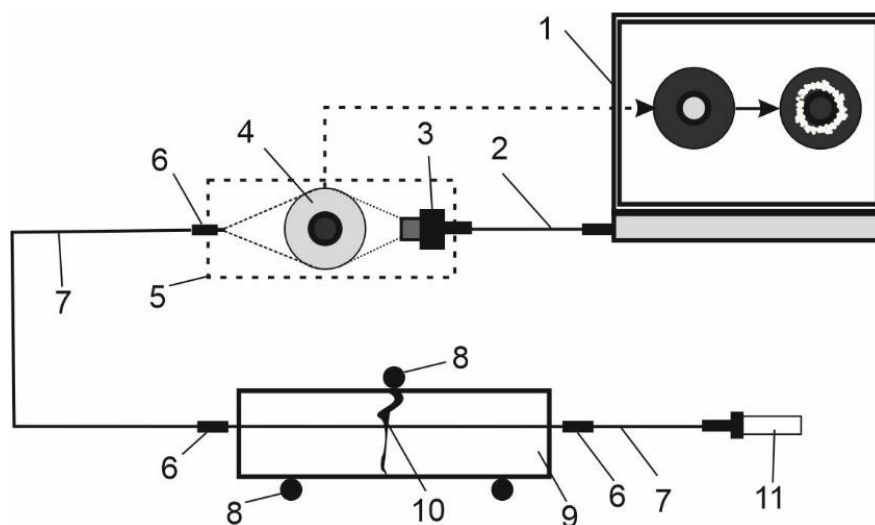
а – позитивное изображение светового пятна; б – негативное изображение светового пятна; 1 – излучение распространяющийся по оболочке; 2 – излучение распространяющийся по сердцевине.

Рисунок 101 – Форма светового пятна, падающего на поверхность фотоматрицы

На негативном изображении светового пятна отчетливо видны две зоны: негативное изображение оболочки ОВ, позиция 1 и изображение сердцевины ОВ, позиция 2. Данный метод контролирует изменения параметров светового пятна в области оболочки, позиция 1, а сердцевина из анализа исключается, так как при механическом воздействии из сердцевины выходит часть световой волны, которая попадает в оболочку [169]. Впоследствии излучение распространяется уже по



оболочке до фотоматрицы, которая контролирует все изменения. В отличие от известных методов оптической интерферометрии и рефлектометрии используется не фотодиод, а фотоматрица высокого разрешения. Это значит, что используется не однопиксельный, а многопиксельный фотоприемник. Световое пятно, падающее на поверхность фотоматрицы высокого разрешения и имеющее определённый уровень интенсивности, которая меняется в зависимости от уровня нагрузки воздействия на ОВ. В отличие от систем, использующих решетки Брэгга, требуется дорогостоящий оптический анализатор спектра. Как сказано, механическое воздействие на ОВ вызывает изменение параметров световой волны, об этом подробно было рассказано в главах 2 и 3, а также в публикациях [151 – 163]. Предложенная методика основана на теории контроля дополнительных потерь в ОВ и интенсивности в оптических волокнах. Отличием является использование интеллектуального оптико-электронного анализа негативного изображения светового пятна при помощи программы Python. Теоретические основы данной методики контроля уже опубликованы ранее и подробно рассмотрены в [151 – 163]. Для понимания сущности предлагаемой методики контроля подготовлена условная схема (рисунок 102), которая поясняет, как осуществляется преобразование оптической волны видимого диапазона в численную картину пикселей, а также показаны основные компоненты для реализации предлагаемой методики.



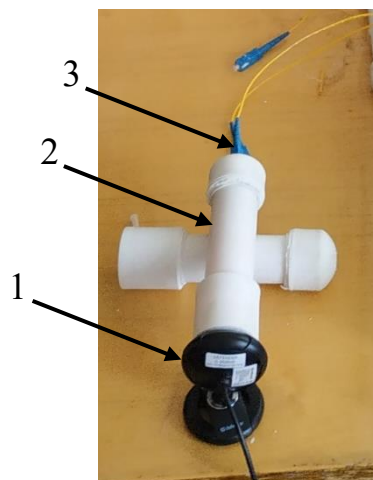
- 1 – персональный компьютер с АПК; 2 – кабель USB; 3 – фотоприемник с микропроцессором; 4 – световое пятно; 5 – оптический модуль; 6 – оптический коннектор; 7 – оптический патч-корд; 8 – опоры для воздействия на балку; 9 – балка с ВОД; 10 – участок разрушения балки и трещина; 11 – источник излучения.

Рисунок 102 – Поясняющая условная схема методики контроля

Как показано на рисунке 102, на экране персонального компьютера 1 отображается вся информация, касающаяся работы и настройки АПК. Также показано изображение светового пятна в негативной форме и после обработки

видео и интеллектуального анализа при помощи программы Python. АПК выполняет анализ интенсивности пикселей светового пятна Пуансона, которое сформировано на торце ОВ и падающего на поверхность фотоматрицы высокого разрешения. При механическом воздействии на ОВ изменяется его коэффициент преломления, соответственно и параметры светового пятна, так как фотоматрица установлена на выходе ВОД. АПК выполняет обработку данных и выдает численное значение измеряемой величины, при изменении пиксельной картины светового пятна, при переходе пикселей из ценного цвета в пиксели белого цвета. Методика контроля основана на сравнении изменений параметров светового пятна в течение времени и процесса перехода пикселей от одного состояния в другое. Чем больше механическое воздействие на ОВ, тем больше микроизгиб, тем выше уровень дополнительных потерь, тем больше энергии излучения покидает сердцевину ОВ и меньше энергии излучения приходит к фотоматрице, соответственно пятно становится менее интенсивным. Значение сформированных дополнительных потерь при микроизгибе ОВ прямо пропорционально нагрузке на ВОД, а также изменению численной картины пикселей и перехода их из черного цвета в белый. Персональный компьютер с АПК соединяется при помощи кабеля USB, позиция 2 с оптическим модулем 5, который содержит фотоприемник с микропроцессором 3. В представленной версии АПК может работать одновременно с четырьмя ВОД. Соответственно каждый ВОД подключается в свой оптический модуль. Оптические коннекторы 6 типа SC используются для соединения источника излучения с ВОД и оптическим модулем. Излучение формирует на торце ферулы оптического коннектора световое пятно 4, которое проецируется на полупрозрачный экран установленный непосредственно перед фотоприемником 3. Полупрозрачный экран, позволяет сконцентрировать световое пятно для лучшего восприятия его фотоприемником. Оптический коннектор имеет ферулу диаметром 2,5 мм и ее торец отполирован по стандарту UTP. Оптические патч-корды 7 служат для соединения ВОД, размещенного в балке 9 с фотоприемником и источником излучения 11. Балка располагается на опорах 8, которые осуществляли механическое воздействие на нее. Балка была разрушена в центре и в ней образовалась трещина 10. Излучение проходило от источника излучения через ВОД и попадала в оптический модуль, который содержит фотоприемник с микропроцессором. В процессе создания АСК было изготовлено несколько вариантов оптических модулей, один из первоначальных вариантов оптического модуля показан на рисунке 103. Этот цилиндрический оптический модуль (оптический волновод), изготовленный из отрезка пластиковой трубы белого цвета с наружным диаметром 32 мм. В процессе экспериментов выбиралось фокусное расстояние, рассматривались варианты с полупрозрачным экраном и без него. Также выбирался диаметр пластиковой трубы. Для удобства монтажа фотоприемника на конце трубки устанавливалась пластиковая муфта диаметром 32 мм. Важным моментом является предотвращение попадания внутрь оптического модуля дневного света или света от других источников, это вызывает сбой работы АПК из-за высокого уровня внешних помех. Оптический модуль помещается в герметичный корпус, который не пропускает внешний свет внутрь. Герметичность

оптического модуля и корпуса имеет большое значение в плане борьбы с помехами. Фото различных вариантов цилиндрических и квадратных оптических модулей (оптических волноводов) представлены на рисунках 5 и 6 Д, Приложение Г.



1 – фотоприемник с микропроцессором; 2 – пластиковая трубка;  
3 – оптический коннектор.

Рисунок 103 – Оптический модуль  
(цилиндрический оптический волновод)

— Далее необходимо рассмотреть сущность предлагаемой методики контроля технического состояния строительных конструкций и протяжённых объектов с применением волоконно-оптических чувствительных элементов (датчиков) квази-распределенного и распределённого типа, а именно как представляется световое пятно в численной картине пикселей. В главе 3 было небольшое пояснение, как изменяется численная картина пикселей при увеличении нагрузки на ВОД, размещенный в железобетонной балке. На рисунке 104 представлена численная картина белых пикселей, количество которых растет пропорционально нагрузке на ВОД.

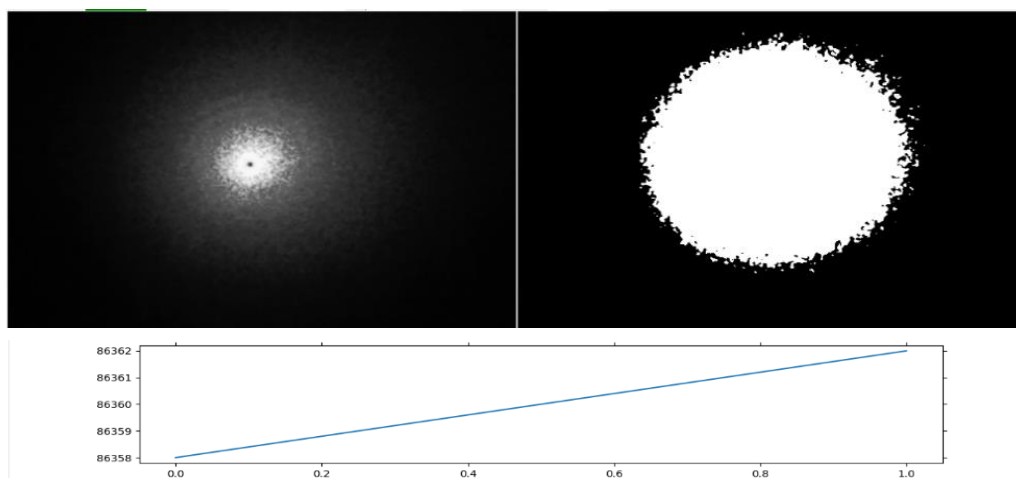


Рисунок 104 – Численная картина белых пикселей  
и график роста числа белых пикселей

Внизу рисунка АПК показан график роста числа белых пикселей на ВОД, на котором видно, что количество белых пикселей выросло с 86358 единиц до 86362 за 1 секунду, когда пресс увеличивал нагрузку на ВОД, который был размещен в железобетонной балке. На рисунке 7 Г (Приложение Г) представлен другой график, на котором видно, что количество белых пикселей выросло с 9600 единиц до 10600 за 1 секунду, когда пресс увеличивал нагрузку на ВОД, который был размещен в железобетонной балке. Это показывает, что АПК способен обеспечить достаточно хорошую линейность измерения и высокую чувствительность.

На рисунке 105 показан момент запуска АПК. Это момент начала испытаний железобетонной балки, когда пресс не оказывал нагрузку на ВОД. Видно, что экран в правой части окна программы полностью черный, соответственно число черных пикселей максимально, но есть отдельные белые точки, это помехи, возникшие от вибрации прессы, но количество белых пикселей минимальное и в максимуме равно 9 единицам. АПК распознает, что это помехи по скорости их роста и природе появления. Помехи плохо видны на экране, поэтому зона их образования выделена при помощи области, обведенной белой линией.

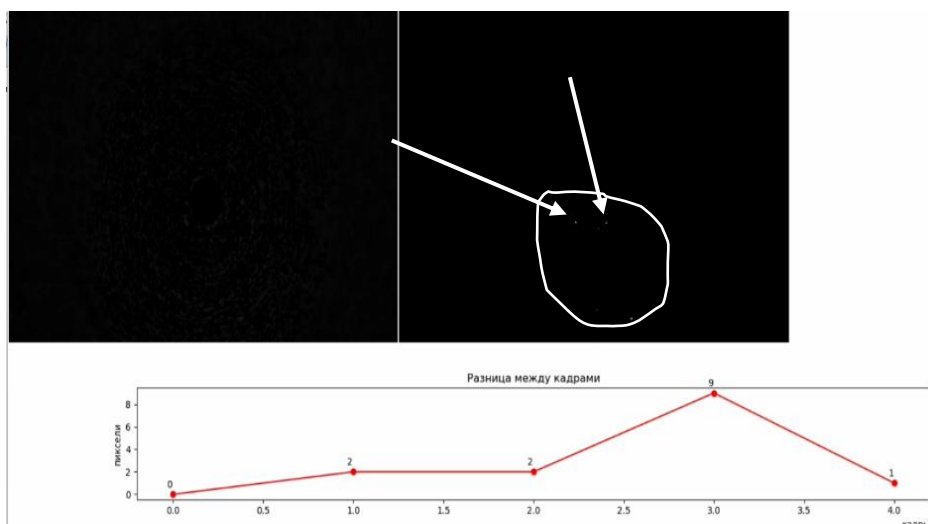


Рисунок 105 – Момент запуска АПК

Белыми стрелками показаны одиночные белые пиксели. Помехи всегда порождают меньшее количество белых пикселей, по сравнению с механическим воздействием на ВОД. На графике показан рост белых пикселей, например с 2 до 9, а затем спад до 1. Это совсем незначительные цифры так как рост белых пикселей может составлять несколько миллионов. На рисунке 106 представлена ситуация, когда на ВОД была нагрузка.

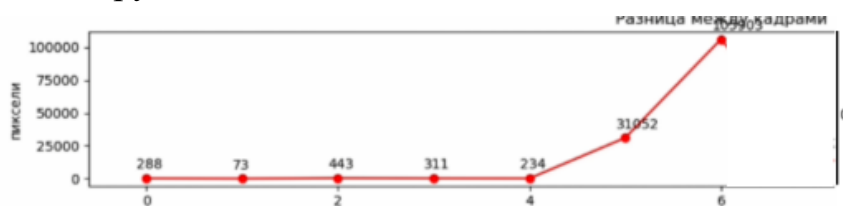


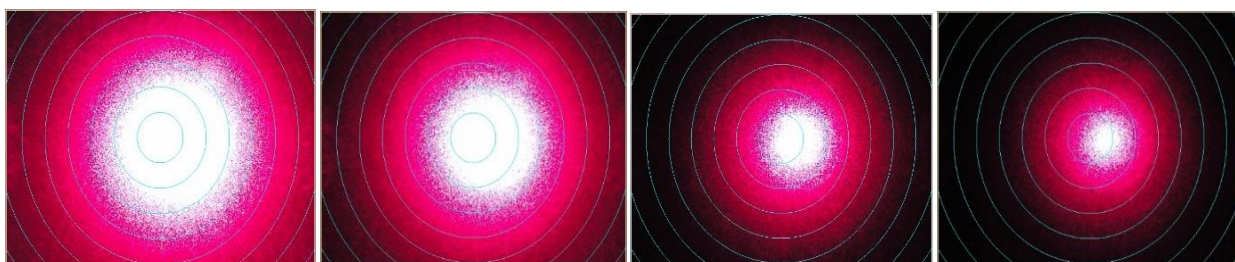
Рисунок 106 – Нагружение ВОД и снятие нагрузки

Из графика видно, что ВОД воспринял вибрации, создаваемые электромотором пресса, в зависимости от уровня вибраций сформировалось определение количества белых пикселей от минимального значения в 73 единицы до максимального значения в 443 единицы. Скорость работы фотоматрицы 30 кадров в секунду, после 4 кадра нагрузка стала расти и достигла значения 192292 пикселя, соответственно разница между количеством белых пикселей при росте нагрузки в своем пике и уровнем помех в своем пике является достаточно существенной, в 434 раза.

Например, если мы используем фотоматрицу с разрешением 1080p (Full HD), то это 1920 колонок и 1080 строк пикселей, что дает в общем 2 073 600 пикселей. Если использовать фотоматрицу с меньшим разрешением, что вполне достаточно, например 720p (HD), то это 1280 колонок и 720 строк пикселей, что дает в общем 921 600 пикселей. В экспериментах достаточно хорошо показали себя фотоматрицы с меньшим разрешением формата VGA 640x480, что дает в общем 307200 пикселей. Видеоданные передались на персональный компьютер по USB-интерфейсу, оптимальный параметр – это USB 2.0, но можно использовать USB 3.0. Для нормальной работы ВОД фотоматрица должна иметь 8 – или 10-разрядный АЦП. Возможно использование двух видов фотоматриц, это CMOS и CCD. Желательно, чтобы фотоматрица была способна обеспечить работу со скоростью 30 кадров в секунду. CMOS матрица будет самой недорогой с низким энергопотреблением. Фотоматрица CCD имеет более лучшие характеристики по качеству видеоизображения, но имеет более высокую стоимость. В экспериментах использовались фотоматрицы вида CMOS с разрешением 720p (HD), также на ранних версиях АПК были использованы фотоматрицы формата VGA с разрешением 640x480, что дает в общем 307200 пикселей, это разрешения вполне достаточно для любого по протяженности ВОД. С Фотоматрицы могут иметь пластиковую или стеклянную линзу, первая более бюджетная, но передает изображение светового пятна не всегда в естественных цветах. Стеклянная оптика передает более натуральную цветопередачу светового пятна. Эксперименты, проведенные с различными линзами, показали, что можно использовать более бюджетный вариант, который вполне пригоден для нормальной работы АПК. Можно использовать фотоматрицы с ручной или автоматической фокусировкой, более удобнее для настройки использовать автоматическую фокусировку.

Как сказано в 2 и 3 главах, механическое давление на ВОД приводит к увеличению дополнительных потерь и снижению интенсивности светового пятна, так как часть оптической мощности световой волны теряется пропорционально нагрузке на ВОД. На рисунке 107 показано, как уменьшается размер светового пятна при возникновении дополнительных потерь в ОВ, это когда на ВОД было оказано механическое воздействие. Видно, что размер светового пятна и его интенсивность снижаются по мере увеличения нагрузки на ВОД. Видно, как меняется позитивное изображение падающего на поверхность фотоматрицы светового пятна. Это явление может также наблюдаться при увеличении протяженности измерительного канала от 1 до 30 км, так как для длины волны 650

нм характерны большие потери, чем для длины волны 780 -900 нм, 1310 нм и 1550 нм, но данная проблема решается настройками фотоматрицы. Для работы с длиной волны от 900 до 1550 нм необходим другой вид фотоматрицы, имеющий большую стоимость, это касается и лазеров.



А)

б)

в)

г)

а – нет нагрузки на ВОД; б, в, г –увеличение нагрузки на ВОД от минимального в сторону максимального значения

Рисунок 107 – Изображение падающего на поверхность фотоматрицы светового пятна по мере увеличения нагрузки

Из рисунка 107 видно, что данное световое пятно схоже с известным изображением светового пятна Пуассона, когда сердцевина более яркая, а оболочка более темная. Световое пятно подчиняется нормальному распределению Гаусса, а также характерно высоким уровнем шумов, особенно это касается сердцевины. В оболочку ОВ переходят потери из сердцевины, которые фиксирует АПК. Потери растут при увеличении механического воздействия на ОВ. Шумы в большей мере создаются источником излучения, для нейтрализации важно иметь когерентный источник излучения с минимальным уровнем пульсации не более 1 нм при длине волны 650 нм. Программное обеспечение также помогает бороться с шумом, который является основным источником помех. Помехи также возникают при вибрационном воздействии на ВОД или значительных колебаниях внешней температуры. АПК может работать на длине волны от 780 до 900 нм при длине измерительного канала от 15 до 30 км при мощности лазера 30 – 50 мВт, а вот использование лазера с длиной волны 650 нм при длине измерительного канала в 30 км потребует мощности источника излучения уже в пределах от 500 мВт до 1 Вт.

АПК преобразовывает изменения параметров интенсивности светового пятна и дополнительных потерь в численную картину изменения пикселей и их перехода из черного цвета в белый. Можно сказать, чем выше по уровню механическое воздействие на ВОД, тем больше изменения интенсивности светового пятна и дополнительных потерь, распространяющихся по оболочке ОВ. Соответственно будет образовываться большее количество белых пикселей, абсолютно пропорционально приложенной нагрузке на ВОД. Световое пятно преобразовывается АПК в численную картину пикселей. В зависимости от настройки фокусного расстояния от торца ОВ до поверхности фотоматрицы,

формы оптического волновода и использованного материала, а также других конструктивных отличий оптического модуля, пиксельная картина и форма светового пятна могут различаться (рисунок 8 Г, Приложение Г), но всегда при увеличении нагрузки на железобетонную балку изменялось в сторону увеличения количества белых пикселей. На рисунке 108, показан процесс изменения численной картины белых пикселей и их рост по мере увеличения нагрузки на ВОД.



Рисунок 108 – Изменение численной картины белых пикселей и их рост по мере увеличения нагрузки на ВОД

Все изменения светового пятна фиксируются АПК в режиме реального времени. Более сильное по уровню воздействие на ОВ обязательно вызывает увеличение количество белых пикселей. АПК способен анализировать ситуацию и ступенчато изменять чувствительность при возникновении помех, которые отличаются по частоте и скорости изменения интенсивности от механического воздействия на ВОД. Лабораторный образец АСК рассчитан на одновременную работу с четырьмя независимыми ВОД, это обусловлено отсутствием необходимости увеличения числа каналов и программным обеспечением, но в дальнейшем количество каналов может быть увеличено до 32. При запуске АПК в режиме отладки (рисунок 109) формируется три окна.

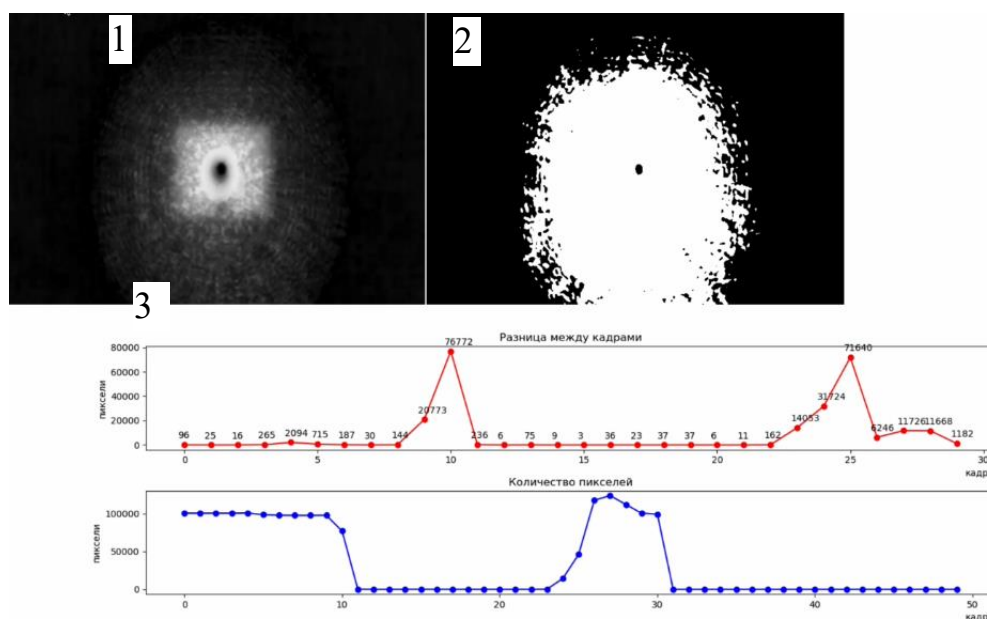


Рисунок 109 – Окно АПК в режиме отладки

В данном случае ВОД был подключен к оптическому модулю квадратного сечения, это видно на изображении светового пятна в левой части окна программы. В окне №1 выводилось изображение преобразованного программой светового пятна, это не само пятно, сформированное излучением, а разница, сформированная между условным эталоном и параметром изображения полученного в режиме реального времени. Численное значение сформировавшихся белых пикселей отражается в окне 1. Здесь можно увидеть количество изменения пикселей, перешедших из черного состояния в белое. Чем больше параметр микроизгиба тем больше белых пикселей формируется. Разница между численными значениями количества сформировавшихся количества белых пикселей за определённый промежуток времени отображается в окне 3. В нижней части данного окна показывается численные значения белых пикселей, сформировавшихся при увеличении нагрузки на ОВ, с учетом последнего видеоизображения. На ВОД было оказано два коротких по времени механических воздействия, которые зафиксировал АПК, и данные воздействия отражены на графиках. Одной из особенностей работы АПК является реализация функции контроля скорости изменений производной интенсивности световой волны во времени, а также изменение формы пятна и переход пикселей от белого к черному.

#### 4.2 Основные схемы АПК и рекомендации по ее использованию

На рисунке 110 представлено фото, на котором показаны части АПК и оптические приборы, использованные для ее настройки и проведения полевых испытаний. На рисунке 9 Д показано фото, на котором АПК запущена в режиме настройки.

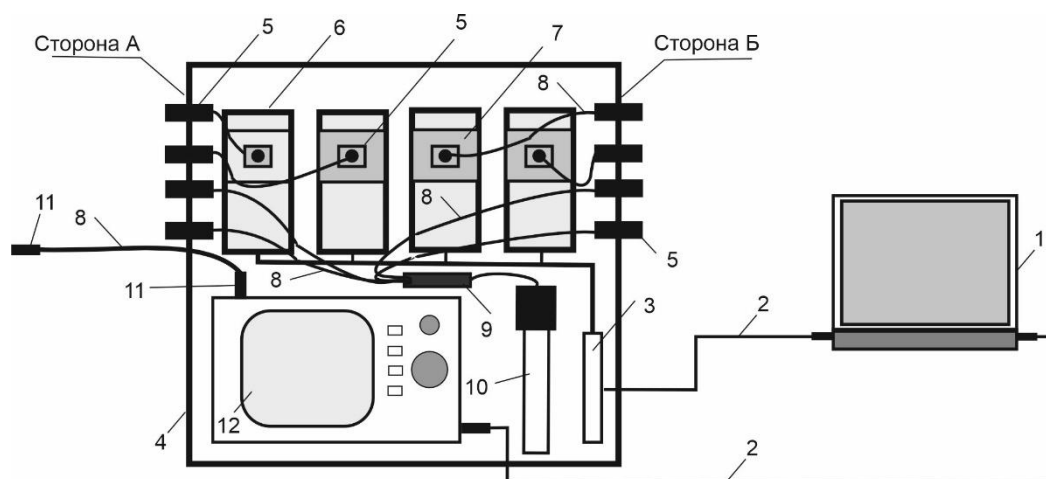


- 1 – блок обработки данных и подключения ВОД; 2 – персональный компьютер с АПК; 3 – оптический кросс для подключения оптических коннекторов; 4 – оптический патч-корд с коннекторами типа SC; 5 – оптический разветвитель  $\frac{1}{4}$  с коннекторами типа SC; 6 – источник излучения; 7 – измеритель оптической мощности.

Рисунок 110 – Используемые части АПК и оптические приборы при проведении полевых испытаний



В данном случае АПК готовится к полевым испытаниям в условиях реального строительного объекта, на котором возведена СЖК. На этапе возведения СЖК в нее были установлены пять ВОД, такое количество ВОД выбрано произвольно, но с учетом того, что некоторые ВОД могли быть повреждены в процессе заливки СЖК, а также в других случаях, или случайно работниками, выполнявшими строительные работы вблизи установки ВОД. Выводы ВОД выводились наружу и имели стандартные оптические коннекторы SC для коммутации блока обработки данных и ВОД. Коммутация оптических коннекторов SC осуществлялась при помощи адаптеров типа SC. Конструктивно АСК может быть выполнена в трех основных вариантах, которые могут использоваться независимо друг от друга при различных ситуациях. При этом учитываются различные факторы и условия. Конфигурация АСК выбирается из реальных условий строящегося объекта, погодных условий, этапов возведения объекта поставленных задач, имеющихся возможностей по сохранности оборудования и многого другого. Предлагаются три схемы по компоновке АСК. На рисунке 111 представлена схема, когда оптические модули АПК с источником излучения и оптический рефлектометр находятся в едином корпусе блока обработки данных.



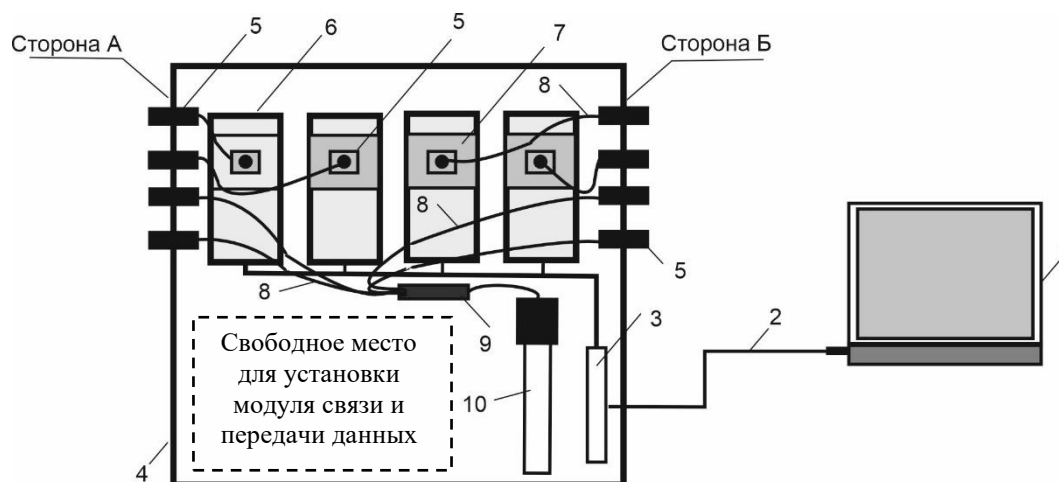
- 1 – персональный компьютер с АПК блока обработки данных; 2 – кабель USB; 3 – сплиттер USB; 4 – корпус блока обработки данных; 5 – оптический адаптер типа SC; 6 – фотоприемник и микропроцессор в едином корпусе, 7 – квадратный корпус оптического модуля (оптический волновод); 8 – оптический патч-корд с коннекторами типа SC; 9 – оптический разветвитель  $\frac{1}{4}$  с коннекторами типа SC; 10 – источник излучения; 11 – оптические коннекторы типа SC; 12 – оптический рефлектометр.

Рисунок 111 – Схема компоновки АПК, когда все элементы находятся в одном корпусе блока обработки данных

На рисунке 10Г и в Приложение Г, представлена схема блока, когда оптические модули АПК с источником излучения и оптический рефлектометр не находятся в едином корпусе блока обработки данных, блок обработки данных и оптический рефлектометр разнесены или рефлектометр может подключаться при

необходимости вручную. Схемы на рисунках 111 и в приложение 10Д являются идентичными и по своей сути, только единственным отличием является то, что оптический рефлектометр вынесен за пределы блока обработки данных, причиной это решения является несколько обстоятельств, когда используется один рефлектометр для работы нескольких АПК, разнесенных в различных местах или нет возможности обеспечить сохранность достаточно дорогостоящего прибора. В случае, когда оптический рефлектометр используется сразу для нескольких АПК, это существенно упрощает и удешевляет систему контроля, в случае ограниченности финансовых вложений, так как стоимость оптического рефлектометра в десятки раз превышает стоимость блока обработки данных с четырьмя оптическими модулями. В случае, когда нужно одновременно контролировать несколько зданий или сооружений (протяженных объектов), а бюджет проекта ограничен, то периодический контроль при помощи одного рефлектометра вполне оправдан. Может быть необходимость контролировать техническое состояние нескольких СЖК на разных участках. Нужно понимать, что комплектовать каждую АПК оптическим рефлектометром не только финансово затратно, но и технически не целесообразно, так как данный оптический прибор может длительное время не действовать, так как повреждений может не быть в течение долгих лет. Вероятно, компоновка АПК с оптическим рефлектометром больше пригодна для различных военных объектов или иных объектов специального назначения, где безопасность поставлена на первое место и финансовые затраты не имеют значения. Второй проблемой нахождения оптического рефлектометра в одном корпусе с оптическими модулями является обеспечение его сохранности. Данный прибор содержит достаточно много электронных и оптических компонентов, соответственно нахождение его на строительной площадке в условиях холодной зимы или жаркого лета может повлечь за собой выход его из строя. Его также могут украсть злоумышленники и перепродать компаниям, так как это востребованное и универсальное средство измерения параметров волоконно-оптических линий передачи информации. Оптические модули не представляют ценности для злоумышленников, так как неясна сфера их дальнейшего применения, по сути, их невозможно продать или использовать по иному назначению, а наличие в них драгоценного металла достаточно мало. Эти обстоятельства побуждают разработать схему, в которой нет вообще оптического рефлектометра, но при необходимости он используется и подключается оператором в ручном режиме. Как сказано ранее, в СЖК на этапе заливки закладываются как распределенные, так и квази- распределенные ВОД и при необходимости используются для контроля технического состояния СЖК. Как сказано ранее при необходимости распределенные и квази- распределенные ВОД могут располагаться уже на находящихся в эксплуатации СЖК. Это уже отдельная область их использования, и в данной диссертации не рассматривается. На основании вышесказанного, предлагается наиболее простой и наиболее бюджетный вариант АСК, который менее прихотлив при эксплуатации и более надежен. Упрощенная схема АПК представлена на рисунке 112. Так как оптический рефлектометр отсутствует, то свободное место в корпусе блока

обработки данных используется для установки модуля связи и передачи данных. Передача данных осуществляется по каналам сотовой связи, Wi-Fi или волоконно-оптической линии передачи информации.



1 – персональный компьютер с АПК; 2 – кабель USB; 3 – сплиттер USB; 4 – корпус блока обработки данных; 5 – оптический адаптер типа SC; 6 – фотоприемник и микропроцессор в едином корпусе, 7 – квадратный корпус оптического модуля (оптический волновод); 8 – оптический патч-корд с коннекторами типа SC; 9 – оптический разветвитель  $\frac{1}{4}$  с коннекторами типа SC; 10 – источник излучения.

Рисунок 112 – Схема компоновки АСК только с оптическими модулями

Упрощенная схема и отсутствие дорогостоящего оптического рефлектометра позволяют создать АПК, более перспективную по своему потенциалу промышленного использования и будущей коммерциализации. Как сказано ранее, АПК на основе заложенных алгоритмов контроля и определения поврежденного участка может работать круглосуточно в режиме реального времени. Если случится, что возникнет угроза разрушения СЖК, то АПК среагирует и выдаст предупреждение, но только по зонам, так как используются квази-распределенные ВОД. Конечно, разрешающая способность такой АПК будет ниже, но и стоимость будет в десятки раз снижена по сравнению с АПК, укомплектованной оптическим рефлектометром и распределенным ВОД. АПК с распределенным ВОД имеет разрешающую способность в пределах 1 метра найти место разрушения СЖК, но при незначительной доработке АПК можно обеспечить разрешающую способность уже на уровне 0,1 метра. Естественно, при работе АСК с квази-распределенными ВОД разрешающая способность зависит от длины зоны, на которой работает ВОД. Если принять, что длина СЖК, а именно железобетонного фундамента, равна 200 метрам, то АСК с четырьмя квази-распределенными ВОД сможет обеспечить разрешающую способность только в пределах 50 метров на основании того, что 200 метров будут разделены на четыре участка (зоны) протяженностью 50 метров. АСК может работать максимально с 32 каналами, так как имеются аппаратные ограничения, то при использовании 20

независимых каналов участка (зоны) будут протяженностью уже в 10 метров, что существенно увеличит точность. При модернизации АПК и использовании фотоматрицы с разрешением 4 К и выше, высокостабильного источника излучения мощностью более 1 Вт, а также персонального компьютера с многоядерным процессором и высокой вычислительной способностью можно довести число каналов до 64 для одного блока АПК, но это уже другая задача, не входящая в данную диссертационную работу, это даже больше перспектива развития. Сейчас ведётся работа по созданию АПК с увеличенным числом каналов до 24. Для этого используются фотоматрицы и микропроцессоры от IP-камер, образец представлен на рисунке 11 Д. Принцип действия остается неизменным, также как рассмотренный ранее метод обработки данных полученных от фотоматриц. Алгоритм работы идентичен четырехканальной АСК, которая рассматривается в данной диссертационной работе, это больше образец с перспективой промышленного внедрения. У него есть особенности, связанные с использованием фотоматриц, и микропроцессоры от IP-камер, но это не принципиальная разница, скорее, техническая.

В настоящем варианте четырехканальная АПК с четырьмя квази-распределенными ВОД выполняет роль системы контроля и сигнализации при изменении НДС и нагрузки на СЖК, для поиска более точного места концентрации механических напряжений, где впоследствии могут образоваться усталостные трещины, используется оптический рефлектометр. С его помощью можно выполнить уточнение дистанции до точки разрушения СЖК. АПК может уже на ранних этапах установить изменения НДС и оповестить оператора о сложившейся ситуации.

Для подключения четырех квази-распределенных ВОД к четырехканальной АСК имеется два оптических кросса, которые расположены на двух боковых гранях. Условное графическое изображение мест для подключения квази-распределенных ВОД представлено на рисунке 113. На рисунке 12 Г, Приложение Г, представлено фото, на котором показано место подключения квази-распределенных ВОД.

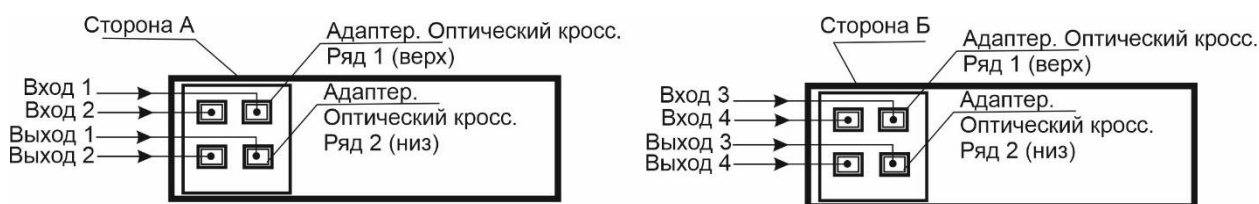


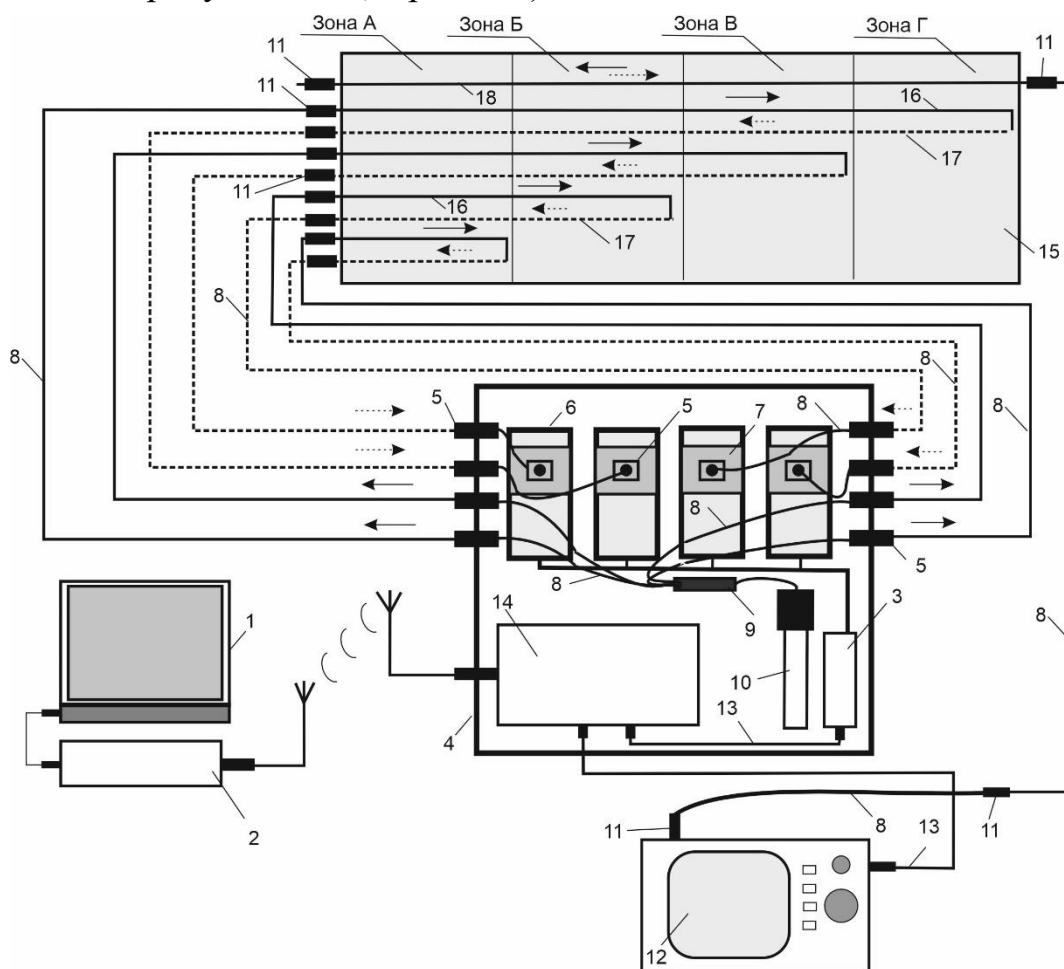
Рисунок 113 – Расположение оптических входов и выходов

Рекомендации по использованию АПК сводятся к разработке основных схем по ее использованию и подключению к распределенным и квази- распределенным ВОД. Можно рассмотреть три основные схемы, так как для создания полноценной АПК необходимо подключить распределенные и квази- распределенные ВОД к блоку обработки данных. Рекомендованная к применению АПК должна содержать не только распределенные и квази- распределенные ВОД, но и важный

элемент – модуль связи. Этот элемент крайне важен для связи блока обработки данных с удаленным компьютером или сервером. В реальных условиях оператор может подключить персональный компьютер к блоку обработки данных и уже на месте в условиях строительного объекта снять показания за определенный период времени. Соответственно, это будет периодический контроль по заранее составленному графику, но не постоянный мониторинг в течение суток в режиме реального времени. Причиной является много обстоятельств, например понадобится отдельное небольшое помещение, где можно разместить персональный компьютер или сервер, так как может быть несколько одновременно работающих АПК. Нужно создать условие сохранности оборудования, так как компьютерная техника всегда привлекает злоумышленников. Также нужно обеспечить определенный микроклимат в помещении, где будет находиться персональный компьютер или сервер. Это значительная проблема и для существующих точечных тензодатчиков, которые могут содержать встроенный микропроцессор для обработки данных и передавать информацию по медному кабелю на персональный компьютер. Максимальная длина кабеля 800 метров. В реальности это более короткий кусок кабеля длиной в 100-300 метров, соответственно нужно на другом конце кабеля подключить компьютер, но где его можно хранить и как обеспечить его сохранность в условиях строительства или эксплуатации здания. Конечно, при эксплуатации легче это сделать и выделить подходящее помещение, но это тоже определенная проблема, даже протяжка медного кабеля от датчика к компьютеру – уже сложность. Учитывая сказанное, можно сделать вывод о необходимости использовать модуль связи для передачи сообщений по радиоканалу. Для реализации данной идеи современные технологии телекоммуникации предлагают достаточно широкий выбор технических средств. Например, можно использовать свободные частоты и технологии Zigbee или WiFi. Современные радиорелейные станции обеспечат передачу информации на десятки километров без всяких проблем. Можно воспользоваться каналами сотовой связи или волоконно-оптическими линиями связи, которых достаточно в современном городе, так как сети высокоскоростного интернета сейчас работают именно с использованием ОВ.

В качестве первой схемы построения АСК можно рассмотреть вариант использования оптических модулей и оптического рефлектометра. Это, конечно, достаточно дорогой вариант, но если вынести оптический рефлектометр за пределы корпуса АСК и использовать его периодически для уточнения места повреждения СЖК, то можно достаточно существенно снизить стоимость АПК. Если одновременно в эксплуатации находится несколько систем контроля технического состояния СЖК, то более выгодно использовать схемы с вынесенным и подключаемым при необходимости оптическим рефлектометром, так как его можно использовать на нескольких объектах. Так как АПК с оптическими модулями осуществляет функцию контроля и измерения, а оптический рефлектометр больше нужен для уточнения расстояния до места

повреждения, наиболее простой, надежной и бюджетной по затратам будет АСК, представленная на рисунке 114 (Вариант 1).



1 – персональный компьютер с АПК; 2 – модуль связи и согласования с персональным компьютером; 3 – Ethernet коммутатор; 4 – корпус блока обработки данных; 5 – оптический адаптер типа SC; 6 – фотоматрицы и микропроцессоры от IP-камер в едином корпусе (оптический модуль), 7 – квадратный корпус оптического модуля (оптический волновод); 8 – оптический патч-корд с коннекторами типа SC; 9 – оптический разветвитель  $\frac{1}{4}$  с коннекторами типа SC; 10 – источник излучения; 11 – оптические коннекторы типа SC; 12 – оптический рефлектометр; 13 – Ethernet кабель 14 – модуль связи между персональным компьютером и блоком обработки данных; 15 – железобетонный фундамент.

Рисунок 114 – Схема компоновки АСК с подключением ВОД (Вариант 1)

В приложение Г, на рисунках 13 Д и 14 Д, представлены еще два альтернативных варианта компоновки АСК с подключением ВОД. В ней не будет постоянно работающего оптического рефлектометра с распределенным ВОД, будет несколько каналов с квази- распределенными ВОД. Так как заложенные в тело фундамента ОВ могут быть одновременно распределенными и квази-распределенными ВОД, то нет проблем с их использованием, так как можно

подключаться к любому выходящему из фундамента ОВ. Если учесть, что ОВ закладывается с запасом, то это полностью решает проблему подключения АСК на необходимое количество ВОД. Так как в настоящей диссертационной работе разрабатывается четырехканальная АСК с четырьмя квази- распределенными ВОД, а пятый канал создается за счёт распределенного ВОД, подключенного к оптическому рефлектометру, то схема будет иметь пять ВОД.

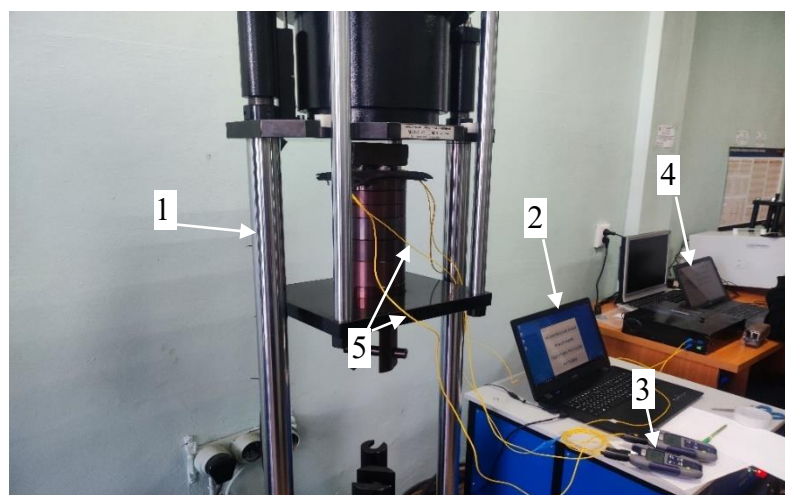
Представленная на рисунке 114 схема компоновки АСК с подключением ВОД (Вариант 1) работает следующим образом: персональный компьютер 1 с АПК находится на значительном расстоянии от блока обработки данных, соответственно, их можно считать разнесенными на определенное расстояние в единицы или десятки километров. Если одновременно работающих АСК более одной, то уже организуется удаленный сервер, на котором установлен АПК и хранится необходимая информация. Модуль связи и согласования с персональным компьютером 2 обеспечивает дистанционную коммутацию с блоком обработки данных по радиоканалу. В корпусе блока обработки данных 4 находятся оптические модули, источник излучения и модуль связи. Ethernet коммутатор 3, подключен к каждому оптическому модулю 6. Оптический модуль содержит фотоматрицу и микропроцессор от IP-камер, которые находятся в едином корпусе 6 (оптический модуль). На каждый измерительный канал, к которому подключен ВОД, приходится одна фотоматрица и один микропроцессор от IP-камер. Каждый оптический модуль, подключен к Ethernet коммутатору при помощи Ethernet кабеля 13. Ethernet коммутатор должен содержать необходимое количество портов равное количеству подключаемых оптических модулей 6 и один порт для соединения с радиомодемом модуля связи. Если каналов четыре, то необходим еще пятый порт для коммутации с модулем связи. Электропитание оптических модулей 6 осуществляется от коммутатора Ethernet кабеля. Каждый оптический модуль оснащен оптическим адаптером 5, типа SC и квадратным отческим волноводом 7. К каждому оптическому модулю подходит оптический патч-корд 8 с коннекторами типа SC.

Принцип работы оптического модуля был рассмотрен в разделе 4.1. При помощи оптического патч-корда 8 блок обработки данных 4 коммутируется с ОВ 16, 17 и 18, которые являются ВОД. Для коммутации также используются оптические адаптеры 5, типа SC, к ним подключаются оптические модули и ВОД. Блок обработки данных содержит 8 оптических адаптеров, типа SC, которые составляют два оптических кросса. Каждый кросс содержит по четыре оптических адаптера, два из них выходные и два являются входными. Сплошными стрелками указано направление прямого движения световой волны в сторону ВОД от источника излучения 10, через оптический разветвитель 9, а пунктирные стрелки показывают уже обратное направление движения световой волны от ВОД к фотоматрице оптического модуля. Оптический разветвитель  $\frac{1}{4}$  с коннекторами, типа SC, делит энергию световой на равные четыре части для каждого ВОД. Модуль связи между персональным компьютером и блоком обработки данных 14 коммутируется с оптическими модулями и оптическим рефлектометром 12, который работает в автоматическом режиме и может управляться как вручную, так

и дистанционно через Ethernet кабель 13. В железобетонный фундамент 15 вмонтированы ОВ, которые являются ВОД. ОВ 16 и 17 образуют квази-распределенный ВОД, работающий в своей зоне. Всего имеется четыре квази-распределенных ВОД, по одному в каждой зоне А-Г. Сплошной линией показано направление движения световой волны от источника к ВОД, его можно назвать условно «прямое», а пунктирной показано направление движение световой волны от ВОД к оптическому модулю, его можно назвать условно «обратное». Луч распространяется по кругу от источника изучения до ВОД, находящегося внутри фундамента и далее от ВОД до оптического модуля. ОВ 18 является распределенным ВОД и подключено только к оптическому рефлектометру, который сначала посылает световой импульс, а затем принимает его отражение или, можно сказать, рассеяние.

### 4.3 Калибровка АПК и практическая апробация

Для калибровки АПК использована силовоспроизводящая машина МСВ-10МГ-4, которая находится в Казахстанском институте стандартизации и метрологии (Карагандинский филиал). Данный филиал является структурным подразделением КазСтандарт Комитета технического регулирования и метрологии Министерства торговли и интеграции Республики Казахстан. Все испытательное и измерительное оборудование филиала проходит международное сличение. Филиал имеет все необходимые документы аккредитации и сертификации, в том числе международные на осуществление испытаний и поверки. Силовоспроизводящая машина типа МСВ-10МГ-4 имеет диапазон воспроизводимой силы 0,2-10 кН и предел допускаемых значений доверительных границ относительной погрешности 0,02%. На рисунке 115 представлена фотография начального момента проведения калибровки и показано расположение оборудования.



1 – силовоспроизводящая машина; 2 – монитор для вывода параметров нагрузки; 3 – калибровочные оптические приборы; 4 – испытуемая АПК;  
5 – ВОД.

Рисунок 115 – Силовоспроизводящая машина МСВ-10МГ-4 и испытуемая АПК



Данная машина используется для калибровки тензодатчиков или датчиков нагрузки различных конструкций. Основным отличием данной машины от использованных ранее испытательных машин и прессы (глава 3) является высокая точность используемых измерительных приборов и низкая погрешность измерения. Силовоспроизводящая машина типа МСВ-10МГ-4 состоит из двух основных частей органа создания нагрузки (силопроизводства) и компьютеризированного контрольно-измерительного устройства. Все численные показания нагрузки и графики выводятся на экран компьютера.

На рисунке 116 показаны контрольно-измерительные приборы, использованные при проведении эксперимента.



1 – Монитор контрольно-измерительной системы силовоспроизводящей машины; 2 – источник оптического излучения; 3 – оптический измеритель мощности; 4 – испытуемая АСК; 5 – персональный компьютер с АПК.

Рисунок 116 – Контрольно-измерительные приборы

В качестве устройств контроля нагрузки (силы), приложенной к ВОД использовалась четырехканальная АСК, которая состоит из блока обработки данных, персонального компьютера с АПК и двух ВОД. При проведении данного эксперимента использовался только один канал. Предварительно каждый канал был проверен и настроен в отдельности, расхождение в их показаниях составило менее 1 %. В экспериментах использовано два идентичных по своим характеристикам и длине ВОД. В качестве измерителя оптической мощности (дополнительных потерь) был использован прибор SmartPocket –38 (производитель JDSU, США). В качестве источника излучения был использован прибор SmartPocket OLS-35 (производитель JDSU, США). Эксперимент был спланирован, определены начальные и граничные условия, по аналогии с проведёнными ранее экспериментами, рассмотренными в 3 главе.

На рисунке 117 представлено фото, на котором показан экран персонального компьютера с отображением графика и изменения картины пикселей, при росте нагрузки. Как видно, на экране персонального компьютера

отображается график роста белых пикселей приросте нагрузки на ВОД. График имеет достаточно высокую линейность, что свидетельствует об адекватной работе ВОД и АПК. Показания всех измерительных приборов фиксировались одновременно при помощи двух видеокамер. Показания измерителя оптической мощности (дополнительных потерь) сравнивались с показаниями АПК.

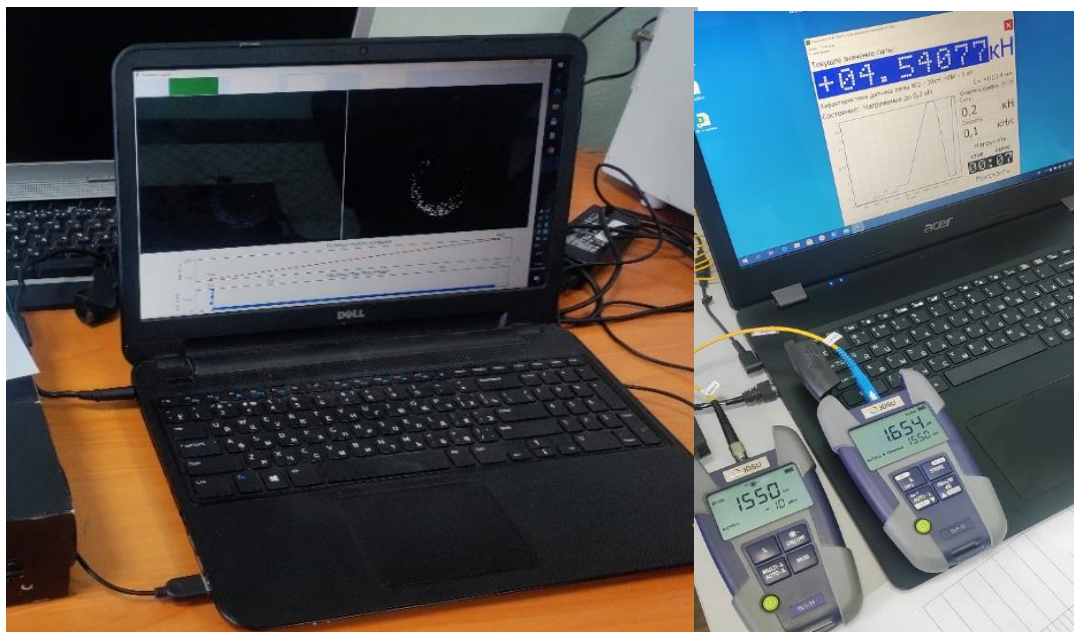


Рисунок 117 – Измерительные приборы

АПК может измерять и отображать различные параметры, в том числе и дополнительные потери, по которым он был откалиброван. Так как в качестве измерителя оптической мощности (дополнительных потерь) был использован прибор SmartPocket –38 (производитель JDSU, США), то он выдает показания дополнительных потерь в дБ. Данный прибор способен работать в автоматическом режиме и выбирать пределы измерения, а также длина оптической волны определялась автоматически, что существенно упростило проведение измерения оптической мощности (дополнительных потерь). Источник излучения работал в диапазоне от 650 до 1550 нм и переключался на различные длины волн. Соответственно АПК тоже выдавал значение в дБ и выбирал пределы автоматически, при малых значениях начального момента нагружения измерения производились в мдБ, а при увеличении нагрузки АПК автоматически перешел на дБ. При увеличении нагрузки на ВОД было установлено, дополнительные потери увеличивались, а оптическая мощность и интенсивность снижались. Все изменения подчинялись линейному закону. При увеличении нагрузки на ВОД измеритель оптической мощности показывал пропорциональный рост дополнительных потерь, а АПК показывал пропорциональный рост количества белых пикселей на своем экране, эти обстоятельства уже рассмотрены ранее в источниках [151-163], а полученные результаты полностью совпали с ранее полученными результатами по своей сути. На рисунке 118 показано окно АПК, когда он отражает параметры дополнительных потерь в ОВ при его микроизгибе

и выдает потери в дБ. Чем выше нагрузка на ОВ, тем выше значение дополнительных потерь.

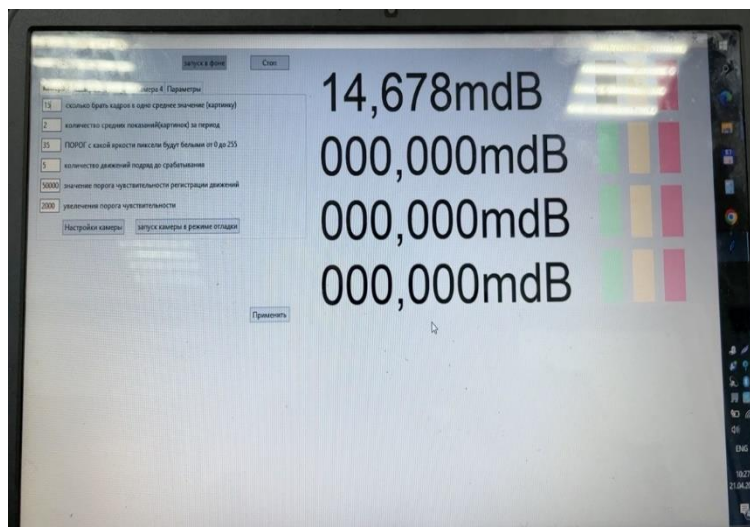
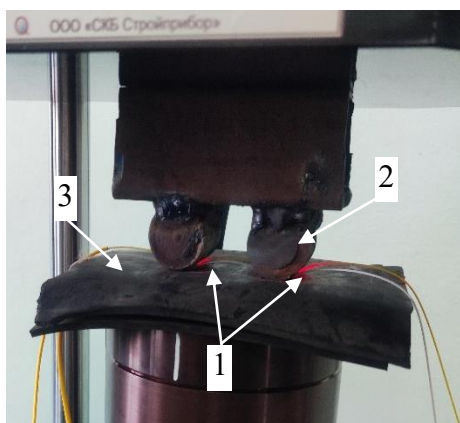


Рисунок 118 – Окно АПК с параметрами дополнительных потерь в ОВ

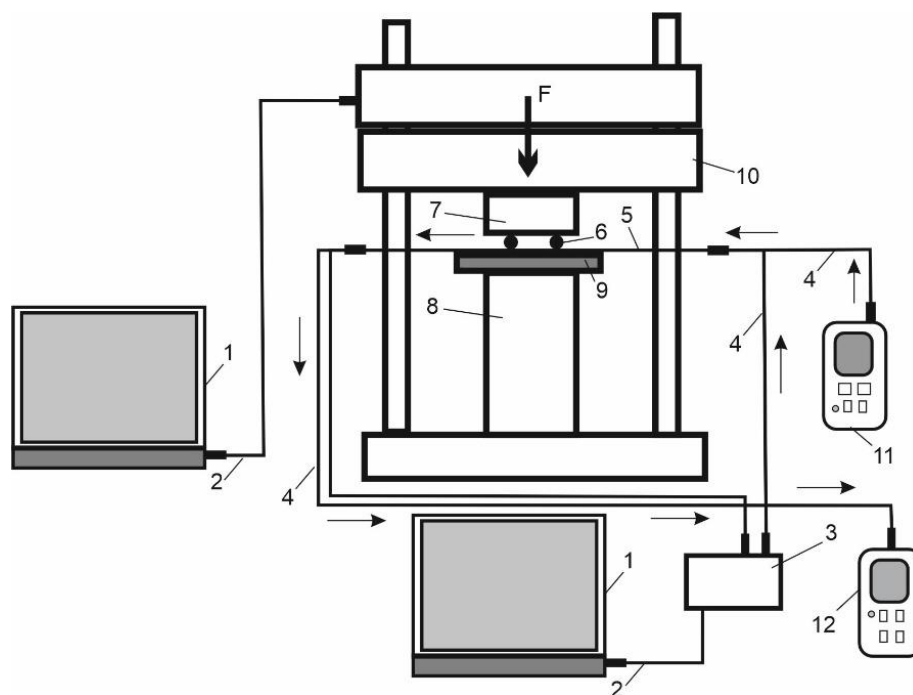
На рисунке 119 показан случай, когда механическое воздействие на ОВ приводит к возникновению микроизгиба, при этом часть световой волны покидает ОВ и выходит наружу, формируя дополнительные потери. Места, где излучение выходит наружу, светятся красным цветом, а если невидимый глазом инфракрасный диапазон световой волны, то потери можно зафиксировать только при помощи приборов.



1 – микроизгиб; 2 – металлический стержень; 3 – резиновое основание.

Рисунок 119 – Микроизгиб ОВ

Схема проведения эксперимента по калибровке АПК и ВОД представлена на рисунке 120, стрелками показано движение световой волны.



1 – персональный компьютер с АПК; 2 – кабель USB; 3 – блок обработки данных; 4 – корпус блока обработки данных; 5 – ВОД; 6 – металлический стержень для создания микроизгиба ОВ; 7 – подвижная плита силовоспроизводящей машины; 8 – неподвижная плита силовоспроизводящей машины; 9 – резиновое основание; 10 – силовоспроизводящая машина МСВ-10МГ-4; 11 – источник излучения; 12 – измерителя оптической мощности.

Рисунок 120 – Схема проведения эксперимента по калибровки АПК и ВОД

Как сказано в главах 2 и 3, механическое воздействие на ОВ приводит к возникновению микроизгиба и увеличению дополнительных потерь [151-163], это было подтверждено в процессе эксперимента, когда силовоспроизводящая машина постепенно увеличивала нагрузку на ВОД. ОВ размещалось на резиновом основании и на него воздействовало два металлических стержня, которые формируют микроизгиб ОВ.

На рисунках 15 и 16 Д, Приложение Г, приведены фотографии, на которых запечатлены моменты проведения калибровки АПК и ВОД. На рисунках 121 и 122 представлены результаты калибровки АПК и ВОД. Представлен график зависимости дополнительных потерь от роста нагрузки при длине волны 650, 1310 и 1550 нм. Наибольшие потери формируются при длине волны 650 нм, поэтому рекомендованная длина измерительного канала до 10 км. Наименьшие потери при длине волны 1550 нм, поэтому рекомендованная длина измерительного канала может быть 30 км и более.

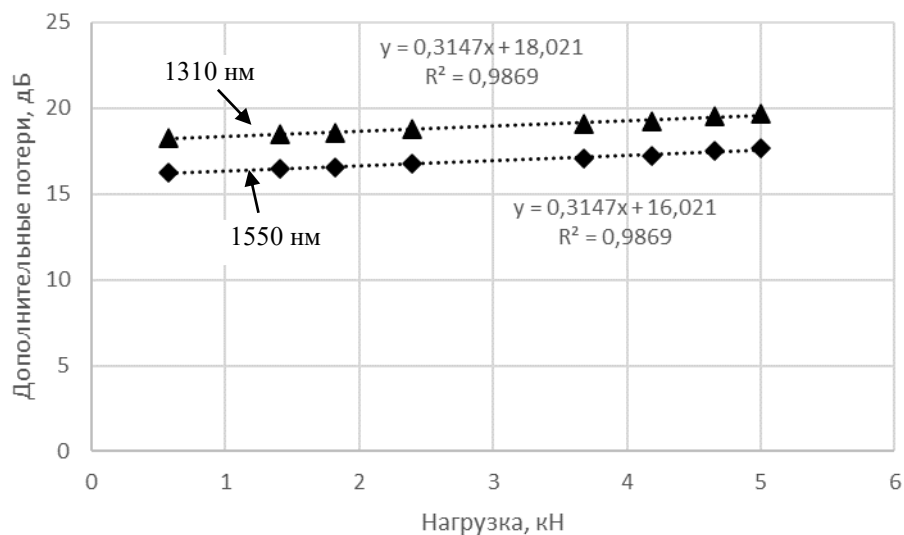


Рисунок 121 – График зависимости дополнительных потерь от нагрузки при длине волны 1310 нм и 1550 нм

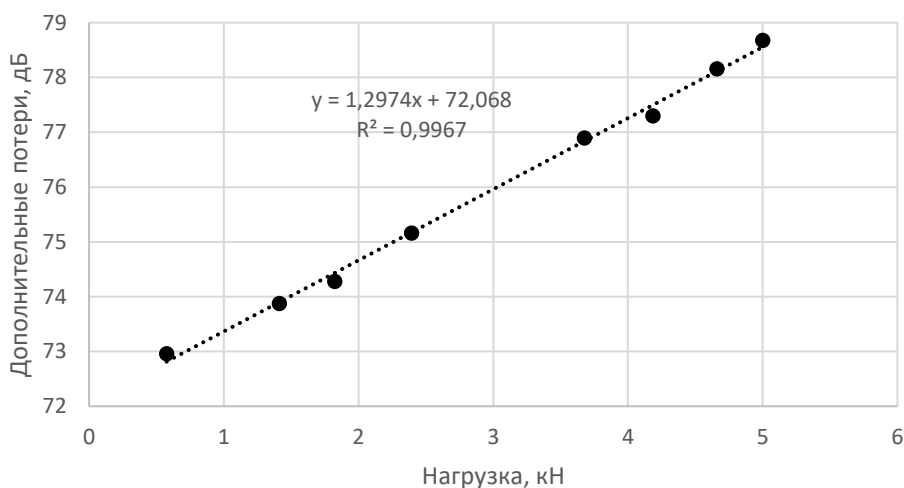


Рисунок 122 – График зависимости дополнительных потерь от нагрузки при длине волны 650 нм

На рисунке 123 представлена зависимость снижения оптической мощности при увеличении нагрузки на ВОД.

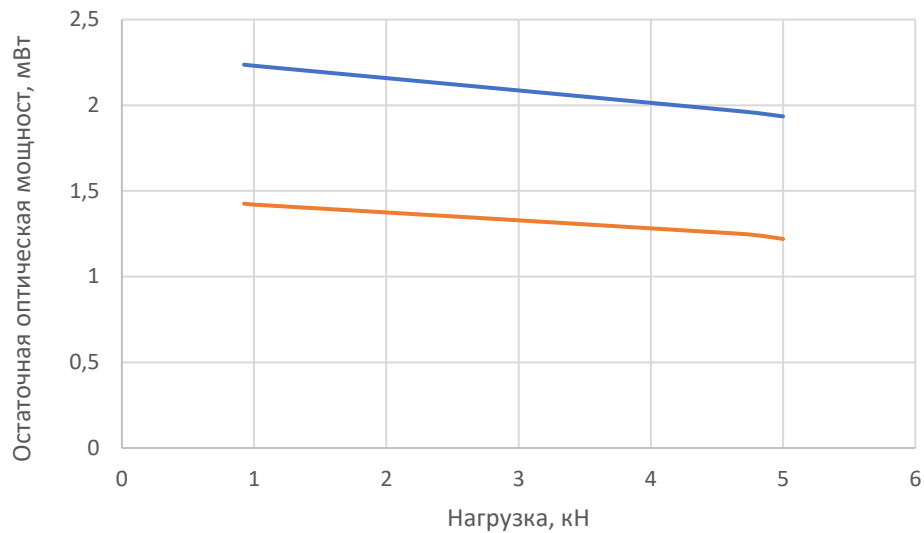


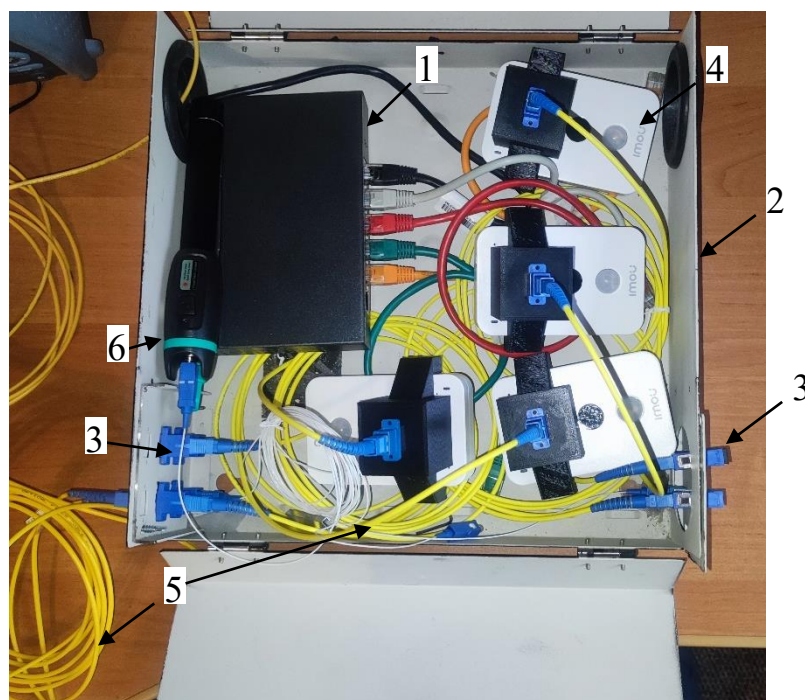
Рисунок 123 – График снижения оптической мощности при росте нагрузки на ВОД при длине волны 1310 нм и 1550 нм

Рассмотренные в данной диссертационной работе АСК и ВОД прошли практическую апробацию в условиях реального строительного объекта ТОО строительная компания «Empire Construction». В течение года были проведены различные работы, связанные с практической апробацией АСК. Наблюдения за строительными конструкциями в реальных условиях строительства и различных сезонах года позволили внести ряд усовершенствований и доработок АПК и самой конструкции АСК. ВОД были установлены на нескольких СЖК. Перед установкой ВОД был проведен ряд подготовительных мероприятий по закреплению ОВ на арматурных стержнях плит перекрытия, колон и фундамента. Монтаж ОВ и предварительные измерения представлены фотографиями на рисунке 17 Д, приложение Г. В течение года проводились контрольные измерения технического состояния СЖК, все изменения НДС отслеживались. Процесс проведения контрольных измерений на реальных СЖК, возводимых ТОО строительная компания «Empire Construction», представлены на рисунке 124 и 18 Д, Приложение Г. На фото видно, как устанавливались ВОД на арматуре. Также есть фото, где заливался бетон в опалубку, где были установлены ВОД. ОВ обязательно должно содержать защитную оболочку диаметром от 1 до 3 мм, лучше всего зарекомендовала себя более толстая оболочка диаметром 3 мм. ОВ с данной оболочке оставались неповрежденными в 90% случаев, что нельзя сказать об ОВ в оболочке диаметром от 1 мм, там в целостности после заливки бетона оставалось около 70 % ВОД. ВОД могут быть повреждены не только при заливке бетона в опалубку, но и при проведении других строительных работ.



Рисунок 124 – Контрольные измерения технического состояния СЖК

На рисунке 125 показан лабораторный образец блока АСК, который был использован при проведении полевых испытаний. На рисунке 19 Д, Приложение Г, представлены несколько фото, когда АСК была дополнена оптическим рефлектометром.



1 – Ethernet коммутатор с модулем связи; 2 – корпус блока обработки данных; 3 – оптический адаптер типа SC; 4 – фотоматрицы и микропроцессоры от IP-камер в едином корпусе (оптический модуль), 5 – оптический патч-корд с коннекторами типа SC; 6 – источник излучения.

Рисунок 124 – Лабораторный образец АПК

## Выводы по главе 4

1. При помощи тензодатчиков невозможно создать распределенную и квази-распределенную систему контроля. Тензодатчики размещаются только на поверхности СЖК или, можно сказать, на ее боковых гранях, а ВОД напротив, может быть встроен непосредственно внутрь СЖК или также быть размещенным на боковой поверхности СЖК, как размещается тензодатчик. Для электрического тензодатчика недостижимо быть распределенным, так как отдельных датчиков понадобится сотни или тысячи на протяженный участок.

2. Изменение картины пикселей сопровождается изменением свойств проходящей световой волны по сердцевине ОВ, которая падает на поверхность фотоматрицы, имеющей высокое разрешение. При механическом воздействии на ВОД в нем возникает фотоупругий эффект, что влечет за собой изменения коэффициента преломления, вследствие чего меняются интенсивность, фаза распространения световой волны и возникают дополнительные потери оптической мощности.

3. Разрешающая способность рефлектометра выше, чем у АПК, и составляет 0,1 м, но для исключения ошибок и повышения надёжности результатов измерений разрешающая способность АПК ограничена до 1 метра, но при необходимости она может быть увеличена до 0,1 метра.

4. В отличие от известных методов оптической интерферометрии и рефлектометрии используется не фотодиод, а фотоматрица высокого разрешения. Это значит, что используется не однопиксельный, а много пиксельный фотоприемник. Световое пятно, падающее на поверхность световой фотоматрицы высокого разрешения и имеющее определённый уровень интенсивности, которая меняется при механическом воздействии на ОВ. В отличие от систем, использующих решетки Брэгга, требуется дорогостоящий оптический анализатор спектра.

5. Отличием предлагаемой методики контроля технического состояния строительных конструкций и протяжённых объектов с применением волоконно-оптических чувствительных элементов квази-распределенного и распределённого типа является использование оптико-электронного анализа негативного изображения светового пятна при помощи программы Python. АПК выполняет анализ интенсивности пикселей светового пятна Пуассона, сформированного на торце ОВ и падающего на поверхность фотоматрицы высокого разрешения.

6. Световое пятно подчиняется нормальному распределению Гаусса, а также характерно высоким уровнем шумов, особенно это касается сердцевины. В оболочку ОВ переходят потери из сердцевины, которые фиксирует АПК. Потери растут при увеличении механического воздействия на ОВ. Шумы в большей мере создаются источником излучения, для нейтрализации важно иметь когерентный источник излучения с минимальным уровнем пульсации не более 1 нм при длине волны 650 нм.

7. В зависимости от настройки фокусного расстояния от торца ОВ до поверхности фотоматрицы, формы оптического волновода и использованного



материала, а также других конструктивных отличий оптического модуля, пиксельная картина и форма светового пятна могут различаться.

8. У АПК с квази-распределенными ВОД разрешающая способность зависит от длины зоны, на которой работает ВОД. Если принять, что длина СЖК, а именно железобетонного фундамента, равна 200 метров, то АСК с четырьмя квази-распределенными ВОД сможет обеспечить разрешающую способность только в пределах 50 метров. На основании того, что 200 метров будут разделены на четыре участка (зоны) протяженностью 50 метров, АСК может работать максимально с 32 каналами. Так как, имеются аппаратные ограничения, то при использовании 20 независимых каналов участка (зоны) будут протяженностью уже в 10 метров, что существенно увеличит точность.

9. АПК с четырьмя квази-распределенными ВОД выполняет роль системы контроля и сигнализации при изменении НДС и нагрузки на СЖК. Для поиска более точного места концентрации механических напряжений, где в последствии могут образоваться усталостные трещины используется оптический рефлектометр. С его помощью можно выполнить уточнения дистанции до точки разрушения СЖК. АСК может уже на ранних этапах установить изменения НДС и оповестить оператора о сложившейся ситуации.

10. Использование лазера с длиной волны 850 нм и выше позволяет работать с более протяженными ВОД длиной 15-30 км, так как увеличение длины волны снижает потери оптической мощности в ОВ, но так как в данной работе рассматривается железобетонный фундамент, то его протяжённость не превышает обычно одного километра, поэтому наиболее выгодно с экономической точки зрения использовать лазер с длиной волны 650 нм, который более массовый в производстве и имеет меньшую стоимость. Его достаточно для работы с квази-распределенным ВОД длиной до 10 км. Для работы с распределенным ВОД желательно использовать длину волны от 900 до 1550 нм.

11. Предлагаемая методика контроля технического состояния строительных конструкций и протяжённых объектов с применением волоконно-оптических чувствительных элементов квази-распределенного и распределённого типа прошла практическую апробацию на реальных строительных объектах ТОО «Empire Construction» города Астаны, результаты апробации подтверждены Актами. Датчики АПК были откалиброваны использованием силовоспроизводящей машины типа СВ-10МГ-4, которая находится в Казахстанском институте стандартизации и метрологии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа содержит новые научно обоснованные теоретические и экспериментальные результаты, совокупность которых имеет важное значение для контроля технического состояния строительных конструкций на основе волоконно-оптических датчиков. Основные выводы по диссертационной работе заключаются в следующем:

1. При помощи математического аппарата установлена взаимосвязь между температурой, дополнительными потерями и изменениями показателей преломления зависимости от приложенной нагрузки на боковую грань оптического волокна. Получена физико-математическая модель изменения параметров интенсивности оптического излучения распространяющегося по сердцевине ОВ в зависимости от расстояния от его центра. Установлено, что деформацию балки можно контролировать по уровню изменения потерь, интенсивности и объёмной плотности оптического излучения проходящего по сердцевине ОВ.

2. С использованием программ ANSYS и COMSOL выполнено компьютерное моделирование механического воздействия на балку, в которой находятся ОВ, которое позволяет симитировать процессы растяжения, сжатия и микроизгиба оптического волокна, а также получить численные значения. Проведенные теоретические исследования позволили установить зависимость срока службы ОВ от его удлинения, для достижения срока службы волокно оптического датчика равного 50 годам необходимо чтобы его удлинение не превышало 0,5%.

3. Проведены экспериментальные исследования образца волоконно-оптической системы контроля технического состояния строительных конструкций. Волоконно-оптическая система показала достаточно высокую линейность и надежность работы. Получен профиль пятна оптического излучения, сформированный на поверхности фотоматрицы, которое схоже с известным пятном Пуассона и имеет ступенчатый профиль, а также подчиняющийся закону распределения Гаусса. Для квази-распределенного датчика оптимальной длиной волны оптического излучения является 650 нм, а для распределенного датчика 1310 или 1550 нм, при этом лазер должен быть когерентным с минимальным уровнем пульсации не более 1 нм.

4. Разработан аппаратно-программный комплекс, предназначенный для оперативного технического контроля состояния железобетонной конструкции, имеющий 4 квази-распределенных датчика с разрешающей способностью от 50 до 500 метров и распределённого датчика до 1 метра. Максимальное число квази-распределенных датчиков может быть увеличено до 32.

5. Предлагаемая методика контроля технического состояния строительных конструкций и протяжённых объектов с применением волоконно-оптических чувствительных элементов квази-распределенного и распределённого типа прошла практическую апробацию на реальных строительных объектах ТОО «Empire Construction» города Астаны, результаты апробации подтверждены актами. Датчики АПК были откалиброваны с использованием силовоспроизводящей машины типа СВ-10МГ-4, которая находится в Казахстанском институте

стандартизации и метрологии. В диссертационной работе полностью решена актуальная научно-техническая задача, связанная с разработкой методики контроля технического состояния строительных конструкций на основе волоконно-оптических датчиков и аппаратно-программного комплекса.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hong R. et al., “Enlarging Dynamic Strain Range in UWFBG Array-Based  $\Phi$ -OTDR Assisted with Polarization Signal,” in IEEE Photonics Technology Letters, vol. 33, no. 18, pp. 994-997, 15 Sept.15, 2021, doi: 10.1109/LPT.2021.3079186.
2. Zinsou R., Wang Y., Liu X., Bai Q., Wang Y. and Jin B., “Adaptive Pulse Period Method for Low-Frequency Vibration Sensing with Intensity-Based Phase-Sensitive OTDR Systems,” in IEEE Access, vol. 8, pp. 41838-41846, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2977000.
3. Minardo, A.; Catalano, E.; Coscetta, A.; Zeni, G.; Di Maio, C.; Vassallo, R.; Picarelli, L.; Coviello, R.; Macchia, G.; Zeni, L. Long-Term Monitoring of a Tunnel in a Landslide Prone Area by Brillouin-Based Distributed Optical Fiber Sensors. Sensors 2021, 21, 7032. <https://doi.org/10.3390/s21217032>
4. Kumagai T., Sato S. and Nakamura T., “Fiber-optic vibration sensor for physical security system,” 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 2012, pp. 1171-1174, doi: 10.1109/CMD.2012.6416369.
5. Masoudi A., Pilgrim J. A., Newson T. P. and Brambilla G., “Subsea Cable Condition Monitoring with Distributed Optical Fiber Vibration Sensor,” in Journal of Lightwave Technology, vol. 37, no. 4, pp. 1352-1358, 15 Feb.15, 2019, doi: 10.1109/JLT.2019.2893038.
6. Adeel M. et al., “Impact-Based Feature Extraction Utilizing Differential Signals of Phase-Sensitive OTDR,” in Journal of Lightwave Technology, vol. 38, no. 8, pp. 2539-2546, 15 April15, 2020, doi: 10.1109/JLT.2020.2966413.
7. Wang C., Shang Y., Zhao W. -A., Liu X. -H., Wang C. and Peng G. -D., “Investigation and Comparison of  $\Phi$ -OTDR and OTDR-Interferometry via Phase Demodulation,” in IEEE Sensors Journal, vol. 18, no. 4, pp. 1501-1505, 15 Feb.15, 2018, doi: 10.1109/JSEN.2017.2785358.
8. Rohwetter P., Eisermann R. and Krebber K., “Random Quadrature Demodulation for Direct Detection Single-Pulse Rayleigh C-OTDR,” in Journal of Lightwave Technology, vol. 34, no. 19, pp. 4437-4444, 1 Oct.1, 2016, doi: 10.1109/JLT.2016.2557586.
9. Sha Z., Feng H., Shi Y., Zhang W. and Zeng Z., “Phase-Sensitive OTDR With 75-km Single-End Sensing Distance Based on RP-EDF Amplification,” in IEEE Photonics Technology Letters, vol. 29, no. 16, pp. 1308-1311, 15 Aug.15, 2017, doi: 10.1109/LPT.2017.2721963.
10. Wu H., Xiao S., Li X., Wang Z., Xu J. and Rao Y., “Separation and Determination of the Disturbing Signals in Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry ( $\Phi$ -OTDR),” in Journal of Lightwave Technology, vol. 33, no. 15, pp. 3156-3162, 1 Aug.1, 2015, doi: 10.1109/JLT.2015.2421953.
11. Adeel M., Tejedor J., Macias-Guarasa J., & Lu C. (2019). Improved Perturbation Detection in Direct Detected  $\phi$ -OTDR Systems using a Novel Match Filtering Approach. IEEE Photonics Technology Letters, 1–1. Doi:10.1109/lpt.2019.2940297

12. Wang P., Lv Y., Wang Y., Liu X., Bai Q., Zhang H., & Jin B. (2020). Adaptability and Anti-noise Capacity Enhancement for OTDR with Deep Learning. *Journal of Lightwave Technology*, 1–1. Doi:10.1109/jlt.2020.3016712
13. Adeel M., Tejedor J., Macias-Guarasa J. and Lu C., “Improved Perturbation Detection in Direct Detected-OTDR Systems using Matched Filtering,” in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 31, no. 21, pp. 1689-1692, 1 Nov.1, 2019, doi: 10.1109/LPT.2019.2940297.
14. Wu H., Liu X., Xiao Y. and Rao Y., “A Dynamic Time Sequence Recognition and Knowledge Mining Method Based on the Hidden Markov Models (HMMs) for Pipeline Safety Monitoring With  $\Phi$ -OTDR,” in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 19, pp. 4991-5000, 1 Oct.1, 2019, doi: 10.1109/JLT.2019.2926745.
15. Yang Z., Hong D., Feng X. and Xie J., “A Novel Event Detection Method for OTDR Trace with High Sensitivity Based on Machine Learning,” 2021 2<sup>nd</sup> Information Communication Technologies Conference (ICTC), 2021, pp. 265-269, doi: 10.1109/ICTC51749.2021.9441614.
16. Shi Y., Wang Y., Wang L., Zhao L., & Fan Z. (2020). Multi-event classification for  $\Phi$ -OTDR distributed optical fiber sensing system using deep learning and support vector machine. *Optik*, 221, 165373. Doi:10.1016/j.ijleo.2020.165373
17. Peng Z., Wen H., Jian J., Gribok A., Wang M., Huang S., Liu H., Mao Z.-H., Chen K.P. Identifications and classifications of human locomotion using Rayleigh-enhanced distributed fiber acoustic sensors with deep neural networks (2020) *Scientific Reports*, 10 (1), № 21014, doi: 10.1038/s41598-020-77147-2
18. Shi Y., Dai Sh., Liu X., Zhang Y., Wu X., Jiang T./ Event recognition method based on dual-augmentation for an  $\Phi$ -OTDR system with a few training samples. *Journal of Optical Communications and Networking*. May 2022. Vol 14, no 5, pp 365 doi:10.1364/OE.468779
19. Abdelli K., Grieser H., Tropschug C., Pachnicke S. Optical Fiber Fault Detection and Localization in a Noisy OTDR Trace Based on Denoising Convolutional Autoencoder and Bidirectional Long Short-Term Memory (2022) *Journal of Lightwave Technology*, 40 (8), pp. 2254-2264 doi: 10.1109/JLT.2021.3138268
20. Ali Y., Zeng X., Shi Y. Quickly build a high-precision classifier for  $\Phi$ -OTDR sensing system based on transfer learning and support vector machine (2022) *Optical Fiber Technology*, 70 № 102868, . DOI: 10.1016/j.yofte.2022.102868
21. Mekhtiyev A.D., Neshina E.G., Madi P., Gorokhov D.A. “Automated fiber-optic system for monitoring the stability of the pit quarry mass and dumps,” in *Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti*, vol. 4, 2021, pp. 19-26. Doi: 10.24000/0409-2961-2021-4-19-26.
22. Mekhtiev A.D., Yurchenko A.V., Ozhigin S.G., Neshina E.G., Al'kina A.D.. “Quasi-distributed fiber-optic monitoring system for overlying rock mass pressure on roofs of underground excavations,” in *Journal of Mining Science*, vol. 57 no. 2, pp. 354-360, 2021.
23. Kulikov A. V. “Fiber-optic perimeter security system on Bragg gratings, as a promising method of monitoring the security of the facility,” in *Polzunovsky Almanac*.no. 2, pp. 274-278, 2010.

24. Tomyshev K. A., Bagan V. A., Astapenko V. A.. Distributed fiber-optic pressure sensors for use in the oil and gas industry PROCEEDINGS of MIPT. – 2012. — Volume 4, No. 2, 64-72.
25. Lanciano C. and Salvini R., “Monitoring of Strain and Temperature in an Open Pit Using Brillouin Distributed Optical Fiber Sensors,” *Sensors*, vol. 20, no. 7, p. 1924, Mar. 2020, doi: 10.3390/s20071924.
26. Payawal J. M. G. and Kim D.-K., “Image-Based Structural Health Monitoring: A Systematic Review,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 2, p. 968, Jan. 2023, doi: 10.3390/app13020968.
27. Wang Y. et al., “A Comprehensive Study of Optical Fiber Acoustic Sensing,” in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 85821-85837, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2924736.
28. Sánchez L. A., Díez A., Cruz J. L., and Andrés M. V., “Recent Advances in Forward Brillouin Scattering: Sensor Applications,” *Sensors*, vol. 23, no. 1, p. 318, Dec. 2022, doi: 10.3390/s23010318.
29. Zheng H., Zhang J., Guo N. and Zhu T., “Distributed Optical Fiber Sensor for Dynamic Measurement,” in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 12, pp. 3801-3811, 15 June 2021, doi: 10.1109/JLT.2020.3039812.
30. Fu J., Guo Y. and Li P., “A Fiber Bragg Grating Anchor Rod Force Sensor for Accurate Anchoring Force Measuring,” in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 12796-12801, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2966235.
31. Nagulapally P., Shamsuddoha M., Rajan G., Mohan M. and Prusty B. G., “Distributed Fiber Optic Sensor-Based Strain Monitoring of a Riveted Bridge Joint Under Fatigue Loading,” in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-10, 2021, Art no. 6009610, doi: 10.1109/TIM.2021.3101324.
32. Wu Y., Zhang Y., Wu J. and Yuan P., “Fiber-Optic Hybrid-Structured Fabry–Perot Interferometer Based on Large Lateral Offset Splicing for Simultaneous Measurement of Strain and Temperature,” in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 19, pp. 4311-4315, 1 Oct. 2017, doi: 10.1109/JLT.2017.2734062.
33. Dong Y. et al., “Simultaneous Temperature and Strain Sensing Based on M-Shaped Single Mode Fiber,” in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 29, no. 22, pp. 1955-1958, 15 Nov. 2017, doi: 10.1109/LPT.2017.2757933.
34. Subramanian R., Zhu C., Zhao H. and Li H., “Torsion, Strain, and Temperature Sensor Based on Helical Long-Period Fiber Gratings,” in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 30, no. 4, pp. 327-330, 15 Feb. 2018, doi: 10.1109/LPT.2017.2787157.
35. Du C., Tang Q., Zhou J., Guo X., Yu T. and Wang X., “Fiber Optic Sensors Based on Photoacoustic Effect for Rebar Corrosion Measurement,” in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, no. 11, pp. 4559-4565, Nov. 2019, doi: 10.1109/TIM.2018.2890318.
36. Liu T., Wei Y., Song G., Hu B., Li L., Jin G., Wang J., Li Y., Song C., Shi Z., et al. “Fibre optic sensors for coal mine hazard detection,” in *Measurement*, vol. 124, pp. 211–223, 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2018.03.046.
37. Ren F., W. Zhang, Y. Li, Y. Lan, Y. Xie and W. Dai, “The Temperature Compensation of FBG Sensor for Monitoring the Stress on Hole-Edge,” in *IEEE*

Photonics Journal, vol. 10, no. 4, pp. 1-9, Aug. 2018, Art no. 7104309, doi: 10.1109/JPHOT.2018.2858847.

38. Li T., C. Shi and H. Ren, “A Novel Fiber Bragg Grating Displacement Sensor with a Sub-Micrometer Resolution,” in IEEE Photonics Technology Letters, vol. 29, no. 14, pp. 1199-1202, 15 July 2017, doi: 10.1109/LPT.2017.2712602.

39. Nagulapally P., M. Shamsuddoha, G. Rajan, M. Mohan and B. G. Prusty, “Distributed Fiber Optic Sensor-Based Strain Monitoring of a Riveted Bridge Joint Under Fatigue Loading,” in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 70, pp. 1-10, 2021, Art no. 6009610, doi: 10.1109/TIM.2021.3101324.

40. Su J., X. Dong and C. Lu, “Property of Bent Few-Mode Fiber and Its Application in Displacement Sensor,” in IEEE Photonics Technology Letters, vol. 28, no. 13, pp. 1387-1390, 1 July 2016, doi: 10.1109/LPT.2016.2542366.

41. Kim S.-T., Y.-S. Park, C.-H. Yoo, S. Shin, and Y.-H. Park, “Analysis of Long-Term Prestress Loss in Prestressed Concrete (PC) Structures Using Fiber Bragg Grating (FBG) Sensor-Embedded PC Strands,” Applied Sciences, vol. 11, no. 24, p. 12153, Dec. 2021, doi: 10.3390/app112412153.

42. Kulchin Y.N., O.T. Kamenev, Y.S. Petrov, V.A. Kolchinsky. “Fiber-optic interferometric receivers of weak seismic signals” in Bulletin of the FEB RAS, №4, pp. 56-59, 2016

43. Garcia-Souto J.A., H.Lamela-Rivera. “Comparative analysis of optical-fibre interferometric sensors versus accelerometers: application to vibrations inside high-power transformers,” in J. Opt. A: Pure Appl. Opt., vol. 4, pp. 318–326, 2002.

44. Gardner D.L., T. Hofler., S.R.Baker, R.K. Yarber, S.L. Garrett. “A fiber-optic interferometric seismometer” in J. Lightwave Tech, vol. 5, no. 7, pp. 953–960, 1987.

45. S. Kim, Y. Park, S. Park, K. Cho, and J.-R. Cho, “A Sensor-Type PC Strand with an Embedded FBG Sensor for Monitoring Prestress Forces,” Sensors, vol. 15, no. 1, pp. 1060–1070, Jan. 2015, doi: 10.3390/s150101060.

46. Eric Udd; William B. Spillman, “Fiber Optic Sensors Based on the Mach–Zehnder and Michelson Interferometers,” in Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists, Wiley, 2011, pp.231-275, doi: 10.1002/9781118014103.ch10.

47. Kamenev O.T., Yu.N. Kulchin, Yu.S. Petrov, R.V. Khizhnyak. “Application of the Mach-Zehnder fiber-optic interferometer for the creation of long-based deformometers,” in Letters to ZTF, vol. 40, no. 3, pp. 49-56, 2014

48. Zhao Y., Zhang N., and Si G, “A Fiber Bragg Grating-Based Monitoring System for Roof Safety Control in Underground Coal Mining,” Sensors, vol. 16, no. 10, p. 1759, Oct. 2016, doi: 10.3390/s16101759.

49. Mekhtiyev A.D., Yurchenko A.V., Kalytka V.A., Neshina Y.G., Alkina A.D., Madi P.Sh. “A Fiber-Optic Long-Base Deformometer for a System for Monitoring Rocks on the Sides of Quarries,” in Technical Physics Letters, vol. 48, no. 15, pp. 30-32, April 2022. Doi: 10.21883/PJTF.2022.15.53129.19200.

50. S. Li, S. Ren, S. Chen, and B. Yu, “Improvement of Fiber Bragg Grating Wavelength Demodulation System by Cascading Generative Adversarial Network and Dense Neural Network,” Applied Sciences, vol. 12, no. 18, p. 9031, Sep. 2022, doi: 10.3390/app12189031.

51. R. Zinsou, Y. Wang, X. Liu, Q. Bai, Y. Wang and B. Jin, “Adaptive Pulse Period Method for Low-Frequency Vibration Sensing with Intensity-Based Phase-Sensitive OTDR Systems,” in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 41838-41846, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2977000.

52. Y. Sun, X. Li, C. Ren, H. Xu and A. Han. Distributed Fiber Optic Sensing and Data Processing of Axial Loaded Precast Piles. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 169136-169145, 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3023626>.

53. H. Wu et al., “Real-Time Denoising of Brillouin Optical Time Domain Analyzer With High Data Fidelity Using Convolutional Neural Networks,” in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 11, pp. 2648-2653, 1 June1, 2019, doi: 10.1109/JLT.2018.2876909.

54. V. Yugay, A. Mekhtiyev, P. Madi, Y. Neshina, A. Alkina, F. Gazizov, O. Afanaseva, S. Ilyashenko, “Fiber-Optic System for Monitoring Pressure Changes on Mine Support Elements,” *Sensors*, vol. 22, no. 5, p. 1735, Feb. 2022, doi: 10.3390/s22051735.

55. A. Mekhtiyev, Y. Neshina, A. Kozhas, B. Aubakirova, Raimagambetova, S. Toleubayeva, A. Tleubayeva. “Monitoring Reinforced Concrete Building Structure Technical Conditions Based on The Use of Quasi-Distributed Fiber-Optic Sensors”, In *International Journal of Geomate*, vol. 23, no. 97, pp. 154–162, Sep. 2022.

56. Роберт Дж. ШРОЕДЕР (US) Роберт Дж. ШРОЕДЕР Эрик УДД (US) Эрик УДД//Патент № 2205374С2 Russia// Волоконно-оптические датчики давления и система измерения давления

57. Аксенов Р.А., Ермаков Н.А., Репин В.Н., Репин М.В., Цаплин А.И. //Патент №2269755 – Волоконно-оптический датчик давления

58. Kioko, J.M. Causes of building failures in Africa: A case study on collapsing structures in Kenya. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2014. Volume 11, Issue 3, Pp. 09-10. DOI:10.9790/1684-11370910

59. Cogurcu, M.T. Construction and design defects in the residential buildings and observed earthquake damage types in Turkey. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2015. Pp. 931–945, <https://doi.org/10.5194/nhess-15-931-2015>

60. Allotey, S.E. An evaluation of the impact of defects in public residential buildings in Ghana. *Civil and Environmental Research*. 2014. Vol. 6, No. 11. Pp.58-64

61. Kraus, M., Vondráčková T., Nývlt, V. Defects, faults and accidents of contemporary constructions. *MATEC Web of Conferences 93 (2017): 8<sup>th</sup> International Scientific Conference Building Defects (Building Defects 2016. Volume 93, 2017. France: EDP Sciences, 2016. S. 03004-3010. DOI: 10.1051/matecconf/20179303004.*

62. Chong, W.K., & Low, S.P. Latent Building Defects: Causes and Design Strategies to Prevent Them. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2006. No 20(3). Pp. 213-221. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3828(2006)20:3(213)

63. Mekhtiyev, A.D., Yurchenko, A.V., Neshina, Y.G., Alkina, A.D., Kozhas, A.K., Zholmagambetov, S.R. Nondestructive Testing for Defects and Damage to Structures in Reinforced Concrete Foundations Using Standard G.652 Optical Fibers *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Yekaterinburg: Pleiades Publishing Ltd., 2020, Vol.56, No. 7, Pp. 179–190. DOI: 10.1134/S1061830920020072



64. Кожас, А.К., Балтабаева, Н., Капбасова, А. Дефекты и повреждения при строительстве высотных объектов из монолитного железобетона в Казахстане и причины их возникновения// Труды Университета. 2014. №.1 С. 70-72.
65. Palei, S., Das, S. Sensitivity analysis of support safety factor for predicting the effects of contributing parameters on roof falls in underground coal mines. International Journal of Coal Geology. 2008. № 75. 241–247. DOI 10.1016/j.coal.2008.05.004
66. Леденев, В.В., Однолько, В.Г. Анализ причин аварий зданий и пути повышения их надежности// Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2012. Vol. 18. №.2. С. 449-457
67. Бербекоев, Ж. В. Неразрушающие методы контроля прочности бетона. Молодой ученый. 2012. №11. С. 20-23
68. Запруднов В.И., Серегин, Н.Г. Методы и средства мониторинга технического состояния строительных конструкций// Лесной вестник. 2019. Vol. 23. № 5. С. 108–115. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-5-108-115
69. Буймистряк Г.Я. Принципы построения интеллектуальных волоконно-оптических датчиков // Фотон-Экспресс. 2011. № 6 (43). С. 38-39. <http://fotonexpres.ru/arhivy/arhivy-nomerov>
70. Буймистряк Г.Я. Волоконно-оптические датчики для экстремальных условий. Control engineering. Россия. 2013. № 3 (45). С. 34-40. [https://controleng.ru/wp-content/uploads/ce\\_46\\_p34\\_volokonno-opticheskie\\_datchik\\_dlya\\_ekstremalnykh\\_uslovii.pdf](https://controleng.ru/wp-content/uploads/ce_46_p34_volokonno-opticheskie_datchik_dlya_ekstremalnykh_uslovii.pdf)
71. Liu J., Chai J., Wei S., Li, Y., Zhu, L., Qiu, B., Theoretical and Experimental Study on Fiber Bragg Grating Sensing of Rock Strata Settlement Deformation. Journal of Coal Science & Engineering, (China), Springer. 2008. 14 (3). Pp 394-398
72. Kim S.T., Pak Y.H., Park, S.Y., Cho, K., Cho, J.R. A sensor-type PC strand with an em-bedded FBG sensor for monitoring prestress forces // Sensors (Switzerland). 2015. Vol. 15. No. 1. Pp. 1060-1070. DOI: 10.3390/s150101060. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4327064/>
73. Liu T., Wei Y., Song G., Li, Y., Wang, J., Ning, Y., Lu, Y. Advances of optical fiber sensors for coal mine safety monitoring applications. Pro-ceedings of the 2013 International Conference on Microwave and Photonics, 2013. Pp. 102-111.
74. Yiming, Z., Nong Z. and Guang-yao Si. A fiber bragg grating-based monitoring system for roof safety control in underground coal mining. Sensors (Switzerland). 2016. Vol. 16. No.10. Pp. 112-117. DOI: 10.3390/s16101759. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5087543/>
75. Волчихин В. И., Мурашкина Т. И. Датчики и системы. Измерения, контроль, автоматизация. 2001. № 7. С. 54-58. <http://naukarus.com/169roblem-sozdaniya-volokonno-opticheskikh-datchikov>
76. Каменев О.Т., Кульчин, Ю.Н., Петров Ю.С., Хижняк Р.В. Применение волоконно-оптического интерферометра Маха–Цендера для создания длиннобазовых деформометров. Письма в ЖТФ. 2014. 40 (3). Pp. 49-56. <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/27305> Кульчин, Ю.Н., Каменев, О.Т.,

77. Петров Ю.С., Колчинский В.А. Волоконно-оптические интерферометрические приемники слабых сейсмосигналов. Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2016. № 4. С. 56-59
78. Nguyen, W., Duncan, J.F., Jen, G., Ostertag, C.P. Influence of matrix cracking and hybrid fiber reinforcement on the corrosion initiation and propagation behaviors of reinforced concrete. Corrosion Science. 2018. Vol. 140. Pp. 168-181. Doi: 10.1016/j.corsci.2018.06.004 [https://pstu.ru/files/file/FPMM/of/shumkova\\_specialnye\\_volokonnye\\_svetovody.pdf](https://pstu.ru/files/file/FPMM/of/shumkova_specialnye_volokonnye_svetovody.pdf).
79. Fan, L., Bao, Y., Meng, W., Chen, G. In-situ monitoring of corrosion-induced expansion and mass loss of steel bar in steel fiber reinforced concrete using a distributed fiber optic sensor. Composites Part B: Engineering. 2019. Vol. 165. Pp. 679-689
80. Jonas, H. Osório, et al. Simplifying the Design of Microstructured Optical Fibre Pressure Sensors. Scientific Reports. 2017. No7. <https://www.nature.com/articles/s41598-017-03206-w>
81. Zhao, Z., Zhang, Y., Li, C., Wan, Z., Li, Y., Wang, K., Xu, J. Monitoring of coal mine roadway roof separation based on fiber Bragg grating displacement sensors. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2015. No74, Pp. 128-132.
82. Bin, T., Hua, C. Application of Distributed Optical Fiber Sensing Technology in Surrounding Rock Deformation Control of TBM-Excavated Coal Mine Roadway. Journal of Sensors. New York. 2018. 2018:8010746. DOI:10.1155/2018/8010746
83. Fursa, T.V., Petrov, M.V., Dann, D.D. Developing a Nondestructive Method for Revealing Defective Areas in Reinforced Concrete Under Bending Conditions. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. Vol. 55. Issue 4. Pp. 293-298.
84. Fursa, T.V., Petrov, M.V., and Dann, D.D. A method for evaluating failure in reinforced concrete under bending based on the response of electrical parameters to an impact action. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. Vol. 54, No. 7, Pp. 519-527
85. Guo, F., Yu, Z., Liu, P., and Shan, Z., Practical issues related to application of electromechanical impedance-based method in concrete structural health monitoring. Research in Nondestructive Evaluation. 2015. Vol. 27. Pp. 26-33
86. Морарескул, Н. Н. Устройство фундаментов в торфяных грунтах (особенности технологии). Геотехника: наука и практика: сборник научных трудов//Министерство образования Российской Федерации. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Санкт-Петербург, 2000.С. 47-51
87. Polyakov, A.V. Quasi-distributed recirculation fiber-optic temperature sensor. Optical Memory and Neural Networks. 2009. Vol. 18, №4. Pp. 271–277
88. Yurchenko, A.V., Mekhtiyev, A.D., Neshina, Y.G., Alkina, A.D., Madi, P.Sh. Physical Principles of Developing Pressure Sensors Using Refractive Index Changes in Optical Fiber Microbending. Russian Physics Journal. 2020. <https://DOI.org/10.1007/s11182-020-02038-y>

89. Mekhtiyev, A.D., Yurchenko, A.V., Alkina, A.D. Nondestructive Testing for Defects and Damage to Structures in Reinforced Concrete Foundations Using Standard G.652 Optical Fibers. Russian Journal of Nondestructive Testing, Yekaterinburg: Pleiades Publishing Ltd., 2020. Vol.56. No. 7. Pp. 179-190. DOI <https://doi.org/10.1134/S1061830920020072>
90. Mekhtiyev, A., Bulatbayev, F., Neshina, Y., Siemens, E., Alkina, A. and Shaigarayeva, T. The external mechanical effects on the value of additional losses in the telecommunications fiber optic cables under operating conditions. Proceedings of the 6th International Conference on Applied Innovation in IT, Koethen: Anhalt University of Applied Sciences. 2018. Vol. 1. Issue 6. Pp.123-127
91. Yurchenko, A.V., Mekhtiyev, A.D., Bulatbayev, F.N., Neshina, Y.G., Alkina, A.D. The Model of a Fiber-Optic Sensor for Monitoring Mechanical Stresses in Mine Working. Russian Journal of Nondestructive Testing, Yekaterinburg: Pleiades Publishing Ltd. 2018. Vol.54. No. 7, Pp. 528-533
92. Yurchenko, A., Mekhtiyev, A., Alkina, A. and Yugai, V. Passive Perimeter Security Systems Based On Optical Fibers Of G 652 Standard. Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT. 2019. Vol. 7. Issue 1. Pp. 31-36.
93. Yiming, Z. A fiber bragg grating-based monitoring system for roof safety control in underground coal mining / Z. Yiming, Z. Nong, S. Guangyao. Sensors 2016. Vol. 16 (10). Pp. 112-117. <https://doi.org/10.3390/s16101759>
94. Barre, F., Bisch, P., Chauvel, D., Cortade, J., Coste, J.-F., Dubois, J.-P., Erlicher, S., (...), Toutlemonde, F. Control of Cracking in Reinforced Concrete Structures (2016) Control of Cracking in Reinforced Concrete Structures, pp. 1-226. Doi: 10.1002/9781119347088
95. Xu X., & Zhao Y. (2021). Corrosion-induced cracking propagation of RC beams subjected to different corrosion methods and load levels. Construction and Building Materials, 286, 122913. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.122913
96. Chrysanidis, T.A., Panoskaltsis, V.P. Experimental investigation on cracking behavior of reinforced concrete tension ties (2022) Case Studies in Construction Materials, 16, art. No. e00810. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00810
97. Concu, G., Trulli, N. Concrete Defects Sizing by Means of Ultrasonic Velocity Maps. Buildings. 2018. 8(12), 176. Doi:10.3390/buildings8120176
98. Kartashev, V. G., Kachanov, V. K., Sokolov, I. V., Shalimova, E. V., Kontsov, R. V., & Voronkova, L. V. (2015). Ultrasonic structural probing of products based on materials with a complex structure by analyzing the statistical characteristics of the structural noise. Russian Journal of Nondestructive Testing, 51(6), 360–373. Doi:10.1134/s1061830915060042
99. Spears, M., Hedjazi, S., Taheri, H., Ground penetrating radar applications and implementations in civil construction. Journal of Structural Integrity and Maintenance. 2023. Vol 8, N 1. Pp. 36 – DOI10.1080/24705314.2022.2142901
100. Capozzoli, L., & Rizzo, E. Combined NDT techniques in civil engineering applications: Laboratory and real test. Construction and Building Materials, 2017. 154, 1139–1150. DOI10.1016/j.conbuildmat.2017.07.147

101. Eric Udd; William B. Spillman, “The Emergence of Fiber Optic Sensor Technology,” in *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*, Wiley, 2011, pp.1-8, doi: 10.1002/9781118014103.ch1.
102. Shadab A., Raghuwanshi S. K. and Kumar S., *Advances in Micro-Fabricated Fiber Bragg Grating for Detection of Physical, Chemical, and Biological Parameters—A Review*, IEEE Sens. J. Vol. 22, Pp. 15650-15660, 2022. Doi:10.1109/JSEN.2022.3188813
- 103 Yang, L., Li, C., Luo, C., *Thermal Strain Detection for Concrete Structure Cold Shrinkage under Stress Constraint with FBG.*, Sensors., 2022., 22(24), 9660. <https://doi.org/10.3390/s22249660>
104. Pereira, L., Mesquita, E., Alberto, N., Melo, J., Marques, C., Antunes, P., André, P.S., Varum, H. *Fiber Bragg Grating Sensors for Reinforcing Bar Slippage Detection and Bond-Slip Gradient Characterization (2022)* Sensors, 22 (22), 8866, doi:10.3390/s22228866
105. Banda, P., Tamin, M.D., Meyer, J. *Applied Quasi-Distributed Fibre Bragg Grating Strain Sensors in Structural Damage Sensing of a Bridge Structure (2022)* SAIEE Africa Research Journal, 113 (2), Pp. 75-87 doi:10.23919/SAIEE.2022.9785541
106. Pereira, M., Glisic, B. *Physics-Informed Data-Driven Prediction of 2D Normal Strain Field in Concrete Structures (2022)* Sensors, 22 (19), 7190. Doi:10.3390/s22197190
107. Lan C., Zhou W., Xie,Y., *Detection of ultrasonic stress waves in structures using 3D shaped optic fiber based on a Mach–Zehnder interferometer.*, 2018 Sensors (Switzerland) 18(4),1218 <https://doi.org/10.3390/s18041218>
108. Guillen Bonilla, Guillen Bonilla, Rodríguez Betancourt, Casillas Zamora, Sánchez Morales, Gildo Ortiz, & Guillen Bonilla. (2019). *Signal Analysis, Signal Demodulation and Numerical Simulation of a Quasi-Distributed Optical Fiber Sensor Based on FDM/WDM Techniques and Fabry-Pérot Interferometers*. Sensors, 19(8), 1759. Doi:10.3390/s19081759
109. Barrias, A., Casas, J. R., & Villalba, S. (2017). *Application study of embedded Rayleigh based Distributed Optical Fiber Sensors in concrete beams*. Procedia Engineering, 199, 2014–2019. Doi:10.1016/j.proeng.2017.09.466
110. Berrocal, C. G., Fernandez, I., Bado, M. F., Casas, J. R., & Rempling, R. (2021). *Assessment and visualization of performance indicators of reinforced concrete beams by distributed optical fibre sensing*. Structural Health Monitoring, 20(6), Pp 3309 – 3326. Doi:10.1177/1475921720984431
111. Bertulesi, M., Bignami, D.F., Boschini, I., Brunero, M., Ferrario, M., Menduni, G., Morosi, J., Paganone, E.J., Zambrini, F. *Monitoring Strategic Hydraulic Infrastructures by Brillouin Distributed Fiber Optic Sensors (2022)* Water (Switzerland), 14 (2), art № 188. Doi:10.3390/w14020188
112. Becks, H., Baktheer, A., Marx, S., Classen, M., Hegger, J., Chudoba, R. *Monitoring concept for the propagation of compressive fatigue in externally prestressed concrete beams using digital image correlation and fiber optic sensors (2023)* Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 46 (2), pp. 514-526. DOI: 10.1111/ffe.13881

113. Hoult, R., Bertholet, A., de Almeida, J.P. Core versus Surface Sensors for Reinforced Concrete Structures: A Comparison of Fiber-Optic Strain Sensing to Conventional Instrumentation (2023) *Sensors*, 23 (3), статья №1745. Doi:10.3390/s23031745

114. Окосси Т., Окомото К., Волоконно-оптические датчики. //Пер. с япон. Горбунова Г.Н., Ленинград: Энергоатомиздат, 1991. 255 с.

115. Бусурин В.И., Новсов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения. Москва, Энергоатомиздат, 1990, 256 с.

116. Буймистряк Г. Я. Информационно–измерительная техника и технология на основе волоконно-оптических датчиков и систем. Монография. СПб : ИВА, ГРОЦ Минатома, 2005. 191с.

117. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников// Пер. с англ. Э.Удда. Москва: Техносфера, 2008, 520 с.

118. Кульчин Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические датчики и измерительные сети. Владивосток: Дальнаука, 1999, 286 с.

119. Методология и методы научных исследований в экономике и менеджменте. Пособие для вузов / Завьялова Н.Б., Головина А.Н., Завьялов Д.В., Дьяконова Л.П., Мельников М.С. и др.; под ред. Н. Б. Завьяловой, А.Н. Головиной-Москва- Екатеринбург, 2014. – 282 с.

120. Методы и средства измерений, испытаний и контроля. Учебное пособие – 2-е изд. Перераб. И доп.- Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 462 с.

121. Методология научных исследований: методические рекомендации / сост. Т.М. Яркова; М-во с.-х. РФ, федеральное гос. Бюджетное образов. Учреждение высшего образования «Пермский гос. Аграрно-технолог. Университет им. Акад. Д.Н. Прянишникова», каф организации производства и предпринимательства в АПК. – Пермь: ИПЦ «Прокрость», 2018. –63 с.

122. Теоретические основы и практика научных исследований : учеб. Пособие / Н. Г. Эйсмонт, В. В. Даньшина, С. В. Бирюков ; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2018.

123. Иоргачев Д.В. Бондаренко О.В. Волоконно-оптические кабели и линии связи. Учебное пособие. ЭКО-ТРЕНДЗ. Москва, 2002, 276 стр.

124. Дмитриев С.А., Слепов Н.Н., Дураев В.П. Волоконно-оптическая техника. Современное состояние и новые перспективы. Издательство: Техносфера, 2010 г. <https://www.labirint.ru/books/939569/>

125. Цуканов В. Н., Яковлев М. Я. Волоконно-оптическая техника. Практическое руководство. Изд. 5-е. Издательство Инфра-Инженерия. Москва. 2022. 300 с.

126. Горлов Н.И., Мехтиева.Д., Таткеева Г.Г., Алдошина О.В., Югай В.В. Направляющие системы и волоконно-оптическая техника инфокоммуникаций. Учебник (Утвержден МОН РК). – Караганда: Изд-во КарГТУ, 2016. – 251 с.

127. А Д Мехтиев, В. В. Югай, Н. Г. Нешина, А.Д Алькина. Волоконно-оптические системы идентификации физических величин. Монография / Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. 151с. ISBN 078-601-320-272-3.

128. Лиокумович Л.Б. Волоконно-оптические интерферометрические измерения. Монография. СПб.: Изда-во Политехнического университета, Санкт – Петербург, 2007, 110 с.
129. Кульчин Ю.Н., Каменев О.Т., Петров Ю.С., Колчинский В.А. Волоконно-оптические интерферометрические приемники слабых сейсмосигналов. Вестник: ДВО РАН. 2016. № 4, с.56-59
130. Семенов А. С., Волоконно-оптические датчики. Три десятилетия развития (Ю. Н. Кульчин. “Распределенные волоконно-оптические измерительные системы” (М.: Физматлит, 2001)), Квантовая электроника, 2002, том 32, номер 8, 751
131. Lee V.H., Kim Y.H., Park K.S. et al. Interferometric Fiber Optic Sensors //Sensors. 2012. Vol. 12. P. 2467–2486
132. Стригалеv В.Е., Мешковский И.К., Моор Я.Д., Особенности использования фазо-чувствительных устройств в волоконно-оптических измерительных системах– СПб: Университет ИТМО, 2021. – 41 с.-
133. Wagner J.W., Spicer J.B. Theoretical noise-limited sensitivity of classical interferometry // J. Opt. Soc. Am. B. 1987. Vol. 4. P. 1316-1326.
134. Kamenev O.T., Kulchin Yu.N., Petrov Yu.S., Khizhnyak R.V. Use of a fiber-optic Mach-Zehnder interferometer for creating a deformometer with extended gage length // Technical Physics Letters. 2014. Vol. 40, N 2. P. 119-122.
135. Kamenev O.T., Kulchin Yu.N., Petrov Yu.S., Khiznyak R.V., Romashko R.V. Fiber-optic seismometer on the basis of Mach-Zehnder interferometer // Sensors and Actuators A. 2016. Vol. 244. P. 133-137.
136. Mekhtiyev, A. D., Yurchenko, A.V., Neshina, E.G., Al’kina, A.D., Madi, P.S. Physical Principles of Developing Pressure Sensors Using Refractive Index Changes in Optical Fiber Microbending. Russian physics journal. 63 (2020) №2, Стр.: 323-331 DOI: 10.1007/s11182-020-02038-y
137. Мехтиев А.Д., Юрченко А.В., Калытка В.А., Нешина Е.Г., Алькина А.Д., Мадн П.Ш. Волоконно-оптический длинно базовый деформометр для системы мониторинга горных пород бортов карьеров. Письма в ЖТФ, 2022, Том 48. Вып. 15. Doi:10.21883/0000000000
138. Yurchenko, A. V. Research of the additional losses occurring in optical fiber at its multiple bends in the range waves 1310 nm, 1550 nm and 1625 nm Long / A.V. Yurchenko, N.I. Gorlov, A.D. Mekhtiyev, A.A. Kovtun // IOP Science. Journal of Physics. — 2016. — V. 671. — Pp. 1-5.
139. С.К Као, Дж. Хокхэм: «Волоконно-диэлектрические поверхностные волноводы для оптических частот». Proc. IEEE. 113 (1966) (7), 1151–1158. DOI: 10,1049 / piee.1966.0189
- 140 <http://en.wikipedia.org/wiki>
141. Gambling W. A.: The rise and rise of optical fibers, JSTQE 6 (2000) 6, pp.1084-1089, DOI: 10.1109/2944.902157
142. Сыркин В. Г.: CVD-метод. Химическое парофазное осаждение. 2000, Москва, Наука, pp. 482.
143. S. Nagel an overview of the modified chemical vapor deposition (MCVD) process and performance, IEEE J. Quantum Electron.18 (1982) 4, pp.459 – 463

Skuja L., Hirano M., Hosono H., Kajihara K. Defects in oxide glasses". *Physica Status Solidi C*. 2 (2005) (1), pp.15–24.

144. Бурде В.А. Методы и средства локализации дефектов волокна в строительных длинах оптического кабеля/ *Вестник связи*, 7 (2010), с.19-21.

145. A. Dhar: The mechanism of rare earth incorporation in solution doping process, *Opt. Express* 16 (2008) 17, pp. 12835-12846

146. Argyros A Microstructured polymer optical fibers. *Journal of Lightwave Technology* 27 (2009) 11, pp.1571–1579

147. X. Wang: A review of the fabrication of optic fiber, *Proc. SPIE* 6034 (2006), pp. 346-354. DOI: 10.1117/12.668147

148. Carlie N, Petit L, Richardon K Engineering of glasses for advanced optical fiber applications. *J Eng Fiber Fabr* 4 (2009) (4), pp. 21–29

149. Mekhtiyev A. D., Kovtun A. A., Yugay V. V., Neshina E.G., Aimagambetova R. Zh, Alkina A. D. Research of mechanical stress at tension of quartz optical fiber (QOF). *Metalurgija* 60 (2021) 1-2, 571-574.

150. Венцель, Е.С., Овчаров, Л.А. Теория вероятностей и инженерные приложения. М.: Наука, 1988.

151. Аймагамбетова Р. Ж. Система мониторинга несущих строительных конструкций зданий и сооружений на основе применения волоконно-оптических технологий / Мехтиев А.Д., Наркевич М.Ю., Нешина Е.Г., Кожас А. К.//Инженерно-строительный журнал 2023 № 3 (119) (*Magazine of Civil Engineering*)

152. Аймагамбетова Р.Ж. Технология блокчейн в обеспечении метрологической прослеживаемости результатов измерений / Есенбаев С.Х., Баянова М.Е. // *Мир измерений*. 2021. № 1. С. 50-52.

153. Аймагамбетова Р.Ж. Волоконно-оптическая система контроля устойчивости бортов карьеров / Мади П.Ш., Алькина А.Д., Юрченко А.В., Мехтиев А.Д. // *Омский научный вестник*. 2022. № 4 (184). С. 112-118.

154. Аймагамбетова Р.Ж. Аппаратно-программный комплекс для контроля смещения бортов карьеров / Мади П.Ш., Алькина А.Д., Юрченко А.В., Мехтиев А.Д. // *Вестник Казанского государственного энергетического университета* Том: 14 №3 (55) Год: 2022

155. Аймагамбетова Р.Ж. Автоматическая система контроля целостности волоконно-оптических кабелей /А.Д. Алькина, Юрченко А.В. А.Д. Мехтиев, Мади П.Ш // *Мир измерений* №2 / 2023

156. Aimagambetova R.Z. Research of mechanical stress at tension of quartz optical fiber (QOF) / Mekhtiyev, A.D., Kovtun, A.A., Yugay, V.V., Alkina, A.D. // *Metalurgija*, 2021, 60(1-2), с. 121–124

157. Aimagambetova R.Z. Design of an information-measuring system for monitoring deformation and displacement of rock massif layers based on fiber-optic sensors / Yugay, V., Mekhtiyev, A., Neshina, Y., Musagazhinov, M., Kovtun, A. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, 6(5-114), с. 12–27

158. Aimagambetova R.Z. Monitoring reinforced concrete building structure technical conditions based on the use of quasi-distributed fiber-optic sensors / Mekhtiyev,

A., Neshina, Y., Kozhas, A., Toleubayeva, S., Tleubayeva, A. // International Journal of GEOMATE, 2022, 23(97), pp. 154–162

159. Aimagambetova R.Z. Using optical fibers (of) to control the stress-strain state of steel structures subject to fatigue failure / V. V. Yugay, A. D. Mekhtiyev, S. G. Ozhigin, Y. G. Neshina, Y. Zh. Sarsikeev // METALURGIJA 61 (2022) 2, 351-354.

160. Аймагамбетова Р.Ж. Волоконно-оптическая система контроля устойчивости бортов карьеров. П. Ш. Мади, А. Д. Алькина, А.В. Юрченко, А.Д. Мехтиев. Омский научный вестник № 4 (184). 2022, 112-117. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-184-112-117

161. Автоматизированная волоконно-оптическая система мониторинга, телеметрии и контроля стационарных объектов, водоемов и сейсмоопасных участков. Патент на полезную модель № 7775. Дата выдачи 27.01.2023

162. Волоконно-оптическая система охранной сигнализации для предупреждения аварийного разрушения железобетонных конструкций и любых протяженных объектов. Патент на изобретение № 36074. Дата выдачи 27.01.2023

163. Aimagambetova R.Z. The Peculiar Measure Identifying of the Temperature Leap in the Distributed Raman Sensors / Ershov, I.A., Stukach, O.V. // 15<sup>th</sup> International IEEE Scientific and Technical Conference Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics 2021 – Proceedings, 2021

164. Аймагамбетова Р.Ж. Прослеживаемость измерений и измерительные технологии / Труды международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения №9), Караганда: КарГТУ, 2017.-Ч.4 – С. 263-265

165. Аймагамбетова Р.Ж. Объектно – ориентированное программирование / Тезисы докладов Республиканской научной конференции Вклад молодежной науки в реализацию Стратегии «Казахстан-2050» Караганда: КарГТУ, 2017.-Ч.1- С.165-168

166. Аймагамбетова Р.Ж. Ершов И.А. Совершенствование информационного обеспечения метрологической прослеживаемости. Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и современные информационные технологии» Томск: НИ ТПУ, 2018.- С. 227-228

167. Aimagambetova R. Zh. Hardware-software Complex for Monitoring Incidental Losses Occurring in Optical Communication Cables under Mechanical Effect / Aliya D. Alkina; Alexey V. Yurchenko; Perizat Sh. Madi; Ali D. Mekhtiyev; Yelena G. Neshina // 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)

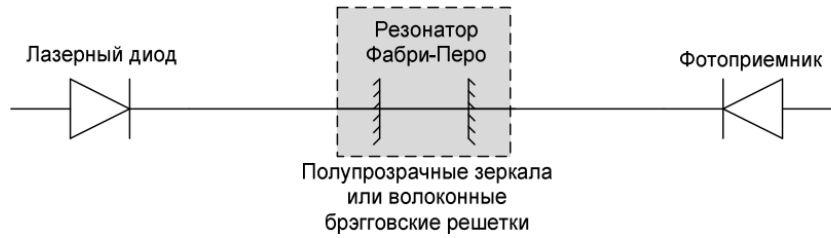
168. Аймагамбетова Р.Ж., Узак Н.Н., Таупык Н.Н.//Оптоволоконная технология распределенных измерений / Труды международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения №7), Караганда: КарГТУ, 2015.-Ч.4 – С. 93-95

169. Р. Ж. Аймагамбетова. Разработка лабораторного образца системы контроля технического состояния оптических кабелей. А.Д. Алькина, А. В. Юрченко, А. Д. Мехтиев, П. Ш. Мади. ВЕСТНИК ТОГУ. 2023. № 1 (68), с 71-80

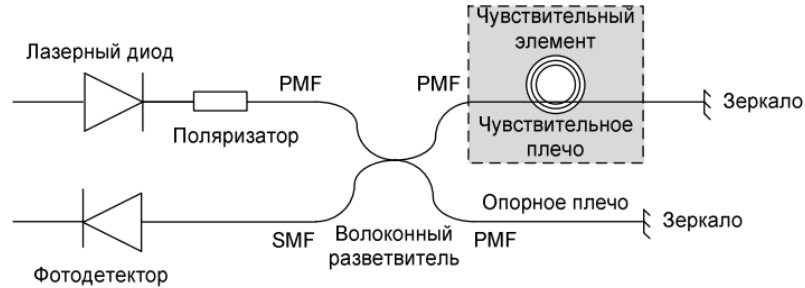




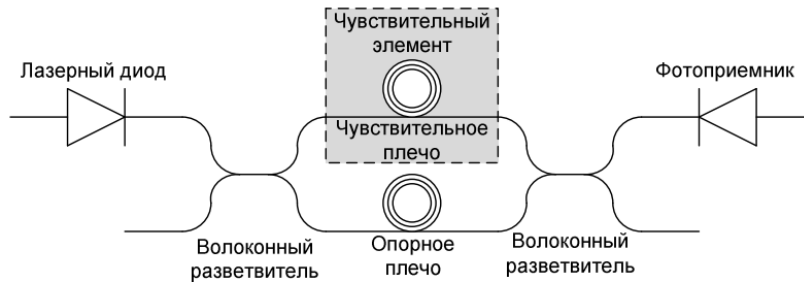
## Приложение А



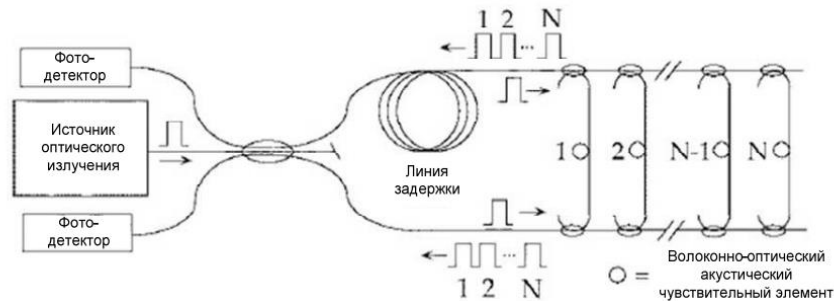
### Волоконно-оптические датчики на основе интерферометра Фабри-Перо



### Волоконно-оптические датчики на основе интерферометра Майкельсона



### Волоконно-оптические датчики на основе интерферометра Маха-Цендера



### Волоконно-оптические датчики на основе интерферометра Саньяка

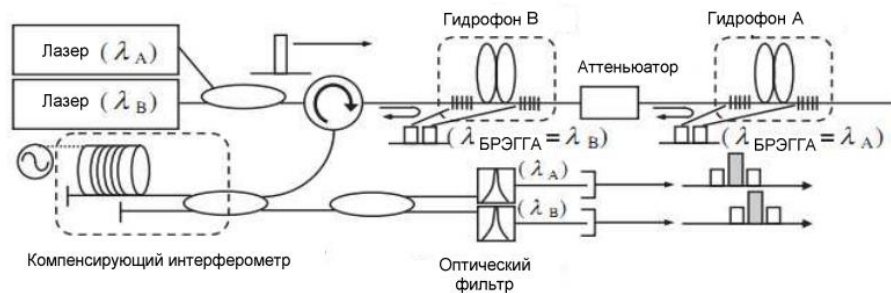


Рисунок 1А – Схемы основных типов волоконно-оптических датчиков

Таблица 1А – Сравнительные характеристики различных ВОД для измерения механических напряжений

Тип ВОД	Преимущества	Недостатки
Michelson interferometer	+ Возможность измерения преднапряженных конструкций	- Зависимость измерений от силы фиксации; -Необходимость температурной компенсации -Ограниченность измерительной зоны размерами сенсора - Высокие затраты на стоимость датчика
Fabry-Perot interferometer	+ Возможность измерения преднапряженных конструкций	- Зависимость измерений от силы фиксации; -Необходимость температурной компенсации -Ограниченность измерительной зоны размерами сенсора - Менее низкая устойчивость в сравнении с МІ - Высокие затраты на стоимость датчика
FBG	+ Различные способы установки на тросе. + Возможность измерения преднапряженных конструкций + Возможность работы при различных видах нагрузок: статические, динамические и усталостные + Относительно простые методы температурной компенсации + Возможность объединения в квазираспределенные системы	- Влияние многих факторов на ошибки измерения: температурная зависимость, способов фиксации, вида крепежного материала и др. -Ограниченность измерительной зоны размерами сенсора - Высокие затраты на стоимость датчика
Распределенные	+ Возможность измерения по всей длине	-Необходимость температурной компенсации

	кабеля + Возможность измерения преднапряженных конструкций + Высокая точность измерений деформаций + Возможность получения информации по распространению деформации	на всем измерительном участке - Высокие затраты на монтаж
--	---	---

Таблица 2А- Виды датчиков и их основа

<b>Точечные</b>	Интерферометрические датчики (interferometric sensors): <ul style="list-style-type: none"> <li>• интерферометр Фабри–Перо (Fabry–Perot);</li> <li>• интерферометр Маха–Цендера (Mach–Zender);</li> <li>• интерферометр Майкельсона (Michelson);</li> <li>• интерферометр Саньяка (Signac).</li> </ul> Датчики на основе решеток (Grating-based sensors – FBG): <ul style="list-style-type: none"> <li>• волоконная брэгговская решетка (Fiber Bragg grating – FBG);</li> <li>• длиннопериодная волоконная решетка (Long period grating – LPG);</li> <li>• чирпированная брэгговская решетка (Chirped Fiber Bragg grating);</li> <li>• наклонная брэгговская решетка (Tilted Fiber Bragg grating);</li> </ul>
<b>Квази-распределенные волоконно-оптические датчики</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• на основе интерферометров Маха-Цендера, Сагнака, Майкельсона и Фабри-Перо</li> <li>• на основе рассеяния основаны на принципе оптовременной рефлектометрии (OTDR)</li> <li>• датчики FBG с модуляцией длины волны измеряют изменение длины волны в волокне.</li> </ul>
<b>Распределенные оптоволоконные датчики</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• оптовременная рефлектометрия на основе рассеяния Рэлея (optical time-domain reflectometry – OTDR),</li> <li>• оптовременная рефлектометрия на основе рассеяния Рамана (Raman optical time-domain reflectometry – ROTDR)</li> <li>• оптовременная рефлектометрия на основе рассеяния Бриллюэна (Brillouin optical time-domain reflectometry – BOTDR).</li> </ul>

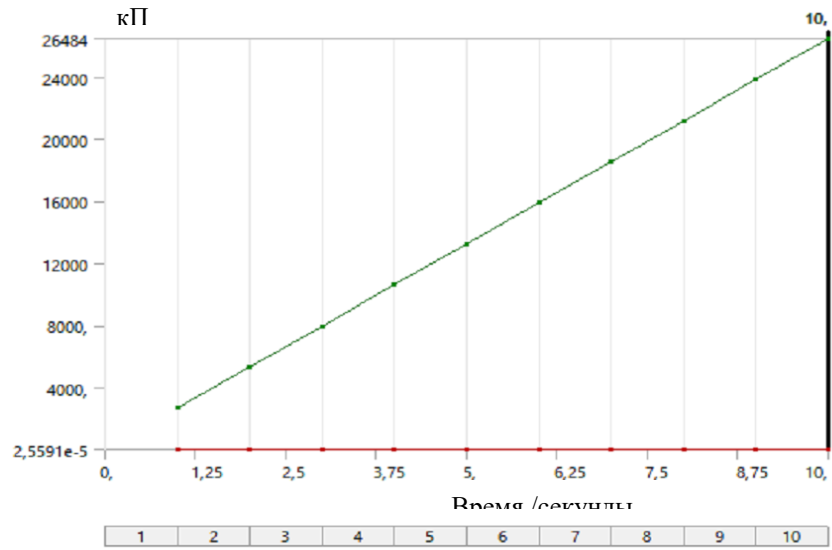


Рисунок 2А – График изменения нагрузки от времени в течении 10 шагов

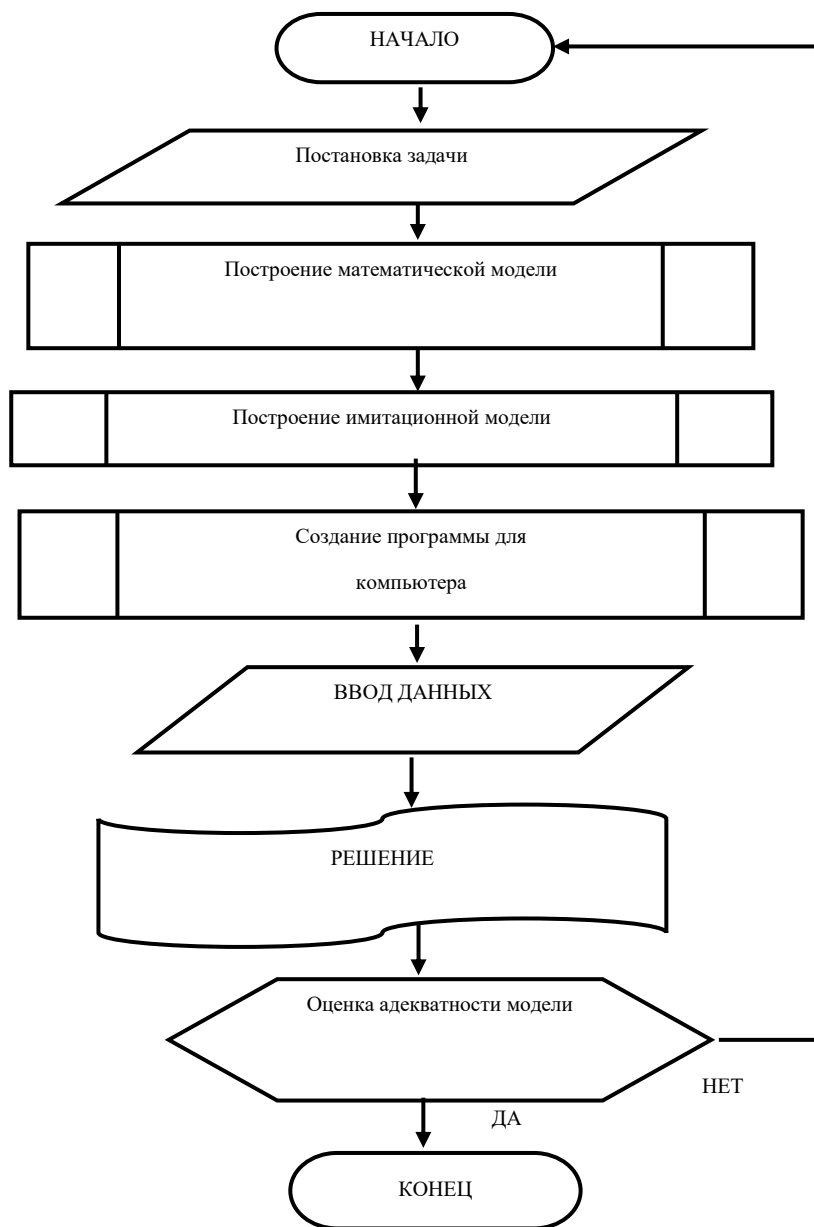


Рисунок 3А – Алгоритм моделирования

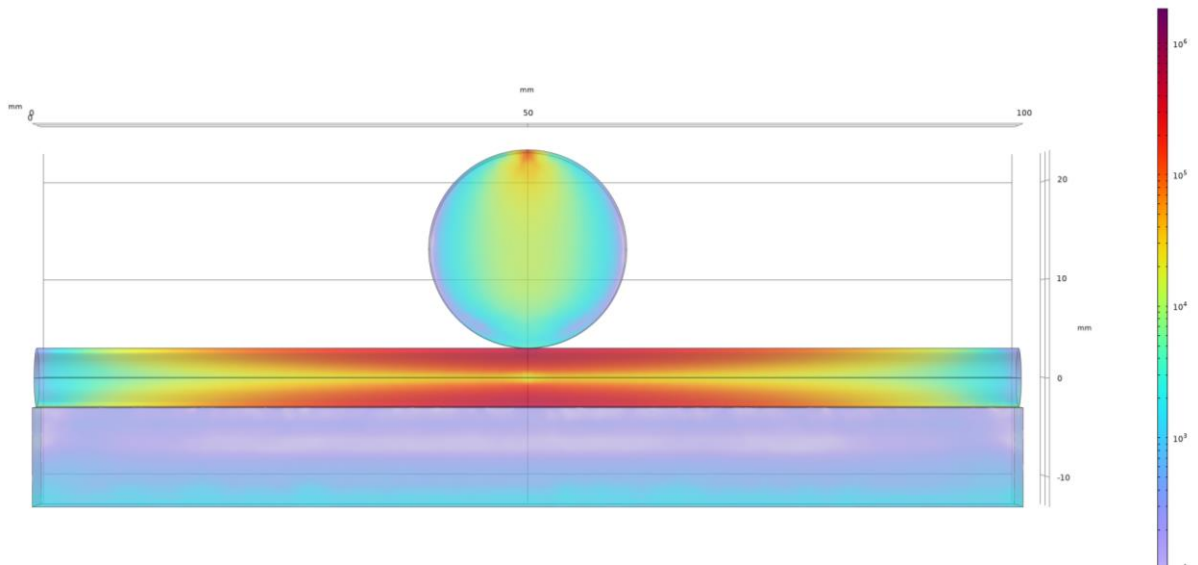


Рисунок 4А – Компьютерная трехмерная модель, выполненная в программе COMCOL

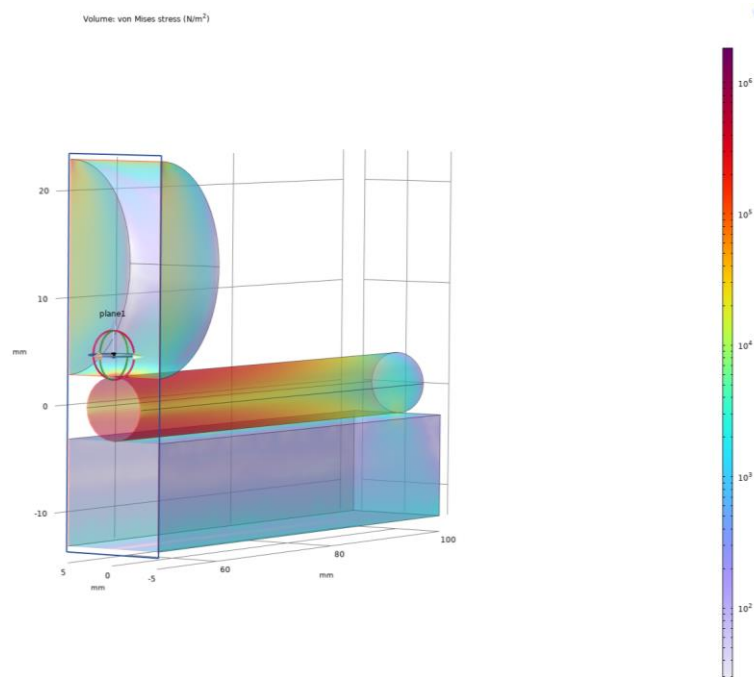
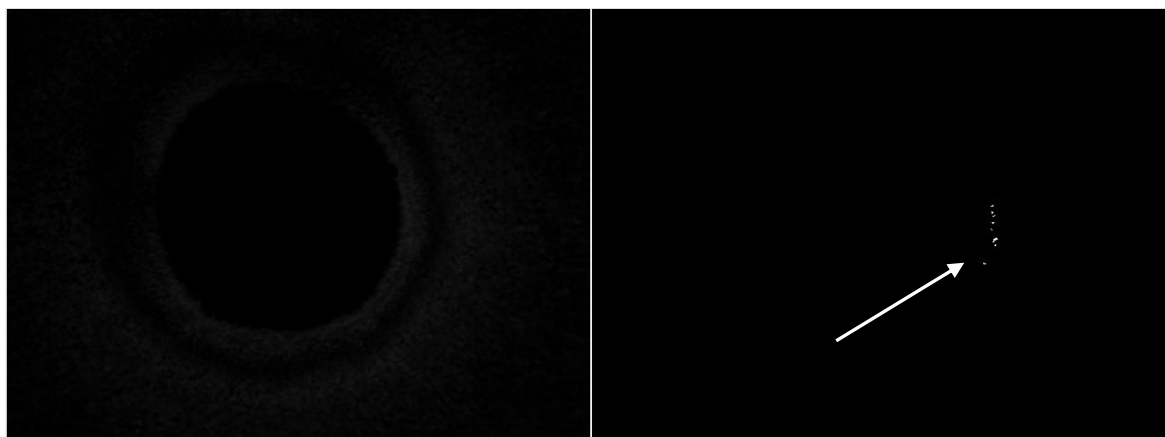


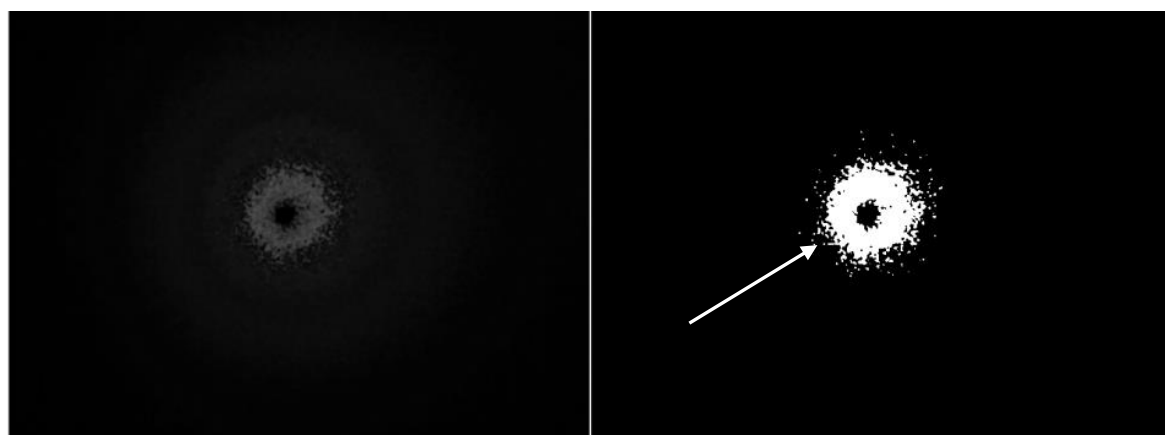
Рисунок 5А – Компьютерная трехмерная модель выполненная в программе COMCOL, показан разрез

## Приложение Б

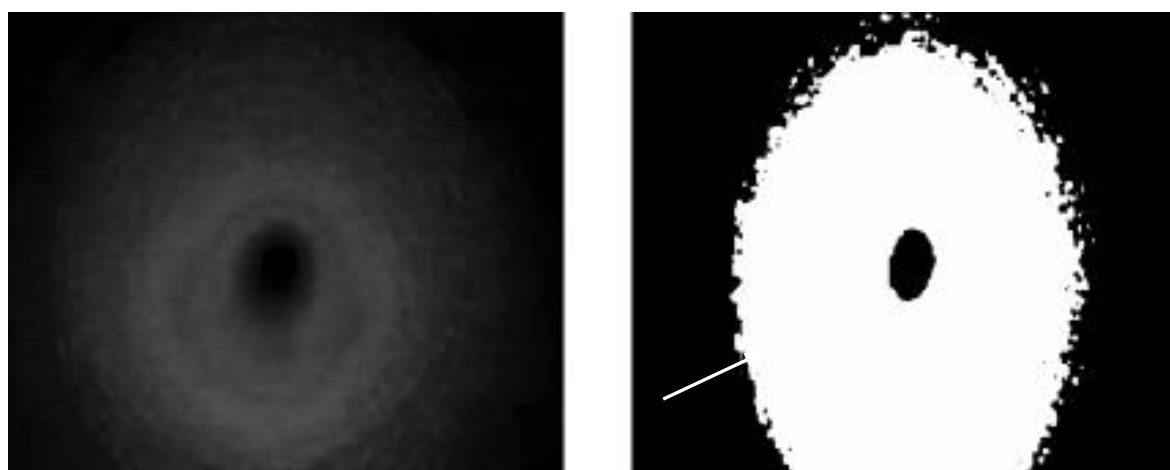
На рисунке 1 Б представлено три снимка с экрана компьютера, на которых представлен процесс перехода пикселей и черного цвета в белый по мере увеличения нагрузки на балку и непосредственно на сам ВОД.



А)



б)



в)

а) нагрузка на балку отсутствует; б) нагрузка на балку имеет малую величину; в) нагрузка на балку имеет практически максимальную величину

Рисунок 1 Б – Три снимка с экрана компьютера при различной нагрузке



На рисунке 2 Б показан процесс роста белых пикселей при увеличении нагрузки на балку и ВОД. Данные эксперимента обработаны и построен график в программе Microsoft Excel, в нем показана зависимость роста белых пикселей при увеличении нагрузки на балку и ВОД. Выполнена аппроксимация при помощи полиномы третьей степени. Также, представлено уравнение аппроксимации и регрессивный анализ. На начальном этапе кривая имеет нелинейность, но уже при нагрузке 7,5 кН и выше линейность присутствует, вероятно сыграла роль настройки АПК, в дальнейшем были учтены моменты настройки чувствительности АПК.

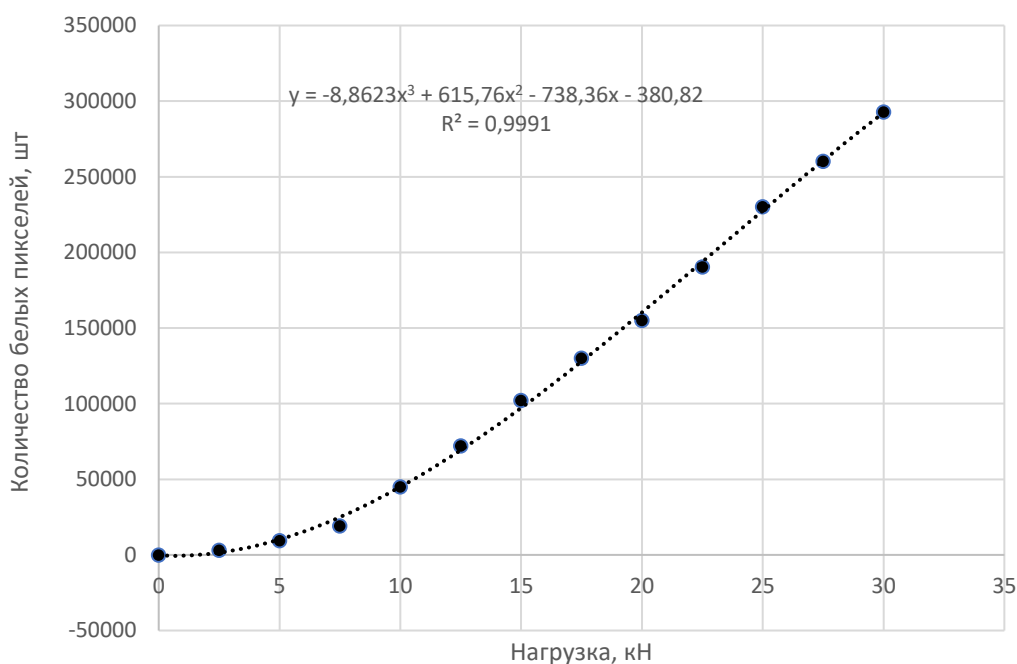


Рисунок 3Б – Процесс роста белых пикселей при увеличении нагрузки на балку и ВОД

Пиксельная картина светового пятна изменялась, как и его форма в сторону увеличения белых пикселей при увеличении нагрузки. Слева показано негативное изображение светового пятна, падающего на поверхность фотоприемника высокого разрешения, а справа показан результат интеллектуального оптико-электронного анализа светового пятна. Чем выше нагрузка, тем больше дополнительные потери в ОВ и больше снижение интенсивности светового пятна, тем больше пикселей переходит в белое состояние. Если снять нагрузку с балки и ВОД, то пиксели снова передут в состояние черного цвета. В начальный момент нагружения (рисунок 1 Б) было зафиксировано несколько отдельных белых пикселей которые возникли в следствии пульсации источника излучения или иных внешних помех. Далее, когда нагрузка увеличивалась белый диск пропорционально увеличивался. По результатам измерений посчитана абсолютная погрешность 2,41, относительная погрешность 6,31% и коэффициент Стьюдента 2.13 с доверительным интервалом 0,94.

Также был выполнен расчет интенсивности световой волны, падающей на поверхность фотоприемника, которая уменьшалась по мере увеличения нагрузки на ВОД. Данные эксперимента обработаны и построен график в программе Microsoft Excel. Выполнена линейная аппроксимация. Также представлено уравнение аппроксимации и регрессивный анализ (рисунок 3Б).

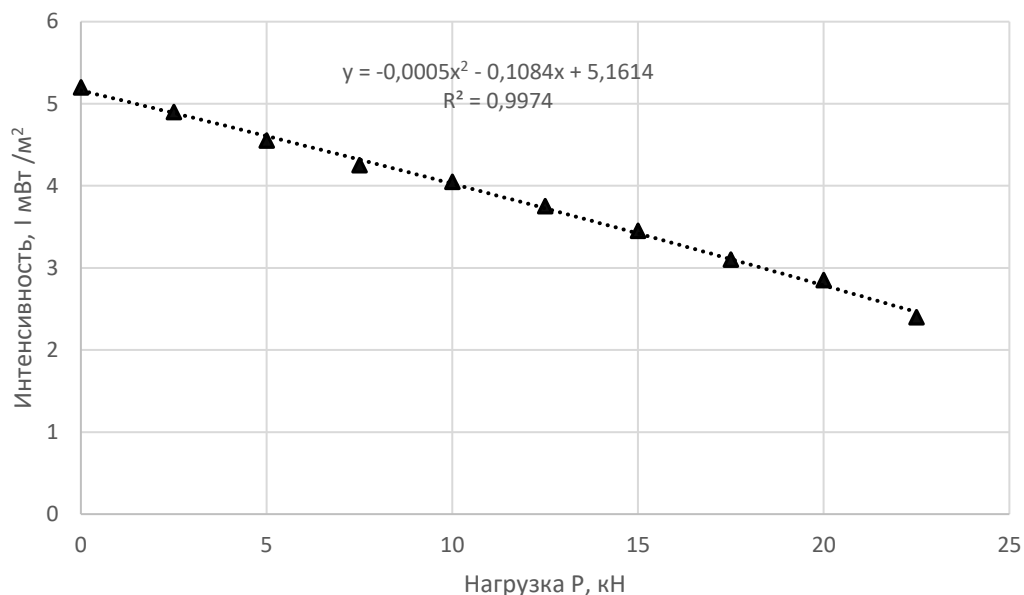


Рисунок 3Б – Снижение интенсивности световой волны, падающей на поверхность фотоприемника по мере увеличения нагрузки на ВОД



Рисунок 4 Б – Эксперимент по схеме № 2 с использованием АПК и оптического рефлектометра, вид с боку

Дополнительные потери обозначаются символом  $A$ , механические напряжения обозначаются символом  $\sigma$ , механические деформации обозначаются символом  $\varepsilon$ , нагрузка обозначается символом  $P$ .

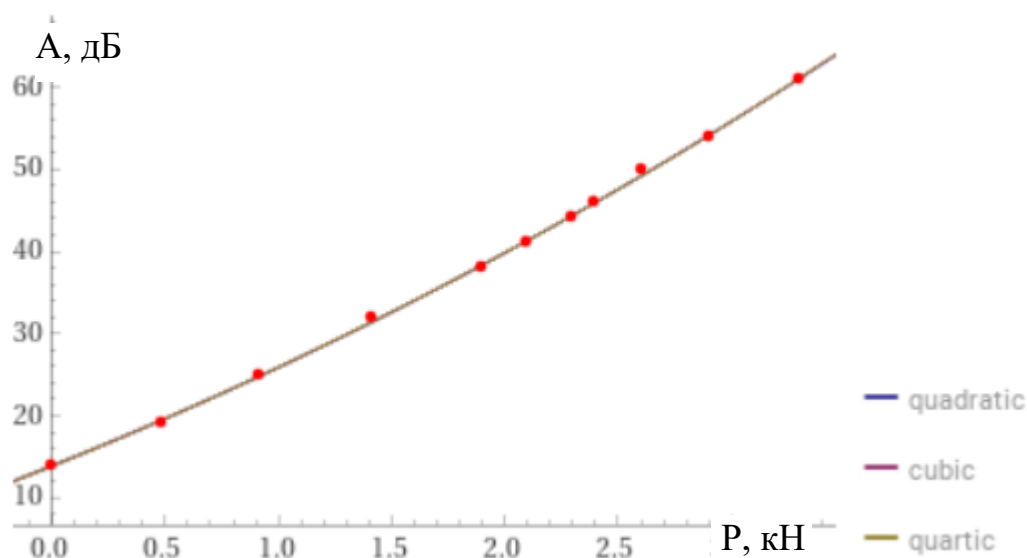


Рисунок 5 Б -Значение потерь в ОВ при длине световой волны 1310 нм при пошаговом увеличении нагрузки

При проведении автоматической аппроксимации были получены следующие результаты:

$$1.00904 x^2 + 10.9425 x + 13.906 \quad (\text{quadratic})$$

$$0.0368772 x^3 + 0.821628 x^2 + 11.1889 x + 13.8574 \quad (\text{cubic})$$

$$0.0275794 x^4 - 0.146162 x^3 + 1.19974 x^2 + 10.9443 x + 13.875 \quad (\text{quartic})$$

Таблица 1 Б – Критерии оценки качества автоматической аппроксимации

	AIC	BIC	$R^2$	adjusted $R^2$
quadratic	17.6172	19.2088	0.999322	0.999153
cubic	20.0014	21.9909	0.999328	0.999039
quartic	22.6673	25.0546	0.999329	0.998882

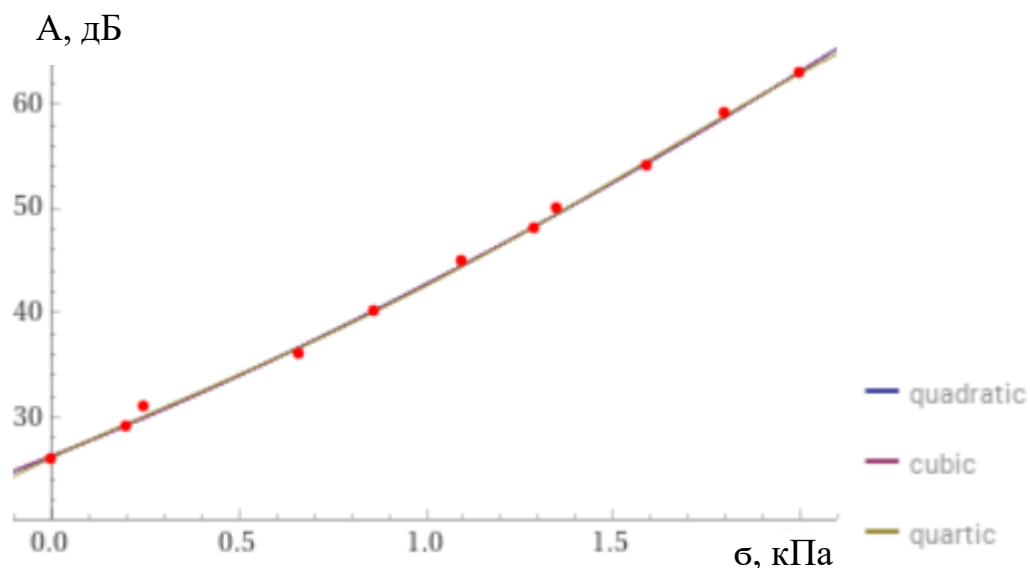


Рисунок 6 Б -Зависимость роста потерь в ОВ при длине световой волны 1310 нм при росте механических напряжений

Таблица 2 Б – Критерии оценки качества автоматической аппроксимации

	AIC	BIC	$R^2$	adjusted $R^2$
quadratic	22.6971	24.2887	0.998476	0.998095
cubic	25.0923	27.0818	0.998487	0.997838
quartic	26.9406	29.328	0.998599	0.997665

При проведении автоматической аппроксимации были получены следующие результаты:

$$1.94569 x^2 + 14.5536 x + 26.2568 \quad (\text{quadratic})$$

$$-0.211128 x^3 + 2.59161 x^2 + 14.049 x + 26.3165 \quad (\text{cubic})$$

$$-1.28926 x^4 + 4.97081 x^3 - 3.95497 x^2 + 16.7449 x + 26.139$$

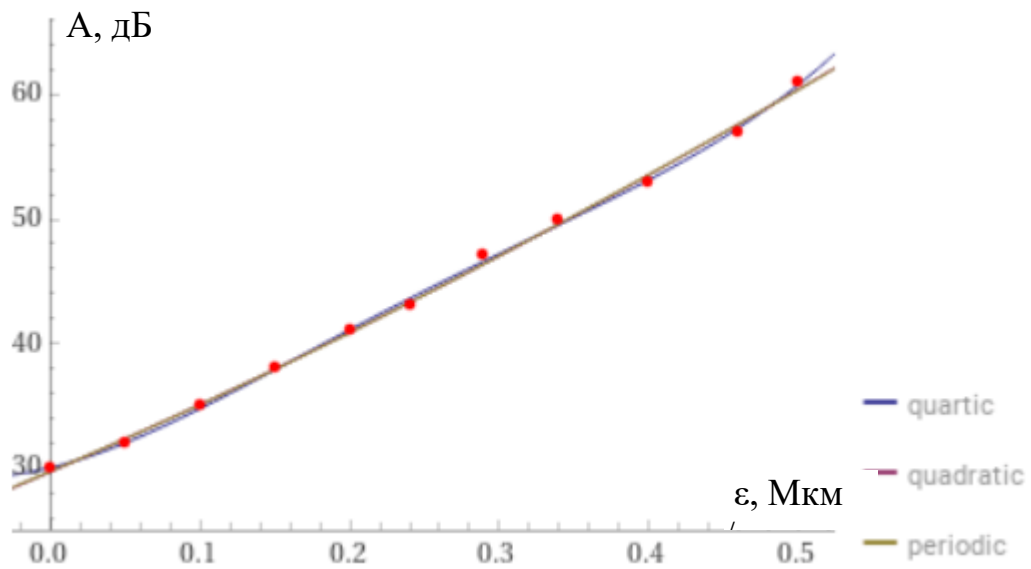


Рисунок 7 Б -Зависимость роста потерь в ОВ при длине световой волны 1310 нм при росте деформации

Таблица 3Б – Критерии оценки качества автоматической аппроксимации

	AIC	BIC	$R^2$	adjusted $R^2$
quartic	18.1739	20.5613	0.999076	0.99846
quadratic	20.3019	21.8935	0.998207	0.997759
periodic	20.4149	22.0065	0.998189	0.997736

При проведении автоматической аппроксимации были получены следующие результаты:

$$766.728 x^4 - 759.432 x^3 + 252.982 x^2 + 29.0374 x + 30.0395 \quad (\text{quartic})$$

$$18.4547 x^2 + 52.21 x + 29.7148 \quad (\text{quadratic})$$

$$50.8132 \sin(x) - 51.2137 \cos(x) + 80.9727 \quad (\text{periodic})$$

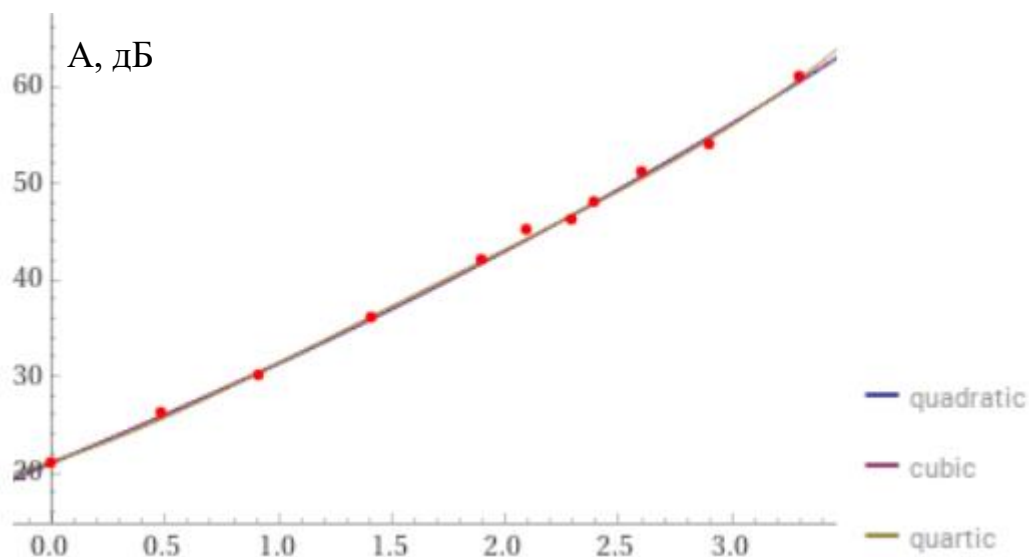


Рисунок 8 Б -Значение потерь в ОВ при длине P, км световой волны 650 нм при пошаговом увеличении нагрузки

При проведении автоматической аппроксимации были получены следующие результаты:

$$0.770283 x^2 + 9.39377 x + 21.0868 \quad (\text{quadratic})$$

$$0.111263 x^3 + 0.204845 x^2 + 10.1373 x + 20.94 \quad (\text{cubic})$$

$$0.300455 x^4 - 1.8828 x^3 + 4.32402 x^2 + 7.47241 x + 21.1324 \quad (\text{quartic})$$

Таблица 4 Б – Критерии оценки качества автоматической аппроксимации

	AIC	BIC	$R^2$	adjusted $R^2$
quadratic	23.2848	24.8764	0.99838	0.997974
cubic	25.2852	27.2747	0.998447	0.997782
quartic	25.5441	27.9315	0.998756	0.997926

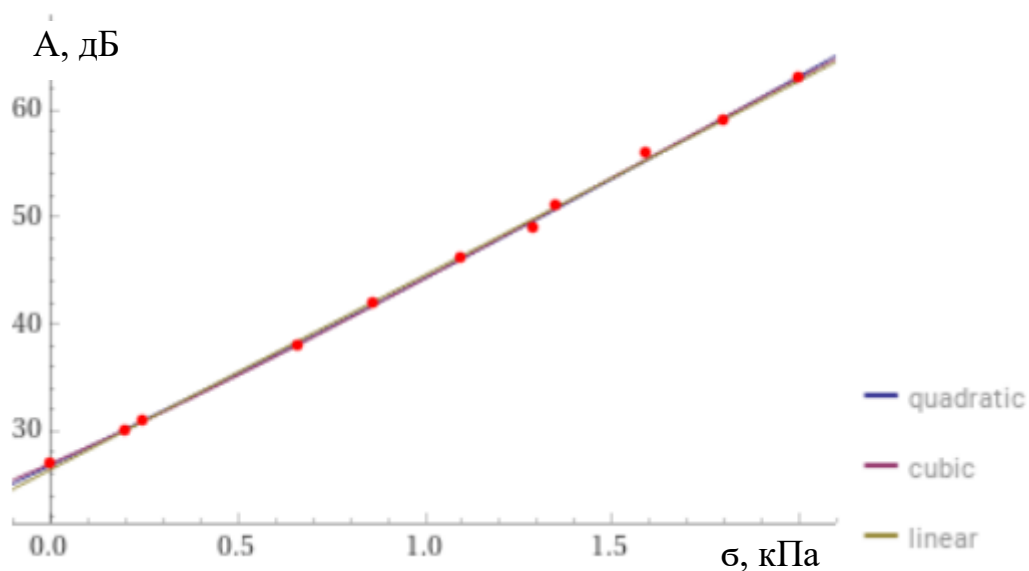


Рисунок 9 Б -Зависимость роста потерь в ОВ при длине световой волны 650 нм при росте механических напряжений

Таблица 5 Б – Критерии оценки качества автоматической аппроксимации

	AIC	BIC	$R^2$	adjusted $R^2$
quadratic	16.1464	17.738	0.999138	0.998922
cubic	17.4414	19.4309	0.999225	0.998893
linear	18.4245	19.6182	0.998693	0.998548

При проведении автоматической аппроксимации были получены следующие результаты:

$$0.688065 x^2 + 16.7978 x + 26.7921 \quad (\text{quadratic})$$

$$-0.610539 x^3 + 2.55595 x^2 + 15.3384 x + 26.9646 \quad (\text{cubic})$$

$$18.1388 x + 26.4236 \quad (\text{linear})$$

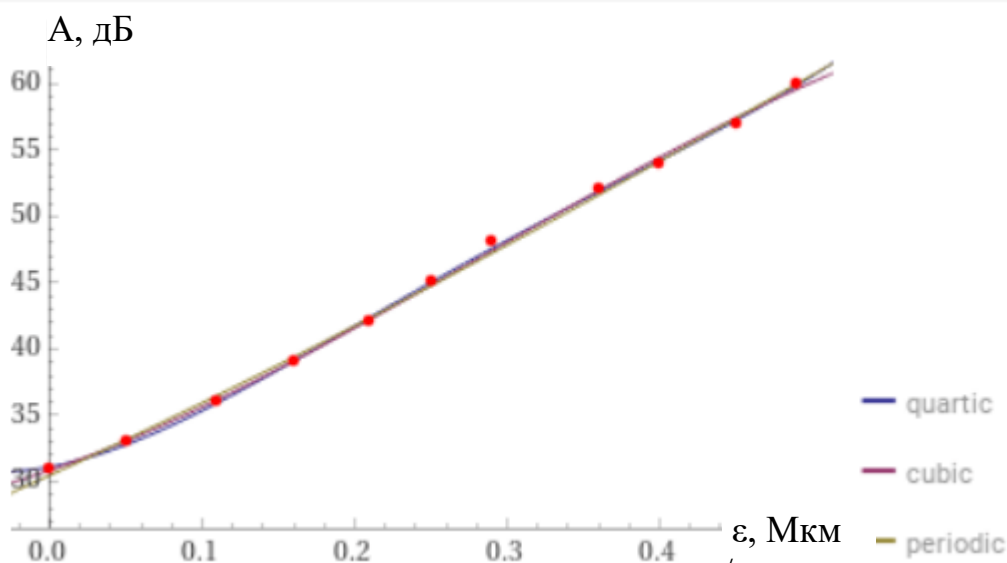


Рисунок 10 Б -Зависимость роста потерь в ОВ при длине световой волны 1310 нм при росте деформации

Таблица 6Б – Критерии оценки качества автоматической аппроксимации

	AIC	BIC	$R^2$	adjusted $R^2$
quartic	11.6716	14.059	0.999448	0.99908
cubic	16.3022	18.2916	0.998926	0.998466
periodic	19.8988	21.4904	0.998136	0.99767

При проведении автоматической аппроксимации были получены следующие результаты:

$$609.119 x^4 - 707.399 x^3 + 277.05 x^2 + 21.06 x + 31.1186 \quad (\text{quartic})$$

$$-106.802 x^3 + 91.2438 x^2 + 39.547 x + 30.8681 \quad (\text{cubic})$$

$$52.6952 \sin(x) - 40.0146 \cos(x) + 70.4946 \quad (\text{periodic})$$

Обработка данных была выполнена при помощи WolframAlpha, которая находится в открытом доступе (<https://www.wolframalpha.com/input/?i=Free>)



На рисунках 11-14 Б представлены рефлектограммы полученные при проведении эксперимента по Схеме №2, в которой использовался распределённый ВОД и оптический рефлектометр. На рисунке 11 Б показан начальный момент старта нагрузки, когда на ВОД не оказывалось механическое воздействие. По мере увеличения нагрузки на испытываемую балку, внутри которой находилось ВОД, стали возрастать дополнительные потери, которые были зафиксированы при помощи рефлектометра. Возникший микроизгиб ОВ вызвал изменения свойств световой волны. Это выразилось в том числе в увеличении дополнительных потерь, которые были зафиксированы одновременно АПК и рефлектометром. Также сформировался центр неоднородности, который увеличил рассеяние оптического излучения. Информацию как читать рефлектограммы и определять место микроизгиба на оптическом проводнике можно найти на сайте <http://www.stroitek.ru/info/articles/vols-stat1/imprefl/imprefl2> /. Было определено месторасположение микроизгиба на дистанции 10 метров при общей длине ОВ около 15 метров. Место формирования микроизгиба отмечено стрелкой на рисунках 12 и 13 Б. На рисунках 13 и 14 Б показано как изменяется рефлектограмма и потери оптической мощности в ОВ увеличиваются. Эксперименты подтверди, что при помощи оптического рефлектометра можно точно определить мест повреждения железобетонной конструкции, если внутри нее находится ОВ.



Рисунок 11 Б – Снимок с экрана рефлектометра

Оптический рефлектометр уже более 20 лет активно используется в системах телекоммуникации для поиска точного места повреждения волоконно-оптического кабеля или других присоединений. Это уже проверенная технология, не нуждающаяся в подтверждении и актуализации. Идея и гипотеза, что оптический рефлектометр можно использовать совместно с АПК для более точного указания места повреждения железобетонной конструкции полностью подтверждена на практике.



Рисунок 12 Б – Снимок с экрана рефлектометра

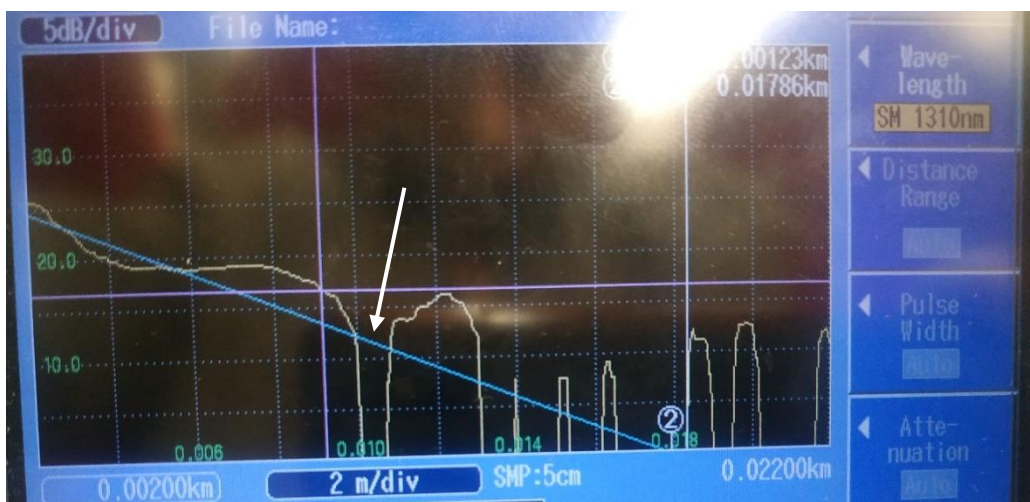


Рисунок 13 Б – Снимок с экрана рефлектометра



Рисунок 14 Б – Снимок с экрана рефлектометра

## Приложение В



Рисунок 1 В – Форма для заливки железобетонных балок



Рисунок 2 В – Фото разрушенной балки



Рисунок 3 В – Фото разрушенной балки



Рисунок 4 В – Фото разрушенной балки

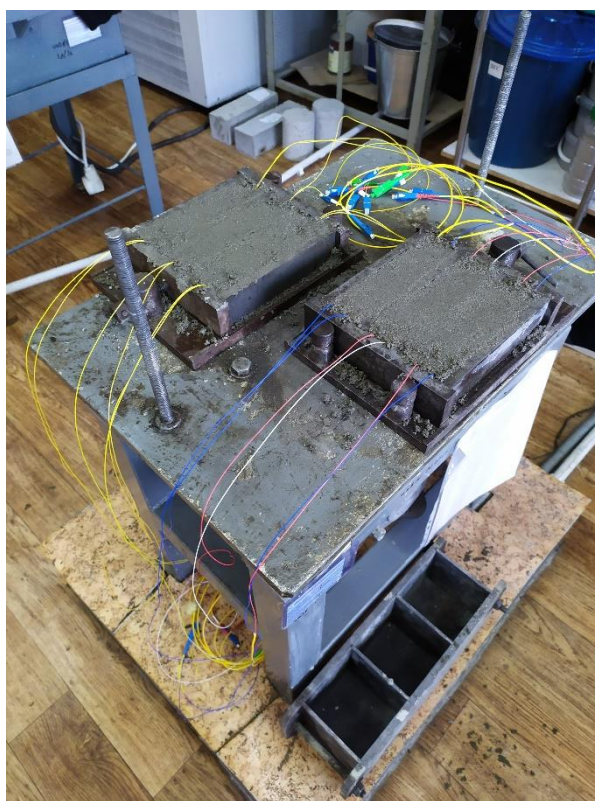


Рисунок 5 В– Процесс изготовления железобетонных балок



Рисунок 6 В – Армирование балки с закреплением на стержнях ВОД

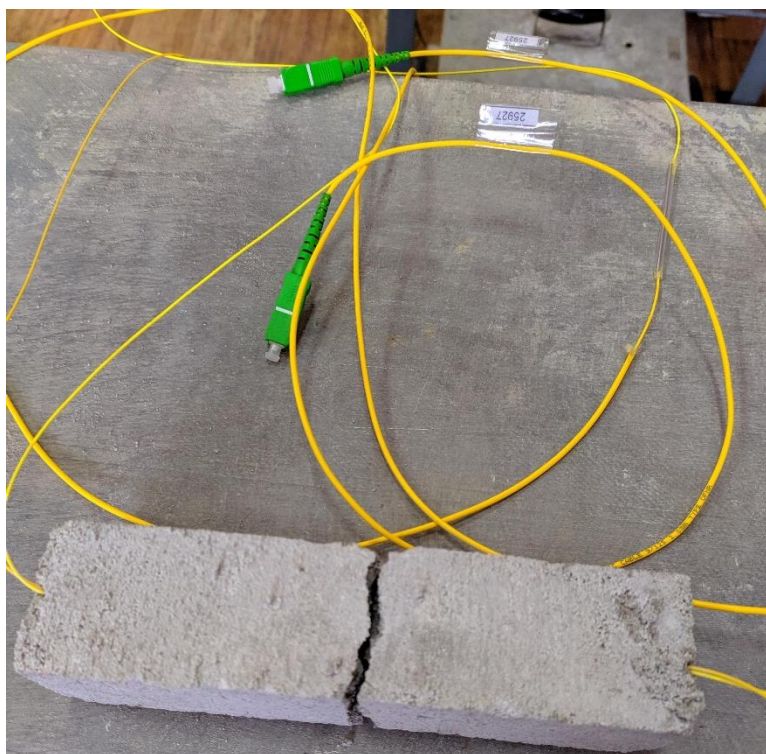


Рисунок 7 В – Фото разрушенной балки

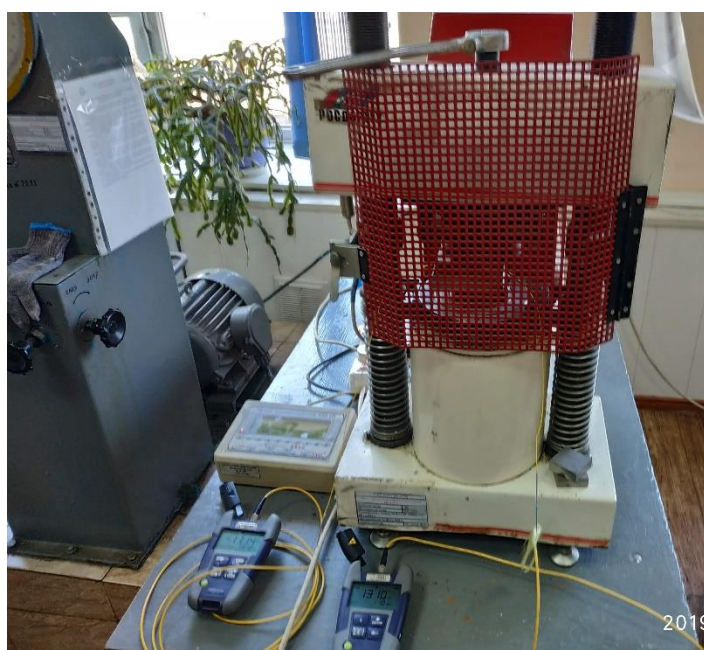


Рисунок 8 В – Используемые приборы для измерения дополнительных потерь и калибровки при помощи оптического ваттметра и источника излучения

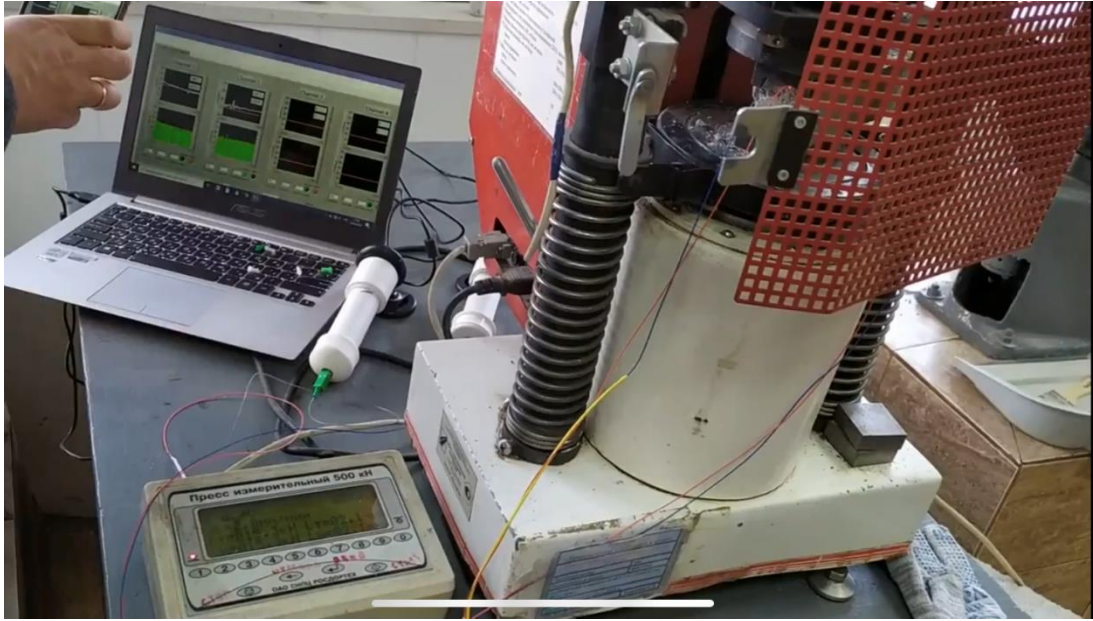


Рисунок 9 В – Процесс испытания балок, в которых размещены ВОД



Рисунок 10 В – Приборы для измерения дополнительных потерь и калибровки АПК при испытаниях балок на машине МИИ – 100



## Приложение Г

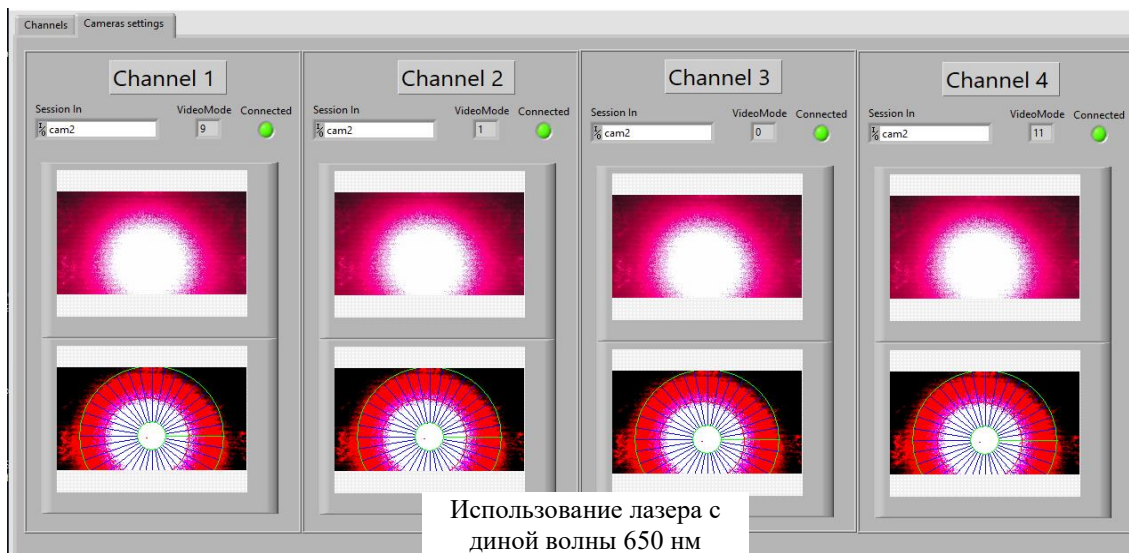


Рисунок 1 Г – Контроль геометрические параметров светового пятна и его формы с использованием секторного анализа.

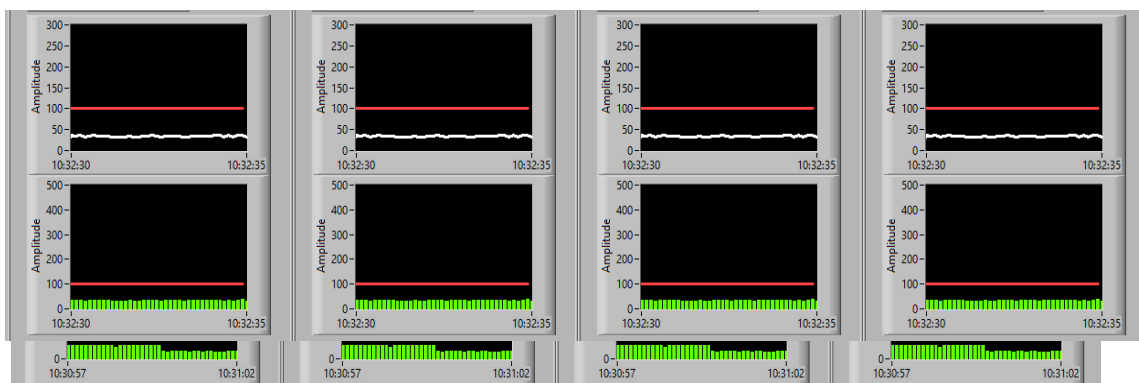
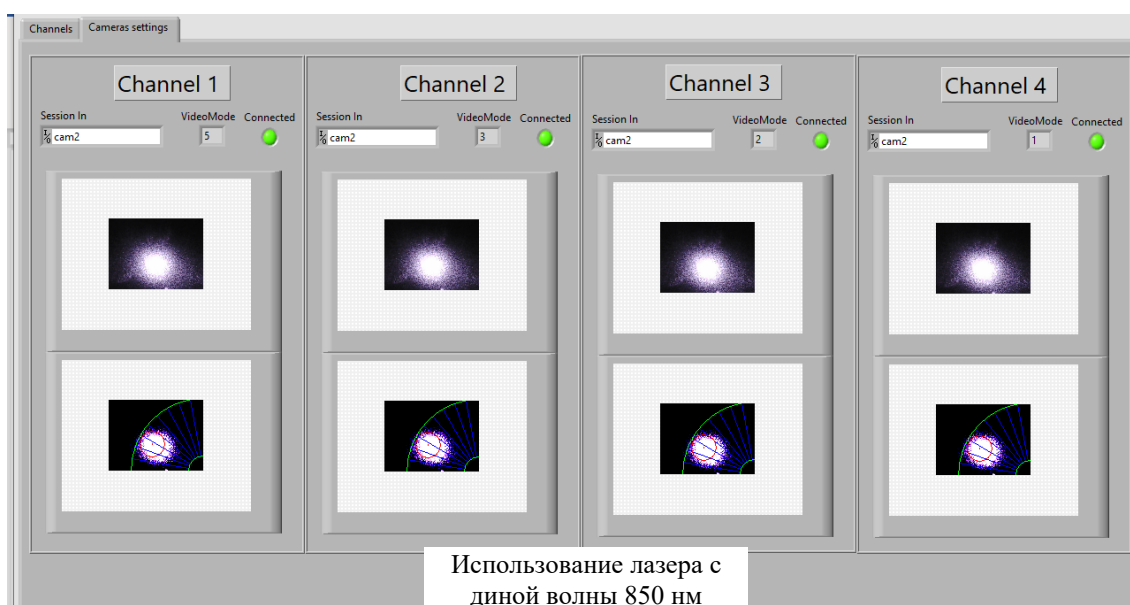
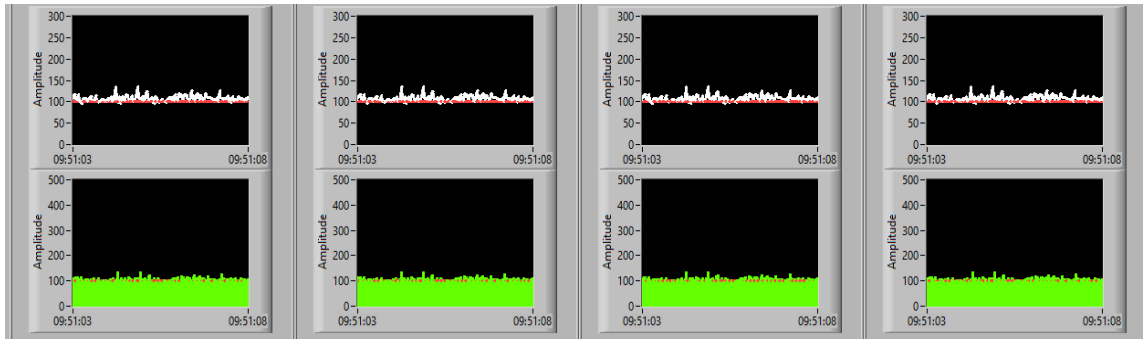


Рисунок 2 Г – АПК среагировал на увеличение нагрузки на ВОД Рисунок 3 Г – Стабильность показаний АПК при неизменной нагрузке





Рисунке 4 Г – Случай возникновения помех в работе АПК

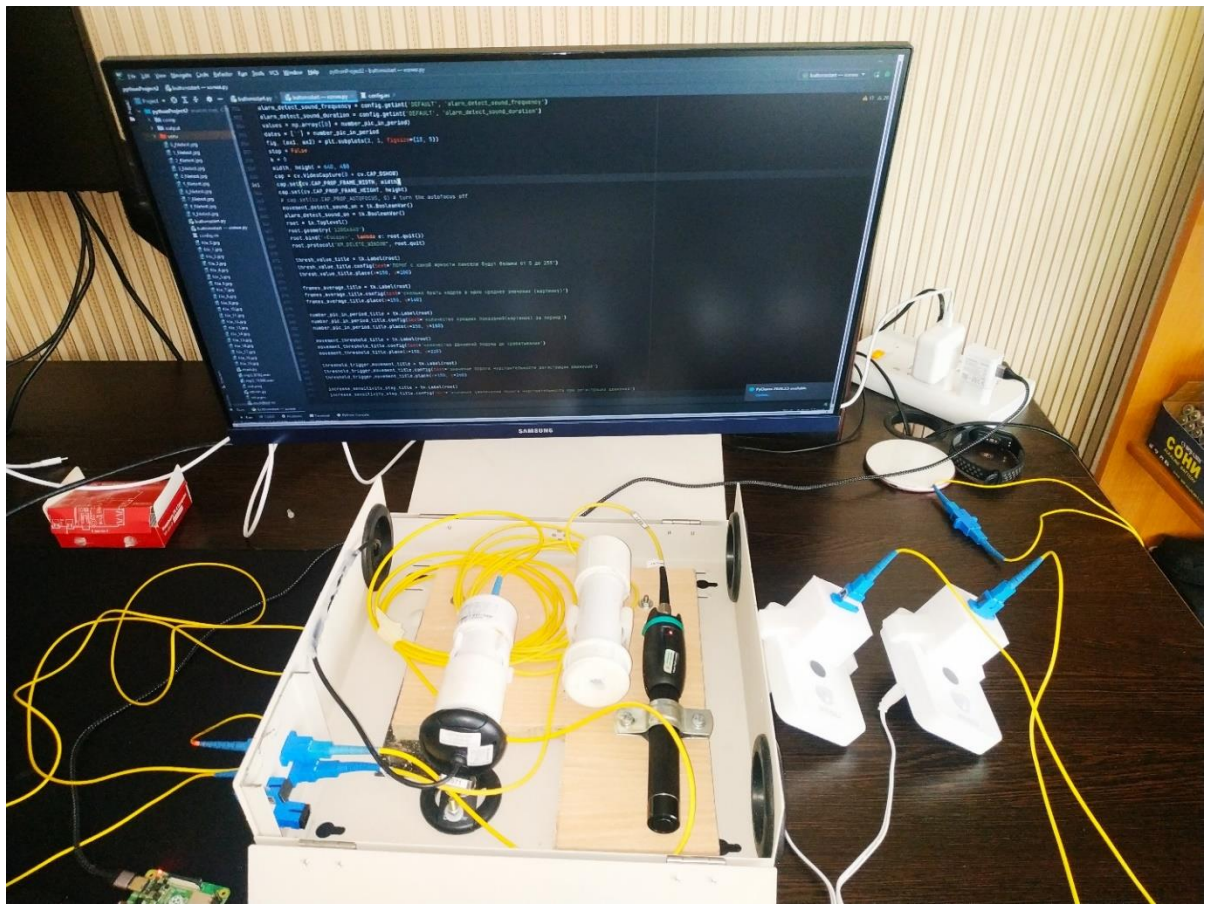


Рисунок 5 Г – Оптические модули (оптический волновод) различной конструкции

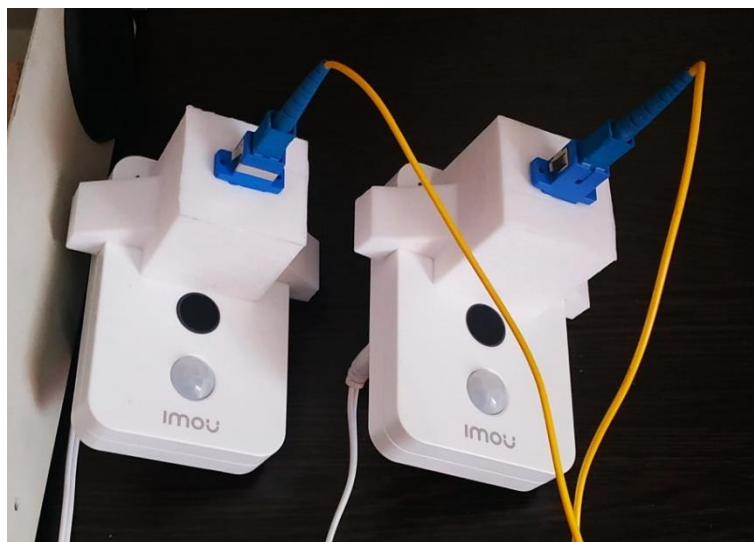


Рисунок 6 Г – Квадратный оптический модуль (оптический волновод)

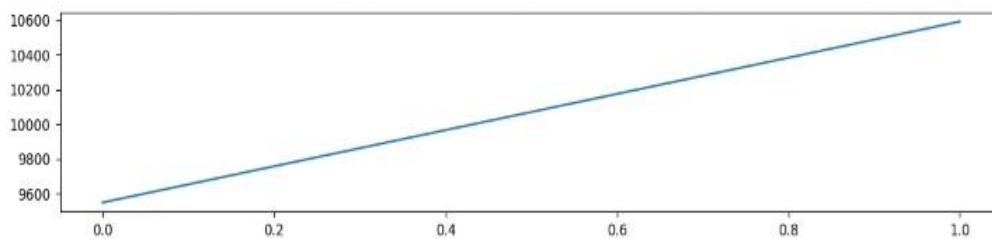
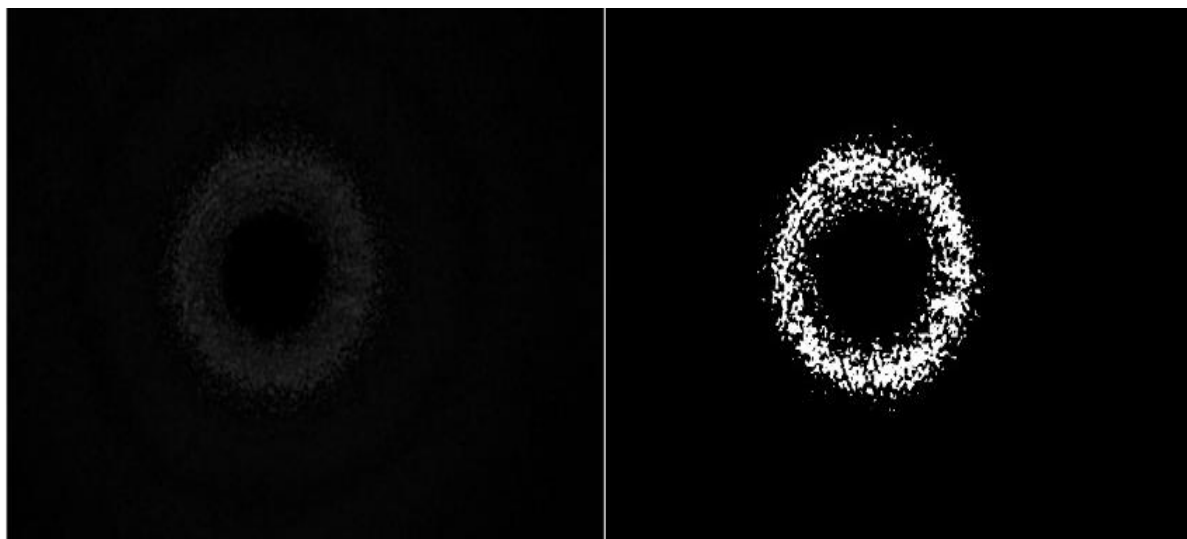


Рисунок 7 Г – Численная картина белых пикселей

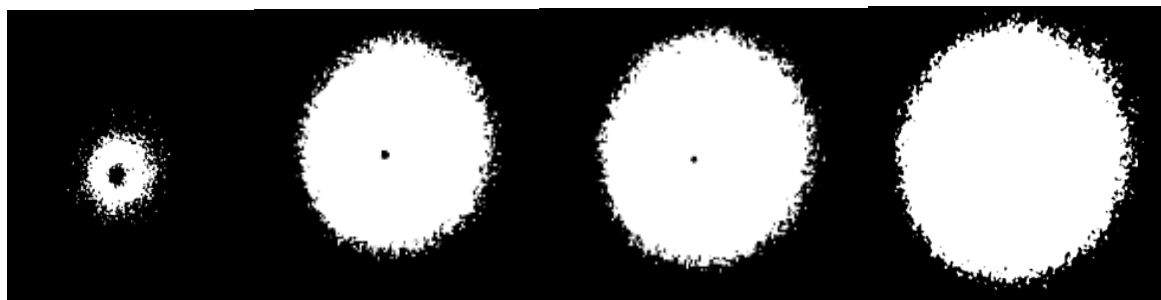
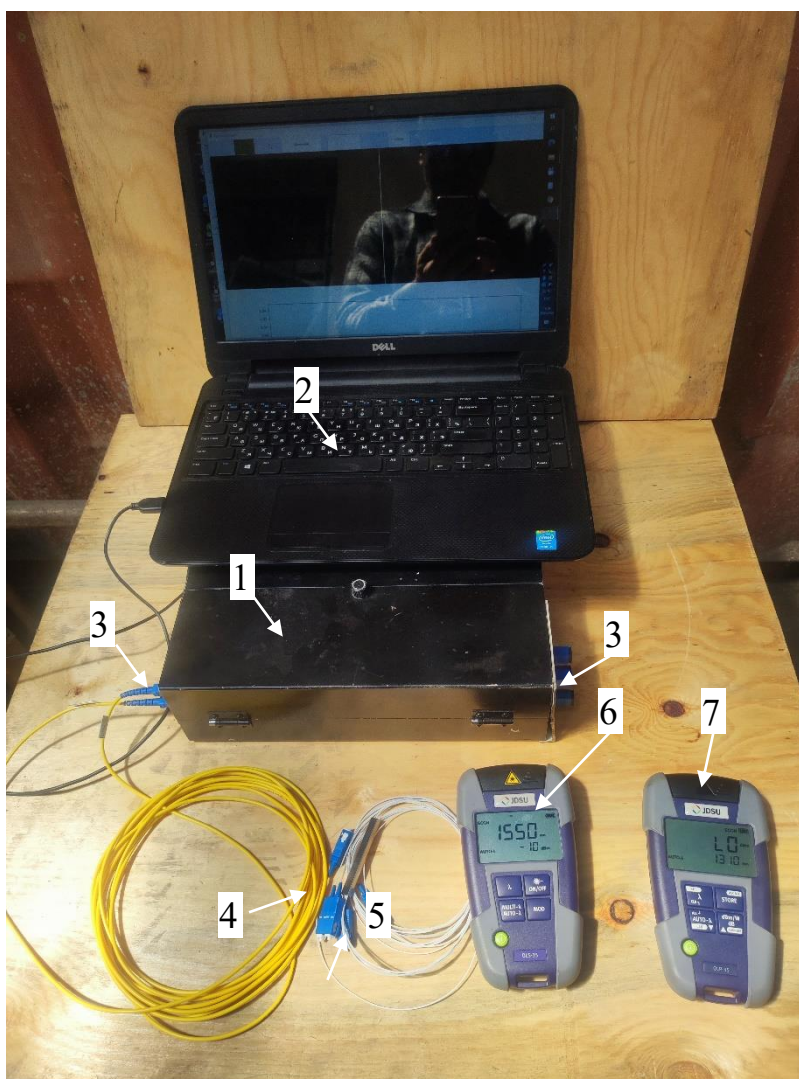
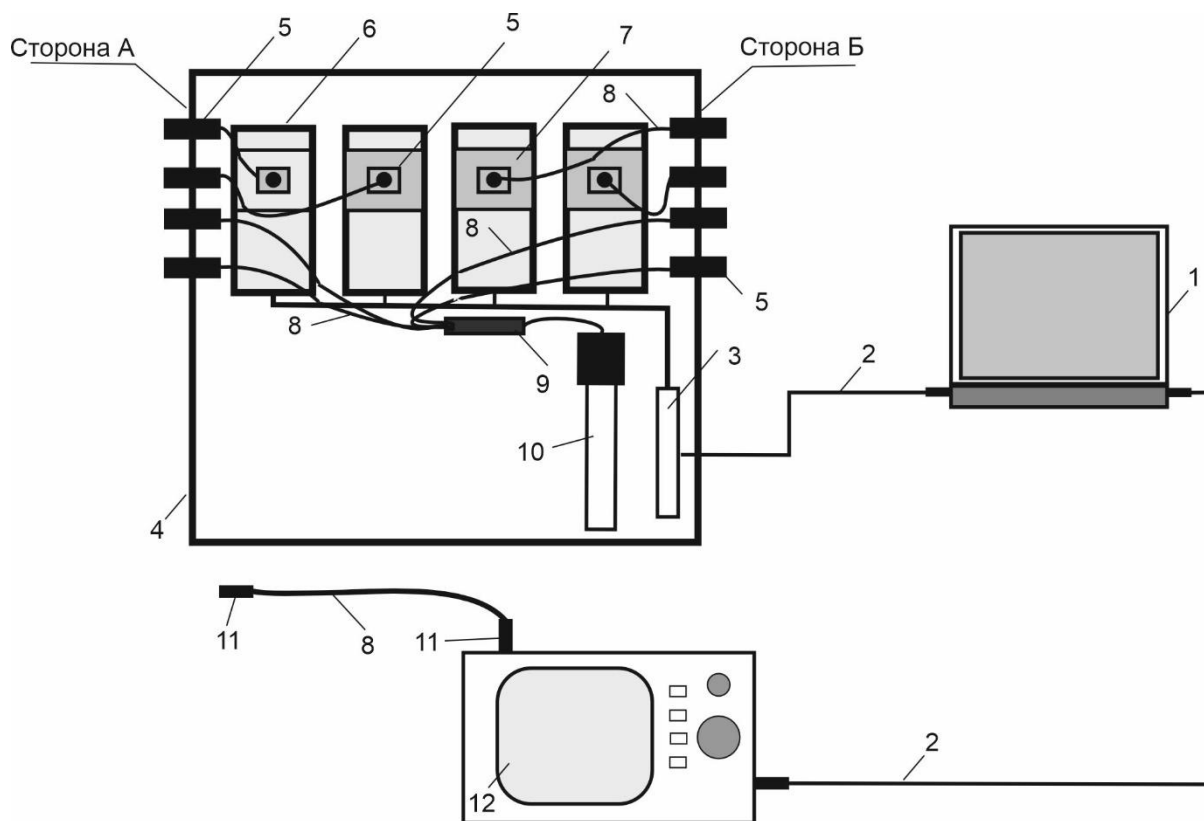


Рисунок 8 Г – Изменение картины пикселей и их переход от черного цвета в белый



1 – блок обработки данных и подключения ВОД; 2 – персональный компьютер с АПК; 3 – оптический кросс для подключения оптических коннекторов; 4 – оптический патч-корд с коннекторами типа SC; 5 – оптический разветвитель  $\frac{1}{4}$  с коннекторами типа SC; 6 – источник излучения; 7 – измеритель оптической мощности.

Рисунок 9 Г – Используемые части АСК и оптические приборы при проведении полевых испытаний



1 – персональный компьютер с АПК блок обработки данных; 2 – кабель USB; 3 – сплиттер USB; 4 – корпус блока обработки данных; 5 – оптический адаптер типа SC; 6 – фотоприемник и микропроцессор в едином корпусе, 7 – квадратный корпус оптического модуля (оптический волновод); 8 – оптический патч-корд с коннекторами типа SC; 9 – оптический разветвитель  $\frac{1}{4}$  с коннекторами типа SC; 10 – источник излучения; 11 – оптические коннекторы типа SC; 12 – оптический рефлектометр.

Рисунок 10 Г – Схема компоновки АСК, когда оптические модули АПК с источником излучения и оптический рефлектометр не находятся в едином корпусе блока обработки данных

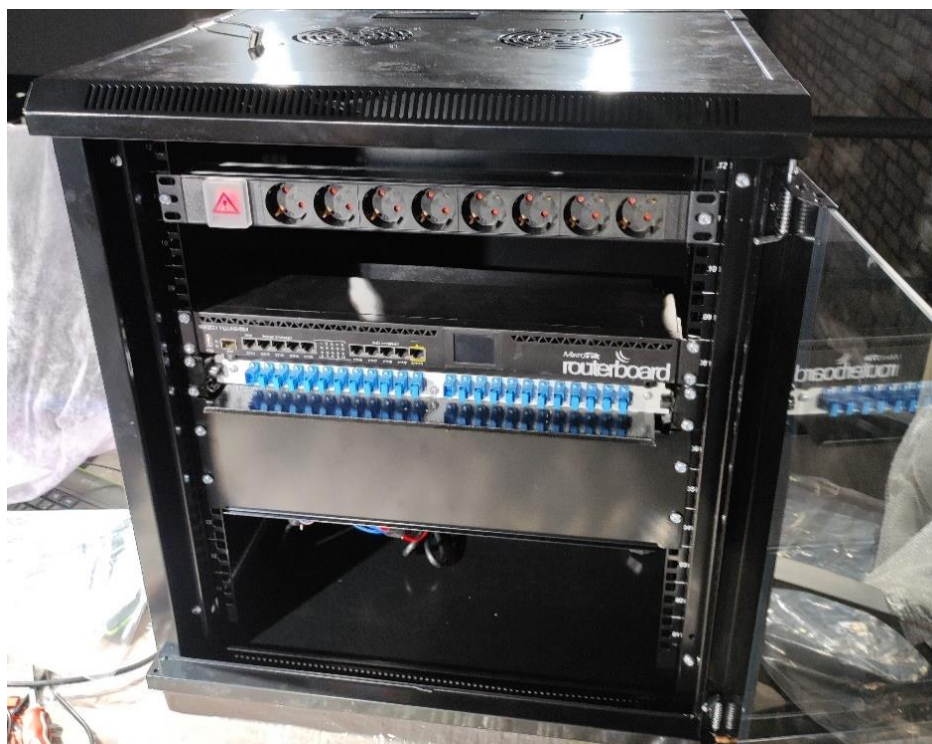
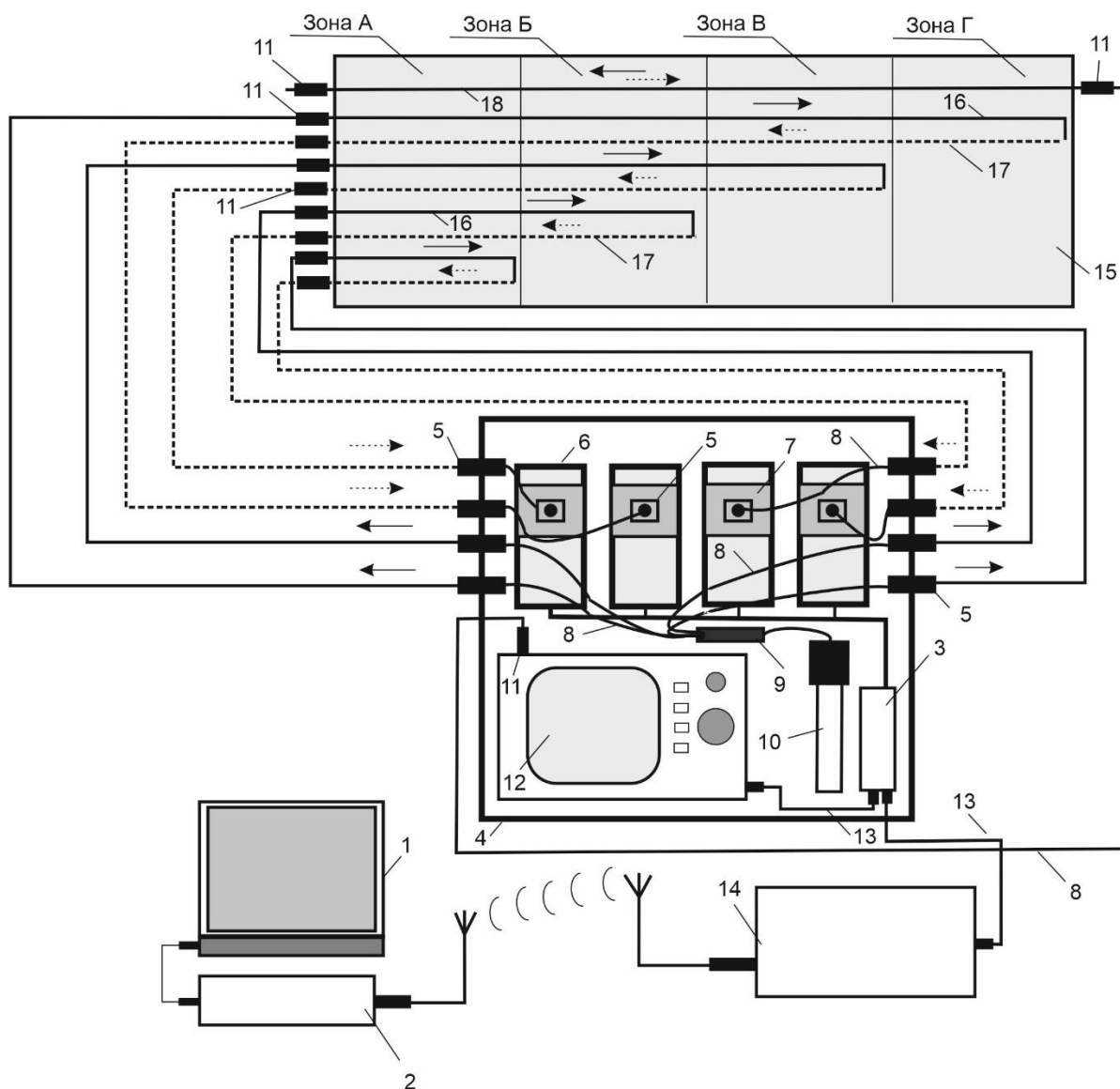


Рисунок 11 Г – АСК с увеличенным числом каналов до 24

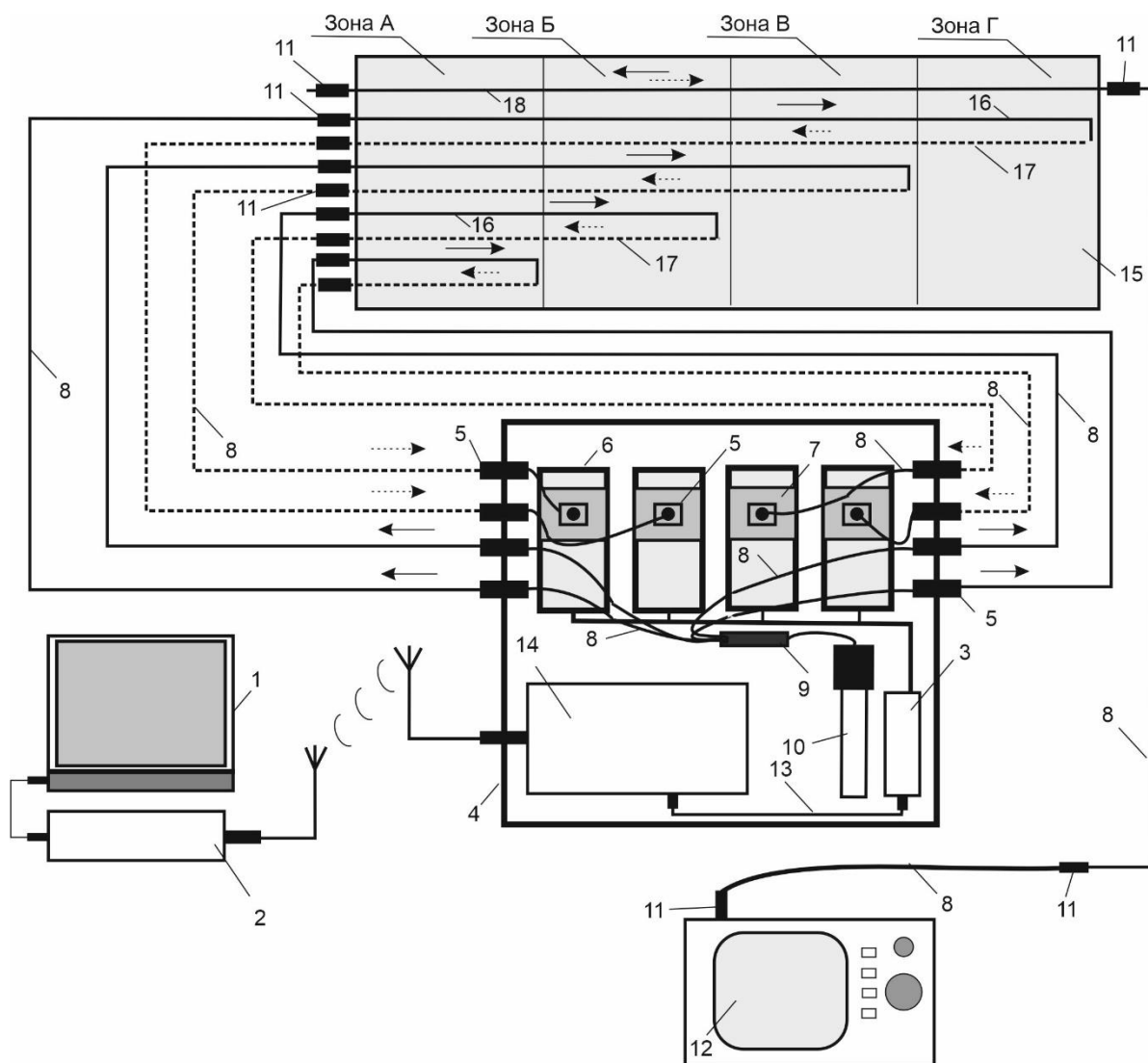


Рисунок 12 Г – Место подключения квази- распределенных ВОД



1 – персональный компьютер с АПК; 2 – блок модуль связи и согласования с персональным компьютером; 3 – Ethernet коммутатор; 4 – корпус блока обработки данных; 5 – оптический адаптер типа SC; 6 – фотоматрицы и микропроцессоры от IP-камер в едином корпусе, 7 – квадратный корпус оптического модуля (оптический волновод); 8 – оптический патч-корд с коннекторами типа SC; 9 – оптический разветвитель  $\frac{1}{4}$  с коннекторами типа SC; 10 – источник излучения; 11 – оптические коннекторы типа SC; 12 – оптический рефлектометр; 13 – Ethernet кабель 14 – модуль связи между персональным компьютером и блоком обработки данных; ; 15 – железобетонный фундамент.

Рисунок 13 Г – Схема компоновки АСК с подключением ВОД (Вариант 2)



1 – персональный компьютер с АПК; 2 – блок модуль связи и согласования с персональным компьютером; 3 – Ethernet коммутатор; 4 – корпус блока обработки данных; 5 – оптический адаптер типа SC; 6 – фотоматрицы и микропроцессоры от IP-камер в едином корпусе, 7 – квадратный корпус оптического модуля (оптический волновод); 8 – оптический патч-корд с коннекторами типа SC; 9 – оптический разветвитель  $\frac{1}{4}$  с коннекторами типа SC; 10 – источник излучения; 11 – оптические коннекторы типа SC; 12 – оптический рефлектометр; 13 – Ethernet кабель 14 – модуль связи между персональным компьютером и блоком обработки данных; 15 – железобетонный фундамент.

Рисунок 14 Г – Схема компоновки АСК с подключением ВОД (Вариант 3)



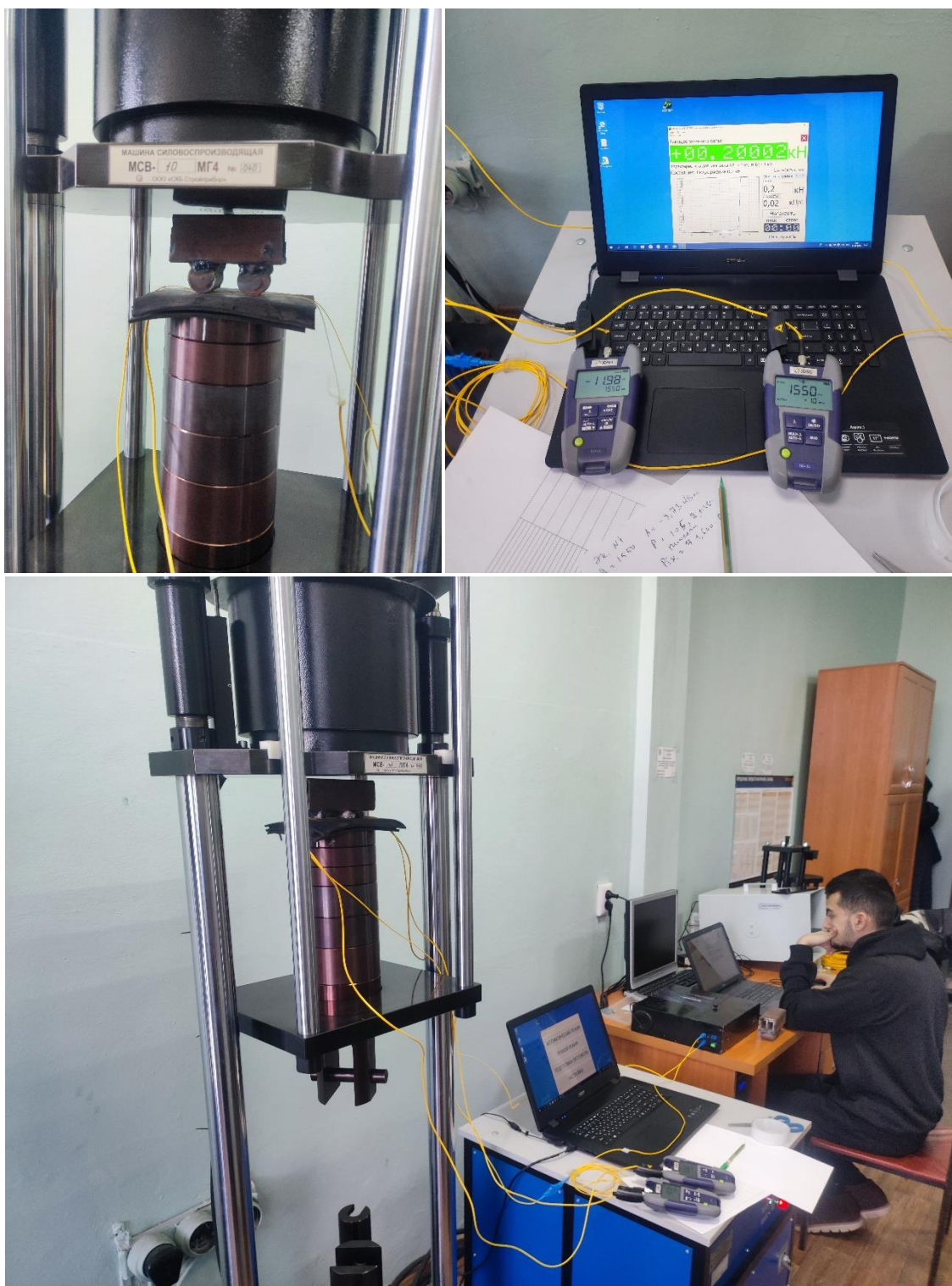


Рисунок 15 Г – Эксперимент по калибровки АСК и ВОД



Рисунок 16 Г – Измерительные приборы

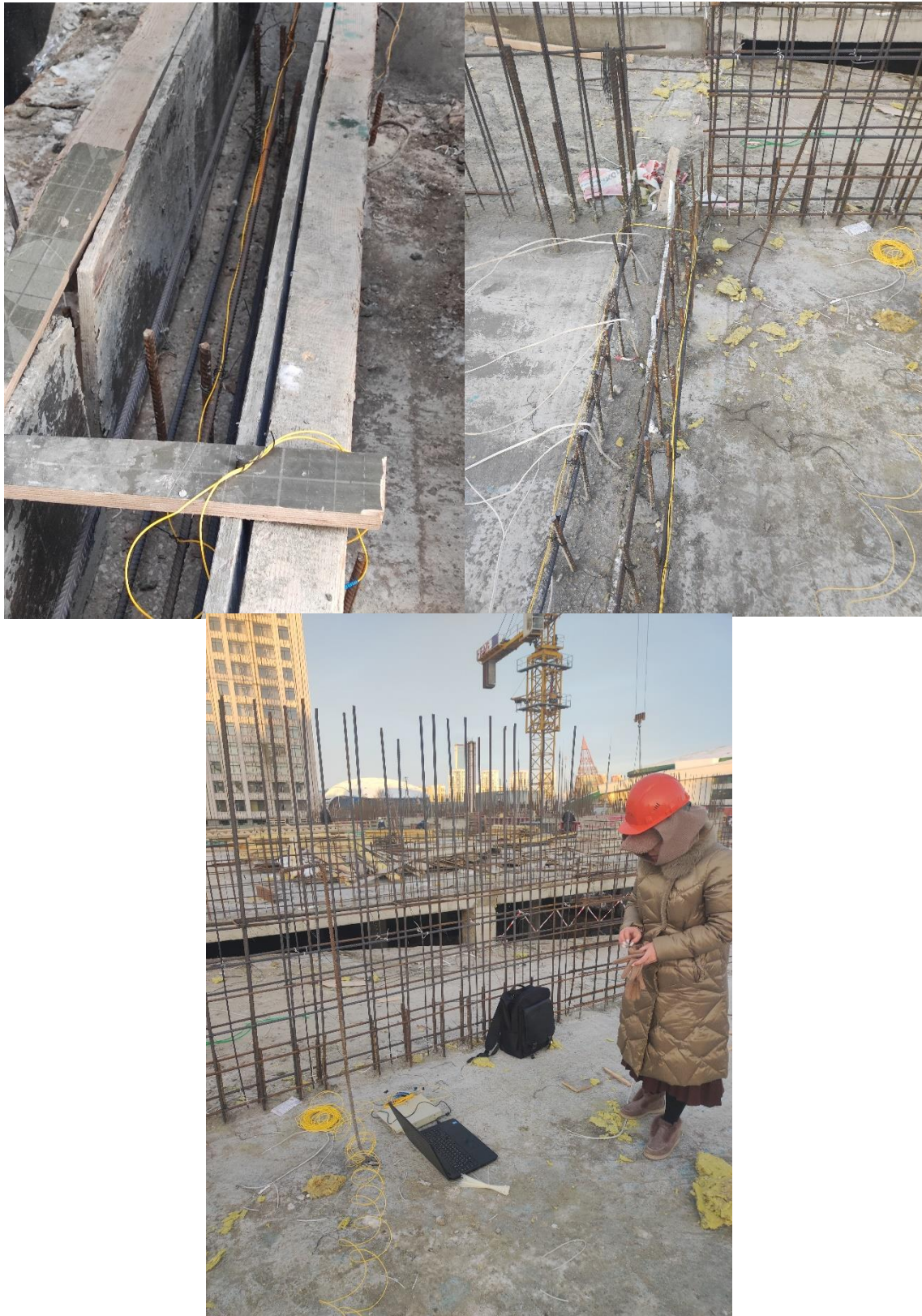


Рисунок 17 Г – Подготовительные мероприятия по закреплению ОВ на арматурных стержнях плит перекрытия, колон и фундамента



Рисунок 18 Г – Проведение контроля параметров СЖК



Рисунок 19 Г – СК с оптическим рефлектометром

## Приложение Д

«СОГЛАСОВАНО»

Член Правления-Проректор по науке, коммерциализации и интернационализации НАО «Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева»  
Ж. Курмангалиева  
« » 2023 г.



«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального директора РГП «Казахстанский институт стандартизации и сертификации» Комитета технического регулирования и метрологии  
Министерства торговли и интеграции Республики Казахстан  
Мухамеджанов Б.Ж.  
« » 2023 г.



### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

**результатов диссертационного исследования «Волоконно-оптическая система контроля технического состояния протяженных объектов и строительных конструкций»  
в учебный процесс ЕНУ им. Л.Н. Гумилева**

1. Наименование научно-исследовательских, научно-технических работ и (или) результатов научной и (или) научно-технической деятельности Основные научные результаты диссертационной работы Аймагамбетовой Р.Ж., старшего преподавателя кафедры «Стандартизации, метрологии и сертификации» Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по направлению 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий».

2. Краткая аннотация: Новый метод контроля и оригинальное техническое решение создания квази-распределенной системы волоконно-оптических сенсоров с аппаратно-программным комплексом, для повышения эффективности контроля и обеспечения безопасности эксплуатации протяженных объектов и строительных конструкций

3. Эффект от внедрения (экономический, социальный, экологический):  
Экономический эффект - сокращение затрат на эксплуатацию. Контроль технического состояния в режиме реального времени для раннего обнаружения мест разрушения строительных конструкций.

Социальный эффект - развитие цифровизации строительной индустрии и внедрение интеллектуальных систем контроля.

4. Место и время внедрения: НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», 2022-2023 учебный год.

5. Форма внедрения: методическое обеспечение в лекционном курсе, лабораторном практикуме по дисциплине «Метрология», «Математическая обработка результатов поверки и калибровки» для студентов специальностей 6В073200 «Стандартизация и сертификация», 6В07550 «Метрология».

Заведующая кафедрой  
«Стандартизации, метрологии  
и сертификации» ЕНУ им. Л.Н. Гумилева



Б.У. Байхожаева

Декан Транспортно-энергетического  
Факультета ЕНУ им. Л.Н. Гумилева



Т.Б. Сулейменов

Руководитель Департамента стратегического  
развития и науки РГП «КазСтандарт»



Р.Т. Мусин



**ПРОТОКОЛ**  
**заседания технологической службы**  
**ТОО Строительная компания «Empire Construction».**

**Повестка дня**

1. Обсуждение диссертационной работы на тему «АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ»

**СЛУШАЛИ:** Аймагамбетову Раушан Жанатовну, заместителя руководителя Департамента стратегического развития и науки Казахстанского института стандартизации и метрологии, которая доложила основные положения своей диссертационной работы.

Научный руководитель – Стукач О.В., доктор технических наук, профессор департамента электронной инженерии Московского института электроники и математики им. А.Н. Тихонова.

Представлен разработанный аппаратно-программный комплекс контроля технического состояния строительных конструкций, на основе волоконно-оптических датчиков. Образцовая модель использовалась для практической отработки методов контроля технического состояния протяженных объектов и монолитных строительных конструкций. Трещины, особенно скрытые, представляют серьезную опасность, поскольку при отсутствии контроля за их ростом и раскрытием фактическое техническое состояние конструкции является неизвестным, а последствия эксплуатации таких конструкций могут быть достаточно серьезными в плане угрозы обрушения и гибели людей. Задачу эффективного контроля технического состояния протяженных объектов и монолитных строительных конструкций, в том числе железобетонных фундаментов, который позволит решить за счет использования автоматических систем волоконно-оптического контроля, основанных на использовании цифровых технологий. Рост трещин и их раскрытие могут происходить с различной интенсивностью, что приводит к внезапному разрушению монолитной железобетонной строительной конструкции, например фундамента. При этом образовавшиеся дефекты могут быть скрыты и недоступны для визуального поиска. Разрушение фундамента формирует опасность для всей строительной конструкции в целом.

Отмечено, что в перспективе аппаратно-программный комплекс будет способен контролировать ряд параметров одновременно, таких как нагрузка, состояние монолитных конструкций, температуру, давления в фундаменте.

Были заданы вопросы, на которые автор диссертации дал подробные и исчерпывающие ответы.

**ПОСТАНОВИЛИ:** рекомендовать диссертационную работу Аймагамбетовой Р.Ж. к дальнейшему исследованию и внедрению на строительных объектах с соблюдением требований промышленной и технической безопасности.

Директор

Главный инженер



Балакаева А.

Кали А.Н.



УТВЕРЖДАЮ  
Заместитель генерального директора  
РГП «Казахстанский институт  
стандартизации и метрологии»,  
Мухамеджанов Б.Ж.  
«20» 04 2023 г.



**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**  
результатов диссертационного исследования  
Аймагамбетовой Раушан Жанатовны, на тему «Аппаратно-  
программный комплекс контроля технического состояния строительных  
конструкций на основе волоконно-оптических датчиков»

Настоящим актом подтверждается, что выполненные в рамках диссертационной работы исследования Аймагамбетовой Р.Ж., а также их практическая реализация в виде разработанного аппаратно-программного комплекса квази-распределенной системы волоконно-оптических сенсоров с новым методом контроля и оригинальным техническим решением, используются на объектах исследования Казахстанского института стандартизации и метрологии с целью повышения эффективности контроля и обеспечения безопасности эксплуатации протяженных объектов и строительных конструкций. Комплекс контроля доказал свою работоспособность и пригодность для практического применения.

Предложенный метод контроля регистрации изменения параметров позволили с высокой точностью оперативно реагировать, а также отслеживать показатели, характеризующие протекание процесса.

Настоящее заключение не является основанием для предъявления финансовых претензий.

Руководитель Департамента  
государственных эталонов  
РГП «КазСтандарт»

Г.А. Суйеубаева

Председатель Совета молодых ученых  
РГП «КазСтандарт», доктор phd,  
ассоциированный профессор

М.Д. Конканов

Рисунок 3Д- Акт внедрения в Институте



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

# ПАТЕНТ PATENT

№ 7775

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL



(21) 2022/0783.2

(22) 16.09.2022

(45) 27.01.2023

- (54) Кез келген ұзартылған нысандар мен темірбетон конструкцияларының апаттық бұзылуын ескертуге арналған күзет дабылының талшықты-оптикалық жүйесі  
Волоконно-оптическая система охранной сигнализации для предупреждения аварийного разрушения железобетонных конструкций и любых протяженных объектов  
Fiber optic security signaling system for preventing emergency failure of reinforced concrete structures and any extended objects
- (73) Алькина Камажай Юсуповна (KZ)  
Alkina Kamazhay Yusupovna (KZ)
- (72) Мехтiev Али Джаванширович (KZ)      Mekhtiyev Ali Dzhavanshirovich (KZ)  
Аймагамбетова Раушан Жанатовна (KZ)      Aimagambetova Raushan Zhanatovna (KZ)  
Аубакирова Бахыткул Бохаевна (KZ)      Aubakirova Bakhytkul Bokhaevna (KZ)  
Қожас Айгул Кежебекқызы (KZ)      Khozhas Aigul Kezhebekkyzy (KZ)  
Мади Перизат Шаймуратқызы (KZ)      Madi Perizat Shaimuratkyzy (KZ)  
Алькина Алия Даулетхановна (KZ)      Alkina Aliya Dauletghanovna (KZ)  
Сарсикеев Ермек Жасланович (KZ)      Sarsikeev Yermek Zhaslanovich (KZ)  
Мехтiev Руслан Алиевич (KZ)      Mekhtiyev Ruslan Aliyevich (KZ)



ЭЦҚ қол қойылды  
Подписано ЭЦП  
Signed with EDS

Н. Әбілқайыров  
Н. Абулкаиров  
N. Abulkairov

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМҚ директорының м.а.  
И.о. директора РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»  
Executive director of RSE «National institute of intellectual property»

Рисунок 4Д - Патент на полезную модель



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ  
PATENT

№ 36074

ӨНЕРТАБЫСҚА / НА ИЗОБРЕТЕНИЕ / FOR INVENTION



(21) 2021/0658.1

(22) 28.10.2021

(45) 27.01.2023

(54) Стационарлық объектілерді, су қоймаларды және сейсмоқауіпті аймақтарды мониторингілеудің, телеметрияның және бақылаудың автоматтандырылған талшықты-оптикалық жүйесі

Автоматизированная волоконно-оптическая система мониторинга, телеметрии и контроля стационарных объектов, водоемов и сейсмоопасных участков

Automated fiber-optic system for monitoring, telemetry and control of stationary objects, water bodies and earthquake-prone areas

(73) Алькина Камажай Юсуповна (KZ)  
Alkina Kamazhay Yusupovna (KZ)

(72) Мехтиев Али Джаванширович (KZ)  
Алькина Алия Даулетхановна (KZ)

Мади Перизат Шаймуратқызы (KZ)

Аймагамбетова Раушан Жанатовна (KZ)

Mekhtiyev Ali Dzhanashirovich (KZ)

Alkina Aliya Dauletzhanovna (KZ)

Madi Perizat Shaimuratkyzy (KZ)

Aimagambetova Raushan Zhanatovna (KZ)



ЭЦҚ қол қойылды  
Подписано ЭЦП  
Signed with EDS

Н. Әбілқайыров  
Н. Абулқаиров  
N. Abulkairov

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директорының м.а.  
И.о. директора РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»  
Executive director of RSE «National institute of intellectual property»

Рисунок 5Д- Патент на изобретение