

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)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2023 г.

Работа выполнена в Республиканском государственном предприятии на праве хозяйственного ведения «Казахстанский институт стандартизации и метрологии» Комитета технического регулирования и метрологии Министерства торговли и интеграции Республики Казахстан (РГП «КазСтандарт»)

**Научный руководитель:** доктор технических наук, доцент **Стукач Олег Владимирович**

**Официальные оппоненты:** **Горлов Николай Ильич**, доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики», кафедра фотоники в телекоммуникациях, профессор


**Тихомиров Сергей Владимирович**, доктор технических наук, ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений», отдел аспирантуры, преподаватель

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук» (ИАиЭ СО РАН)

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_ 2023 года в 15 час. на заседании диссертационного совета Д32.1.006.01 при ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы» по адресу: 119361, г. Москва, ул. Озерная, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБУ «ВНИИМС» и веб-сайте <https://www.vniims.ru/about/dissertacionnyj-sovet/dissertatsii/>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 32.1.006.01  **Лысенко Валерий Григорьевич**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **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 формирует опасность для всей строительной конструкции в целом. В случае появления дефектов или разрушения фундамента ОВ подвергается деформации, которое вызывает изменения показателей преломления, что в свою очередь влечет изменения параметров изучения, которые можно зафиксировать при помощи фотоприемника. Деформации 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 около до нескольких км. 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 обладает хорошей помехозащищенностью. 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 достаточной широтой применения, относительной простотой, невысокой стоимостью и позволяет обеспечить безопасную эксплуатацию строительных и протяженных объектов и принять превентивные меры по их защите, новый инструмент 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, что является основанием проведения научных исследований. Выбор темы, цели и поставленных задач обусловлены 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 протяженных объектов с одновременным использованием волоконно-оптических чувствительных элементов (датчиков) распределенного и квази-распределенного 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 протяженного объекта, способного при помощи квази-распределенных

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 патентный поиск. 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, но и 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 ОВ, 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 218 страниц, включает 124 рисунка, 3 таблицы и 5 приложения

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель, задачи, основные научные положения, новизна и практическая значимость работы, а также в концентрированной форме изложена степень разработанности рассматриваемых научных задач.

**В первой главе** приведены сведения о результатах теоретических и экспериментальных исследований российских и зарубежных учёных. Выполнен анализ современного состояния вопроса и методов контроля технического состояния строительных конструкций. Проанализированы научные статьи и патенты с 2012 по 2022 годы и частично 2023 год, которые входят в различные базы данных (Scopus, Web of Science, РИНЦ, КазБЦ, РосПатент, КазПатент). Проведен обзор современных интеллектуальных систем мониторинга целостности протяженных объектов и строительных конструкций на основе волоконно-оптических датчиков: существуют датчики для измерения параметров механических напряжений, деформации, температуры и др., которые в своей основе используют метод оптической рефлектометрии временной области (OTDR), метод фазочувствительной рефлектометрии, а также на разных видах оптического рассеяние Бриллюэна, Рамановского, Рэлеевского. В обзоре были рассмотрены ВОД: точечные, распределенные, квази-распределенные. Также были рассмотрены ВОД, основанные на фотоупругом эффекте, предназначенные для измерения нагрузки, давления и НДС, в которых могут применяться разные волокна. Были изучены ВОД на принципе измерения параметров излучения оптической волны, в том числе амплитудные. Отдельное внимание было уделено интерферометрическим датчикам, таким как Маха-Цендера, Фабри Перо, Майкельсона, Саньяка. Анализ показал, что наиболее перспективными являются датчики на основе внутриволоконных решеток, например Брэгга или длинно периодические. Имеются ВОД, основанные на изменении интенсивности света при механическом воздействии на них, при этом параметры измеряются фотодетекторам. Установлено, что более чувствительными по отношению к амплитудным ВОД являются датчики, контролирующие фазы. ВОД на основе интерферометра имеют широкое распространение, так как обладают высокой точностью измерения, но и высоким уровнем помех, которое возникает при изменении температуры, соответственно требуется более сложная АПК. По результатам анализа сделаны выводы, что наиболее простой конструкцией и



невысокой стоимостью обладают амплитудные ВОД, способные обеспечить контроль технического состояния строительной конструкции на требуемом уровне.

Существуют нерешенные задачи, связанные с эффективным контролем монолитных конструкций, включая фундаменты, в которых образуются трещины. Во многих случаях протяженные объекты не доступны к осмотру. Развитие трещин в фундаменте ведет к разрушению стен здания и создает опасность внезапного обрушения. ВОСМ может использовать существующие волоконно-оптические телекоммуникационные сети для передачи данных в пределах города или на более значительные расстояния. Если установить ВОД в теле фундамента при его монтаже или закрепить их на его поверхности, то можно своевременно обнаружить очаги разрушения (рисунок 1).



Рисунок 1 - Очаги разрушения железобетонного фундамента

Конструкция ВОД является более простой, а сам он будет иметь меньшую стоимость по сравнению со струнным датчиком. Опыт использования ОВ для контроля технического состояния строительных конструкций показал, что можно определить изменение напряженно-деформированного состояния конструкции на ранних стадиях формирования концентраторов напряжений и зарождения трещин. ОВ может быть встроено в тело фундамента и находиться в нем в течение всего срока службы. ОВ в отличие от медной пары струнного датчика, у которой длина направляющей системы ограничена 800 метрами, может передавать данные измерений на расстояние несколько км, при низких энергозатратах.

**В второй главе** приведены результаты разработки физико-математической модели процесса преобразования внешнего светового сигнала в визуальный сигнал, позволяющий с помощью методов волновой оптики интерпретировать процесс возникновения различного рода дефектов в строительных конструкциях под действием внешних нагрузок. Представлены математические выражения, позволяющие выполнить численный расчет величины интенсивности светового сигнала в деформированной монолитной железобетонной конструкции путем анализа зависимости показателей преломления света от геометрических характеристик материала конструкции, его температуры и условия деформации. Методология исследований строится на основных законах геометрической и волновой оптики, в рамках феноменологической теории оптико-электрических процессов, связанных со взаимодействием световой волны (оптического сигнала) с веществом ОВ.

Математическое моделирование процессов неупругих деформаций в горизонтальной деформированной балке с ОБ при разложении потенциальной энергии напряженного тела по смещениям  $U(x) \approx \frac{kx^2}{2} + \frac{\beta x^4}{4}$ .

Используются известные из теории упругости 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,  $k$  – коэффициент.

Коэффициент относительного объемного расширения равен  $\beta_V = \mu\varepsilon_{\parallel}^2$ , где  $\varepsilon_{\parallel} = \frac{\Delta l}{l}$  – относительное продольное удлинение (или сжатие), где  $l$  – длина балки,  $\mu = \frac{\beta_V}{\varepsilon_{\parallel}^2}$  – коэффициент Пуассона, рассчитываемый с учетом параметра  $\beta_V = \frac{\Delta V}{V}$ .

Принимая  $\beta_V = \frac{\Delta S \Delta l}{Sl} = \varepsilon_{\perp} \varepsilon_{\parallel}$ , где  $\varepsilon_{\perp} = \frac{\Delta S}{S}$  – относительное поперечное расширение (удлинение или сжатие), имеем  $\mu = \frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\parallel}}$ , где  $\varepsilon_{\parallel} = \frac{\Delta l}{l}$  продольная относительная деформация по длине балки с ОБ,  $\varepsilon_{\perp} = \frac{\Delta S}{S}$  поперечная относительная деформация по сечению балки с ОБ, далее  $\mu = \frac{l\Delta S}{S\Delta l}$  откуда, предполагая поперечное сечение 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  $U(x) \approx \frac{kx^2}{2}$  и, на этой основе, из условия предельного смещения  $mg\Delta l = \frac{k(\Delta l)^2}{2}$ , получим абсолютное продольное удлинение (или сжатие)  $\Delta l = \frac{2mg}{k} = \frac{2mgl}{ES}$ , где  $S = \pi r_1^2$  – площадь поперечного сечения недеформированной балки массой  $m$ .

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

Выражение для коэффициента Пуассона может быть интерпретировано для случаев продольного расширения  $r_2 > r_1$ , когда

$$r_2 = r_1 \sqrt{1 + \frac{2mg\mu}{E\pi r_1^2}} \quad \text{сжатия } r_2 < r_1, \text{ когда } r_2 = r_1 \sqrt{1 - \frac{2mg\mu}{E\pi r_1^2}}.$$

В этих случаях, окончательные выражения для абсолютного и относительного поперечного удлинения и сжатия принимают вид

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

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

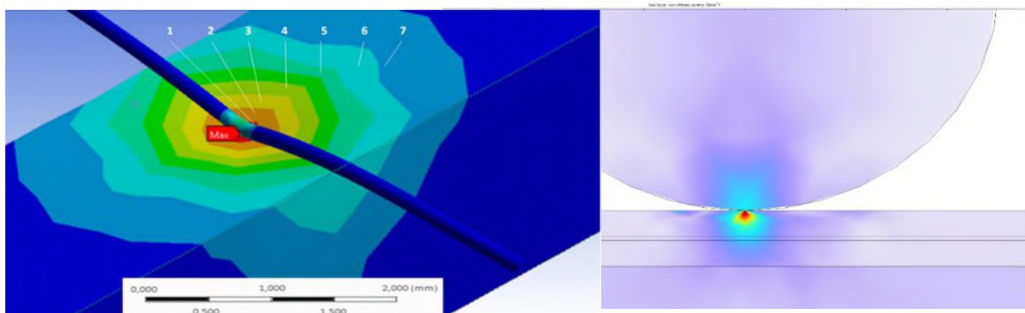
Распределение объемной плотности мощности электромагнитного поля волны в оптоволокне (расположенном вдоль оси горизонтальной (равно как и вертикальной) деформируемой балки), в недеформированном состоянии балки:

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

В деформированном состоянии балки:

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

Параметр  $\zeta_0$  представляет собой множество различных характеристических молекулярных параметров материала ОВ,  $n_\infty$  показатель преломления ОВ.  $l_1$   $r_1$  и  $l_2$   $r_2$  длина и сечение балки до и после деформации. На показатель преломления влияют геометрические характеристики кристаллической структуры (прежде всего тип симметрии решетки, постоянная решетки и линейные размеры образца  $d$ ) и оптико-геометрические параметры (угол падения луча на поверхность материала  $\theta$  и угол  $\alpha_0$  между волновым вектором преломленного в образце оптического сигнала (луча) и вектором нормали к поверхности фотоприемника. Результатом расчёта стало вычисление механического напряжения в области контакта оптического волокна - стального стержня. Кроме того, получена визуализация картины распространения механических напряжений и деформаций с точным отображением распределения напряжения в каждой точке компьютерной модели. Визуализация напряженно-деформационного состояния ОВ при механическом воздействии стального стержня представлена на рисунке 2.



1 – 0,23162 МПа, 2 – 0,18015 МПа, 3 – 0,15442 МПа, 4 – 0,10295 МПа,  
5 – 0,07721 МПа, 6 – 0,05148 МПа, 7 – 0,02574 МПа

Рисунок 2 – Моделирования микроизгиба ОВ в программе ANSYS

В данной главе представлены результаты компьютерного моделирования процесса деформации оптического волокна с использованием программного обеспечения ANSYS и COMSOL Multiphysics. Полученные модели позволяют визуализировать процессы изменения деформации волоконно-оптического датчика и параметров световой волны, проходящей по сердцевине оптического волокна при механическом воздействии на него. Моделирование показало, что дополнительные потери мощности световой волны увеличиваются при таком радиусе изгиба, который является критическим, когда волоконный проводник находится на грани механического повреждения. Выполнены планирование эксперимента, обработка результатов измерений и построение математических моделей. Для обработки полученных данных применен статистико-детерминированный метод построения моделей с использованием ЭВМ и программы ANETR, который базируется на разработках профессора М. М. Протодяконова.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований в лабораторных условиях при установке волоконно-оптических датчиков для контроля деформации (смещения). На основе анализа существующих методов неразрушающего контроля прочности бетонной крепи, предложена система контроля идентификации дефектов конструкции бетонной крепи при использовании телекоммуникационного одномодового оптического волокна G.652 в качестве чувствительного элемента и сенсора в системе. В основу контроля положены изменения параметров излучения либо увеличение потерь оптического волокна.

Эксперименты проводились с использованием пресса гидравлического для испытания строительных материалов П-125. Пресс представляет собой установку, состоящую из нагружающего устройства и пульта управления. В измерительном блоке расположен торсионный силоизмеритель и диаграммный аппарат. Первоначальная калибровка волоконно-оптических датчиков, помещенных в железобетонную балку, выполнялась при помощи тензодатчика с АЦП. Проверка в дальнейшем осуществлялась при помощи измерителя нагрузки пресса П-125. Диапазон измерения от 125 до 625 кН, диапазон показаний от 0 до 625 кН, цена деления 1,25 кН; допустимая погрешность измерения нагрузки при прямом ходе, начиная с 20% наибольшего значения диапазона измерения, но не ниже 10% наибольшей предельной нагрузки, % величины измеряемой нагрузки  $\pm 2$ . Бетонная балка размещалась на двух опорах, а третья опора использовалась для создания давления на центр балки. Для контроля смещения плит использовался штангенциркуль с цифровой индикацией диапазоном 0-150 мм, а также с разрешением 0,01 мм и точностью  $\pm 0,01$  мм (производства Китай). На рисунке 3 показан процесс разрушения бетонной балки при помощи пресса, в которую было строено ОВ для контроля параметров нагружения, а также установления фактора ее разрешения.



Рисунок 3- Проведение эксперимента по разрушению бетонной балки

Как сказано ранее, оптическое волокно было предварительно встроено в тело железобетонной балки. При давлении на балку в центральной части возникает ее разрушение вследствие возникновения концентрации напряжений и образования трещин. При разрушении балка деформируется, соответственно деформируется стальная арматура, к которой крепятся волоконно-оптические датчики. В процессе эксперимента подтвердилась особенность того, что оптическое волокно способно работать в качестве чувствительного сенсора для идентификации повреждения монолитной железобетонной конструкции. Методика основана на контроле изменения свойств света, проходящего по ОВ при механическом воздействии, это позволяет установить численное значение механических напряжений или деформации в теле балки, а также определить предельное значение, при котором возможно возникновение трещины. Предлагаемая методика позволяет установить места дислокации локальных скрытых дефектов (трещин) строительных фундаментов железобетонных конструкций, а также в перспективе использовать их на других строительных конструкциях большой протяженности. Проведенный эксперимент позволяет промоделировать ситуацию, когда монолитная железобетонная конструкция, например фундамент, который подмыт грунтовыми водами и потерял возможность опираться на грунтовое основание, разрушается. В месте его разрушения образуются трещины, дислокацию которых можно установить.

На рисунке 4 показана схема проведения эксперимента, который проводился следующим образом: в теле балки 1 располагаются несколько волоконно-оптических датчиков 2, которые закреплены на стальных арматурных стержнях, сверху на балку давит стержень 3. Другие два стержня расположены на нижней плите 4. Расположение стержней создает возможность разрушить балку при изгибе. Верхняя плита 5 опускается на балку, создавая нагрузку 6, которая передается через стержень 3. Так проводятся типовые испытания образцов железобетонных балок для определения их прочности на изгиб. При этом оболочка оптического волокна имеет диаметр 125 мкм, а сердцевина 9 мкм. Поверх оболочки находится защитный слой диаметром 1 мм, что не влияет на прочность строительного фундамента.

В центре балки формируется концентратор механических напряжений и формируется зона необратимой деформации, где зарождаются трещины 7.

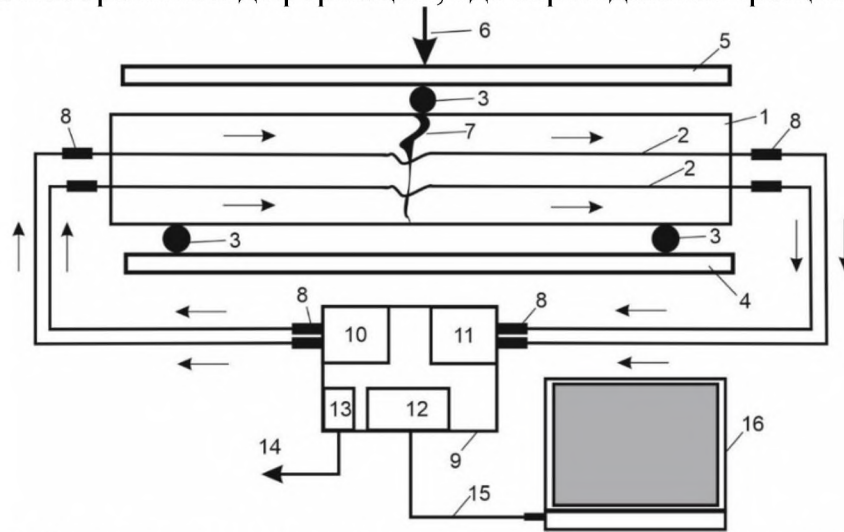


Рисунок 4- Схемы для измерения значений механических напряжений и установления места дефекта

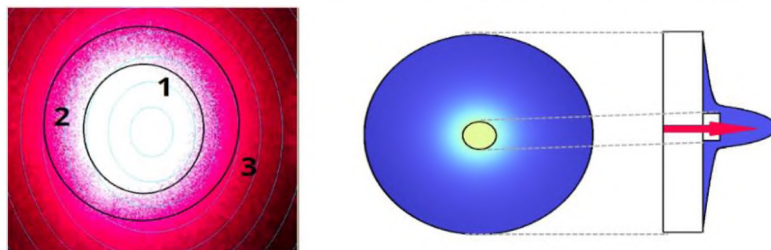
Волоконно-оптические датчики подключены к блоку обработки данных 9 при помощи оптических патч-кордов с SC коннекторами 8.

Каждый оптический патч-корд с двух сторон оснащен коннекторами типа SC. Выбор данных коннекторов является произвольным, и они могут быть заменены на другие без всяких трудностей, например на FC.

В блоке обработки данных находятся четыре основных части. Используется когерентный источник лазерного излучения с длиной волны видимого светового диапазона 650 нм и допустимыми отклонениями не более 1 нм. В экспериментах использовался полупроводниковый лазер типа InGaAs (Laser launcher level CLASS III), мощностью 10 мВт с длиной волны 650 нм. Мощность лазера может быть увеличена до 30 мВт в случае увеличения длины измерительного канала до 10 км. Для разделения луча на несколько каналов используется оптический разветвитель, который распределяет энергию световой волны в равных пропорциях между каждым каналом. В эксперименте использован оптический разветвитель типа PLCM-1U4U-SC с разделением на четыре канала с соотношением  $\frac{1}{4}$ , соответственно энергия световой волны была разделена на каждый канал в соотношении 25%. Увеличение количества каналов потребует увеличения мощности лазера, также мощность используемого лазера зависит от длины волоконно-оптической линии связи датчика с блоком обработки данных. Использование нескольких каналов позволяет повысить контроль НДС конструкции и вероятность обнаружения дефектов. Луч лазера, пройдя по ВОД 2, попадает на фотоприёмное устройство 11, которое фиксирует все изменения сформировавшегося на поверхности фотоматрицы изменения интенсивности.

Как показано на рисунке 5, на выходе из ОВ формируется ступенчатый профиль светового пятна, который можно описать по закону распределения Гаусса. На выходе из ОВ устанавливается фотоматрица высокого разрешения, на

поверхность которой падает световое пятно при длине волны 650 нм. На каждый канал необходимо использовать отдельную фотоматрицу, которая преобразовывает световой сигнал в электрический и отправляет его в микропроцессорный блок обработки данных и согласования 12, которые соединяются при помощи USB кабеля 15 с персональным компьютером 16.



Зона распространения света: 1 – по сердцевине; 2 – по границе перехода между сердцевинной и оболочкой; 3 – по оболочке.

Рисунок 5- Профиль светового пятна при длине волны 650 нм

Для работы блока 9 необходим источник постоянного тока 13 с сетевым шнуром 14. Для работы аппаратно-программного комплекса используется специально разработанное программное обеспечение, которое установлено на персональный компьютер 16. Аппаратно-программный комплекс способен детерминировать полученные данные и исключать ложное срабатывание. АПК способен контролировать изменение давления по изменению уровня дополнительных потерь и интенсивности световой волны, падающей на поверхность фотоприемника, а интеллектуальная обработка изображения пятна позволяет отслеживать изменения интенсивности отдельных пикселей. Предлагаемая квази-распределенная АПК может иметь неограниченное количество каналов. На рисунке 6 показан момент испытаний и настройки АПК при механическом воздействии на волоконно-оптические датчики (ВОД), который находится внутри железобетонной балки. АПК способна работать одновременно с четырьмя ВОД.

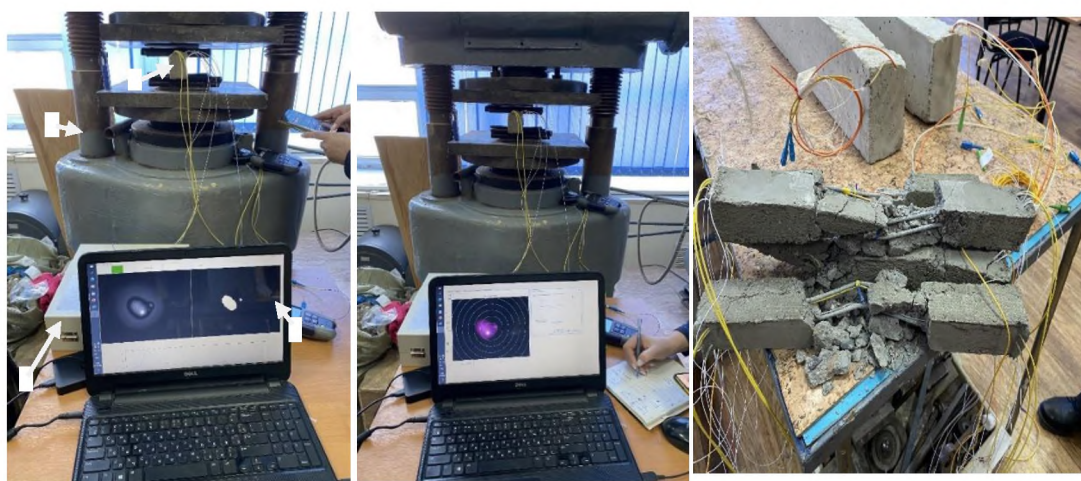
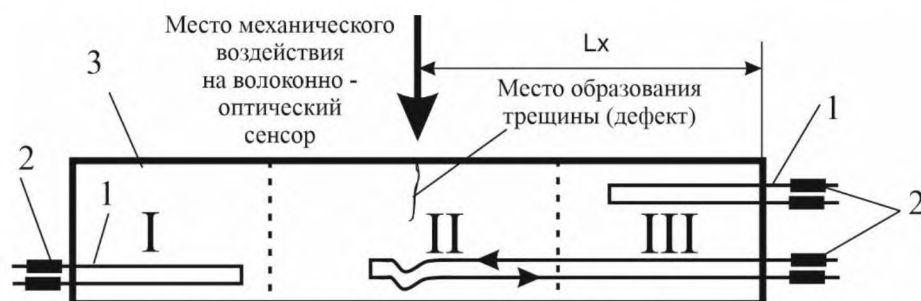


Рисунок 6 - Момент испытаний и настройки АПК при механическом воздействии на волоконно-оптические датчики

Например, при длине фундамента в 400 метров по его периметру можно организовать при необходимости 40 зон по 10 метров. Для более точного обнаружения места образования трещины с разрешением 1 м на дистанцию 1000 м используется дополнительно метод оптической рефлектометрии. На рисунке 7 показан пример разделения железобетонного фундамента на зоны.



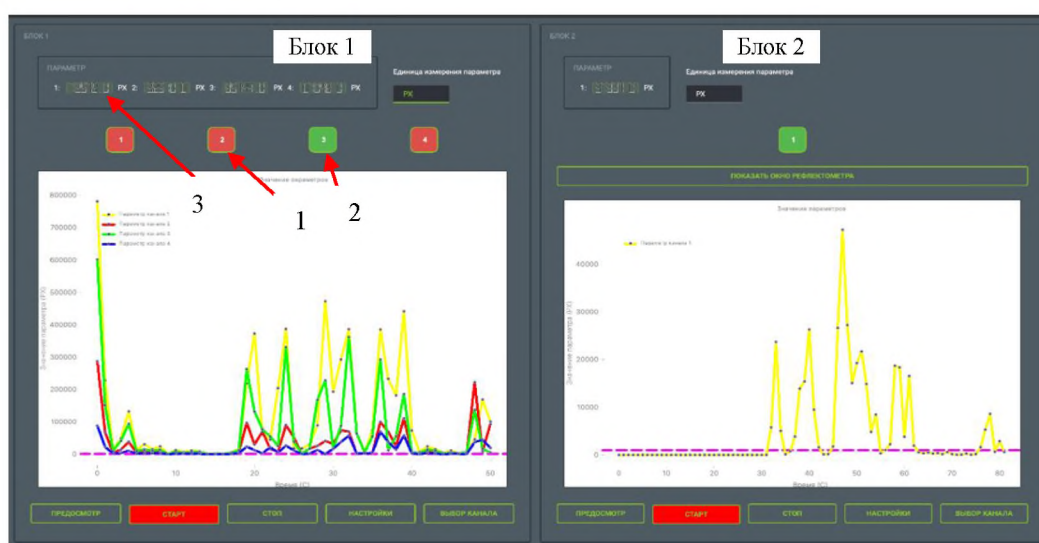
1- волоконно-оптический датчик (ВОД); 2 – оптический коннектор для коммутации ВОД; 3 – железобетонный фундамент.

Рисунок 7 -Разделение фундамента на зоны

**В четвертой главе** рассмотрены методика контроля технического состояния строительных конструкций и протяжённых объектов с применением волоконно-оптических чувствительных элементов квази-распределенного и распределённого типа и аппаратно-программный комплекс (АПК) в отличие от известных методов оптической интерферометрии и рефлектометрии, а также волоконных решёток Брэгга и длиннопериодных волоконных решеток, которые имеют более низкую стоимость одной точки измерения, а также преимущества по сравнению с оптическим интерферометром, имеющим зависимость фазы распространения световой волны от температуры. Так, изменение температуры на  $1^{\circ}\text{C}$  может вызвать ложное срабатывание при отсутствии механического воздействия на сенсор. Также нужно учитывать специфику размещения датчиков в железобетонной конструкции, а это квази- распределённая система измерений. В предложенной квази- распределенной АПК заложен новый принцип построения и обработки данных, основанный на интеллектуальном анализе изменения свойств световой волны, проходящей по одномодовому оптическому волокну с обработкой полученных данных и выдачей численного значения нагружения железобетонной строительной конструкции. Программа работает в двух режимах: измерение и тревожная сигнализация, которая срабатывает при резком изменении параметров. АПК позволяет контролировать напряженно-деформированное состояние монолитной железобетонной конструкции. Из важных моментов можно выделить следующее: блок 1 обеспечивает контроль и измерение параметров при помощи волоконно-оптических датчиков. В блоке 1 находятся основные настройки и показаны графики каждого канала. В представленной версии АПК имеется 4 независимых канала. Длина одного измерительного канала может быть от 5 до 500 м. При необходимости количество каналов может быть увеличено до 32. При запуске программы запускается алгоритм контроля изменения параметров светового пятна с использованием оптико-электронного анализа интенсивности



пикселей светового пятна Пуансона с гауссовским распределением, сформированного на торце оптического волокна, падающего на поверхность фотоматрицы высокого разрешения при изменении его коэффициента преломления. На рисунке 8 показано окно АПК. Окно разделено на два независимых блока 1 и 2. Подробное описание структуры блоков и функций АПК представлено в 4 главе диссертации. В блоке настройки каналов имеются поля для ввода необходимых параметров (рисунок 9). Перед запуском производится отладка программы под конкретные задачи и условия, а также ее обучение и сохранение настроек в памяти. Блок 2 содержит окно рефлектометра для поиска места повреждения с точностью до 1 метра.



Индикация состояния: 1 – превышение установленного значения; 2 – нормальное состояние; 3 – численные показатели измерения  
 Рисунок 8 -Главное окно интерфейса АПК

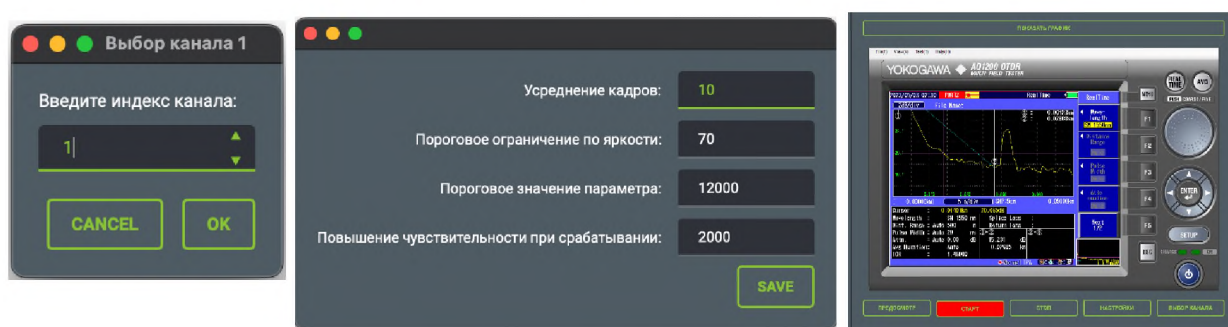
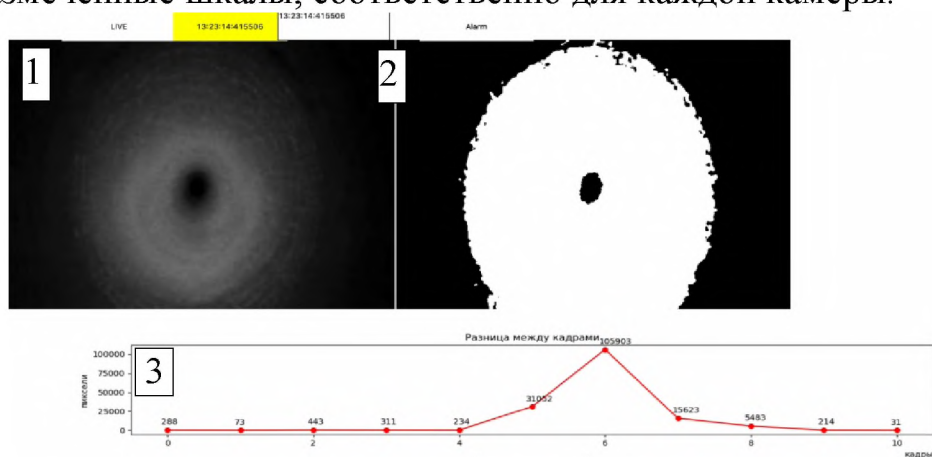


Рисунок 9- Блок настройки АПК

Программа имеет интеллектуальные алгоритмы и разработана с использованием элементов библиотеки OpenCV, а также используется версия для языка Python. Генерация и отображение графиков производится в библиотеке Matplotlib на языке программирования Python для визуализации данных с использованием двумерной (2D) графики (также поддерживается 3D-графика). Интерфейс был реализован с помощью библиотеки Tkinter. На рисунке 10

показан один из примеров запуска АПК в режиме отладки, который имеет три окна.

Первое окно показывает разницу между эталоном и текущим изображением; второе окно показывает, сколько пикселей (серых точек) сработало – превысило пороговое значение и перешло в белые пиксели. Третье окно показывает графики, например, разницу (мгновенную скорость изменения количества белых пикселей) между двумя последовательными значениями количества белых пикселей во времени или общее количество белых пикселей в каждом последовательном изображении. Для остановки программы в режиме отладки достаточно закрыть окно режима отладки. В блоке мониторинга активности показаны размеченные шкалы, соответственно для каждой камеры.



1 – негативное изображение светового пятна; 2 – изменение картины пикселей; 3 – графики изменения параметров светового пятна  
Рисунок 10- Режим показа поступающих и обрабатываемых данных

На рисунке 11 представлены снимки с экрана компьютера, на которых видно, как изменяется интенсивность световой волны при увеличении силы воздействия на волоконно-оптический сенсор. При отсутствии механического воздействия на ОВ, которое находилось внутри бетонной балки, окно программы полностью черное и по мере увеличения нагрузки на балку наблюдался рост белых пикселей. АПК автоматически переводит количество белых пикселей в численное значение измеряемой величины. Форма пятна читается слева направо, если создать условия, при которых на волоконно-оптический сенсор будет оказываться воздействие различной силы. АПК имеет высокую помехозащищенность, так как в процессе работы могут приходить внешние помехи из-за различных факторов, например, изменение внешней температуры, возникновение вибраций или нарушение когерентности работы лазера. При отсутствии какого-либо воздействия возможно появление белых одиночных пикселей, которые программа оценивает как помеху и соответственно вносит корректировки в настройки. Анализируя снимки с экрана компьютера, можно сделать вывод, что увеличение силы воздействия вызывает изменение пикселей светового пятна, по которому можно численно оценить параметр воздействия на ОВ. На начальном этапе на экране видны только отдельные белые точки, это шум. Далее было зафиксировано два воздействия на

сенсор с различной силой. На экране отражено, что при слабом воздействии на сенсор пятно имеет больше черных пикселей, чем сила воздействия, тем больше будет белых пикселей.

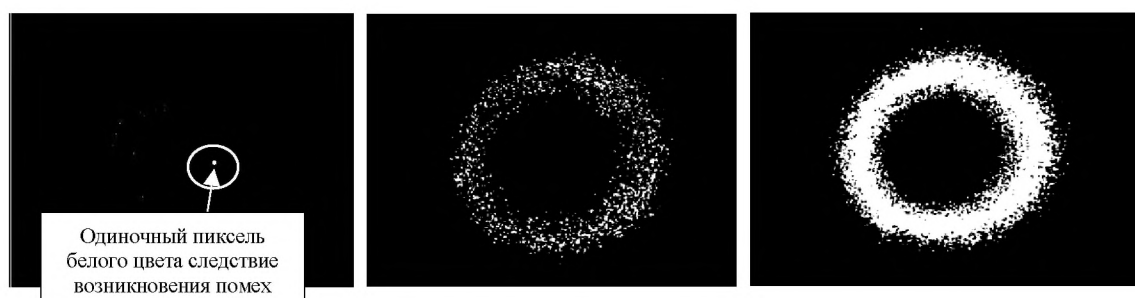


Рисунок 11 - Снимок с экрана компьютера

АПК является интеллектуальным, а также основан на алгоритмах теории и технологии создания машин и использует элементы библиотеки OpenCV (Open Source Computer Vision Library). OpenCV реализована на основании компилируемых статистически типизированных языков программирования, в данном комплексе используется версия для языка Python. Это позволяет анализировать случайные помехи и не воспринимать их как численный результат измерения. При запуске программа способна выполнять самодиагностику и самокалибровку, алгоритм прописывается в настройках программы. На рисунке 12 представлена ситуация, когда на волоконно-оптический датчик было оказано подряд три воздействия с разной силой. При этом до начала воздействия были зафиксированы помехи, которые вызвали появление от 2 до 10 белых пикселей, но программа не фиксировала изменений реальных параметров воздействия на железобетонный фундамент. После окончания воздействия и снятия нагрузок количество белых пикселей снижается.

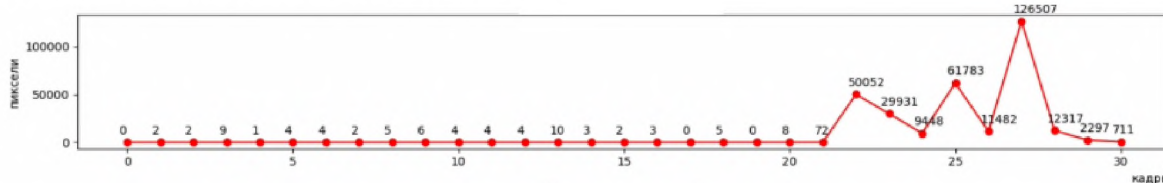


Рисунок 12 -Ситуация, когда на волоконно-оптический датчик было оказано подряд три воздействия с разной силой.

В результате автоматизированной аппроксимации данных получены однофакторные математические модели. Каждое измерение проводилось 10 раз. Доверительная вероятность  $p=0,95$ , квантиль распределения Стьюдента  $t=2,0098$  при заданной доверительной вероятности с числом степеней свободы  $n - k$  ( $n, k$  - число подозрительных результатов наблюдений). Получены данные зависимости потерь оптической мощности от давления пресса (рисунок 12).

АПК был откалиброван при помощи силовоспроизводящей машины МСВ-10МГ-4. Диапазон воспроизводимой силы 0,2-10 кН. Предел допускаемых значений доверительных границ относительной погрешности 0,02%. В результате

практических испытаний установлено, что разрешающая способность АПК имеет точностью до 1 м независимо от длины, и грубое значение от 5 до 500 м в зависимости от длины канала, соответственно можно идентифицировать место повреждения фундамента или протяженного объекта, скрытое под слоем грунта.

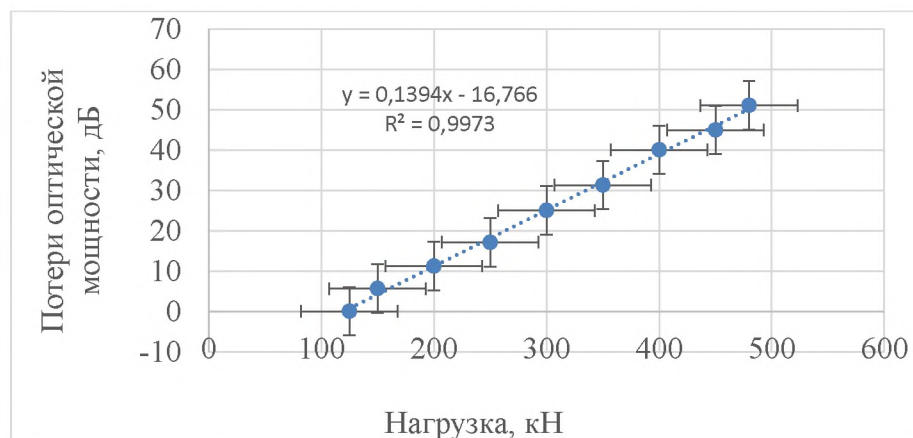


Рисунок 12 - Зависимость потерь оптической мощности волокна с длиной волны 650 нм при пошаговом увеличении силы давления пресса

## 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 Казахском 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 ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Статьи в журналах, входящих в перечень Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации:**

1. 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. № 4 (119). (Magazine of Civil Engineering)

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

3. 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.

4. 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). 2022.

5. 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.

6. Р. Ж. Аймагамбетова. Волоконно-оптическая система контроля устойчивости бортов карьеров. П. Ш. Мадиди, 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

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

**Научные работы, опубликованные автором диссертационного исследования, входящие в международную базу цитирования Scopus и WoS**

8. 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), стр. 121–124

9. 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), стр. 12–27

10. 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

11. 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. Sarsikeyev // METALURGIJA 61 (2022) 2, 351-354

**Патенты и материалы международных конференций:**

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

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

14. Aimagambetova R. Zh. Model of the Yield Loss Factors Based on Survey Analysis for the Integrated Circuits Manufacturing / Oleg V. Stukach// International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED) Conference Paper, 2019

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

16. 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).