

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

*На правах рукописи*

Нешина Елена Геннадьевна

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ  
ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Специальность 05.11.13 Приборы и методы контроля природной среды, веществ,  
материалов и изделий

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д.т.н., профессор Юрченко А.В.

Томск – 2021 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1. ГОРНОЕ ДАВЛЕНИЕ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ.....	20
ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ.....	20
1.2 МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ .....	25
1.3 ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО. ХАРАКТЕРИСТИКА. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ .....	27
1.4 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	36
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1 .....	37
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ.....	39
2.1 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ ДАТЧИКОВ .....	39
2.2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗДЕЙСТВИЯ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ЭЛЕМЕНТЫ КРЕПИ .....	49
2.3 ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА, ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ И ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ.....	54
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2 .....	61
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ ПО РАЗРАБОТКЕ ОПТОВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА.....	62
3.1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАТЧИКОВ ПРИ УСТАНОВКЕ НА МОНОЛИТНОЙ БЕТОННОЙ ШАХТНОЙ КРЕПИ .....	64
3.2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАТЧИКОВ ПРИ УСТАНОВКЕ НА АРОЧНОЙ КРЕПИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ..	79
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3 .....	93
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ.....	94
4.1 РАЗРАБОТКА СХЕМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	99
4.2 АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС .....	106
4.3 ПРАКТИЧЕСКАЯ АПРОБАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ ПРЕДПРИЯТИЙ.....	121

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4 .....	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	126
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	129
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	130
Приложение А Копии полученных патентов .....	139
Приложение Б Акты внедрения и рассмотрения диссертационной работы .....	145

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Строительство предприятий, которые будут производить и перерабатывать полезные ископаемые для конкретного рынка с минимальными эксплуатационными расходами и высокими требованиями к безопасности, требует создания единой системы безопасности. Главным аспектом работы любой шахты или рудника является безопасность проведения работ.

Горнодобывающее предприятие – это производственная среда, характеризующаяся большой протяженностью с риском возникновения пожара и взрыва. В связи с этим необходима для применения надежная и безопасная информационно-измерительная система. Актуальность работы обусловлена важностью вопроса предупреждения о внезапных изменениях параметров, влияющих на прочность горной выработки и обеспечивающих защиту персонала от внезапного обрушения.

Надежная работа любого горнодобывающего предприятия зависит от строгого соблюдения требований безопасности, для чего необходимо иметь достоверные сведения о геотехническом состоянии горной выработки. Поэтому сбор необходимой информации и своевременная передача лицу, принимающему решение, – одна из важных проблем, требующая внимания.

Волоконно-оптические датчики (ВОД) способны с высокой точностью измерять следующие параметры: температура воздуха, напряжение деформации состояния выработки, загазованность. В отличие от традиционных электронных датчиков, волоконно-оптические не могут создавать ситуации, повлекшие за собой взрыв или пожар в горной выработке, т.к. не чувствительны к перепадам напряжения и не могут создать короткое замыкание. На сегодняшний день стоимость 1 км оптического волокна составляет около 9 долларов США за км, что позволяет создать отечественные системы. Благодаря уникальным свойствам

оптических волокон свет распространяется на 100-150 км практически без потерь. К тому же в отличие от традиционных систем контроля нет необходимости использования цветных металлов (меди).

Шахты должны быть оборудованы системой или комплексом средств, которые способны осуществлять безопасное производство, а также информационную поддержку контроля и управления технологическими и производственными процессами в нормальных и аварийных условиях. На первом месте в горном производстве стоит его безопасность, на что указывают все нормативные документы. Поэтому требуется разработка методов и средств, обеспечивающих или отвечающих всем требованиям.

Разрабатываемые датчики позволяют в течение суток непрерывно проводить мониторинг горных выработок, потому как периодичность не может гарантировать безопасность. Они имеют ряд неоспоримых достоинств.

С учетом вышесказанного, развитие и внедрение волоконно-оптической системы, которая позволяет измерять несколько параметров непрерывно и своевременно уведомлять персонал горных предприятий, осуществляющих разработку подземным способом, не вызывает сомнений.

Объектом исследования является предупреждение о внезапных изменениях параметров, влияющих на прочность горной выработки и обеспечивающих защиту персонала от внезапного обрушения. Использование энергоэффективной распределенной системы волоконно-оптических сенсоров и направляющей системы связи с низкими показателями затухания сигнала и высоким уровнем помехозащищённости, а также аппаратно-программного комплекса для обработки данных позволит с высокой точностью идентифицировать любые механические воздействия на горный массив выработки с целью своевременного предупреждения обрушения ее стенок.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросу исследования применения оптического волокна для создания датчиков либо разработки информационно-измерительных систем посвящены работы В.Д.Буркова, В. И. Бусурина, М. М. Бутусова, В. М. Гречишникова, В. Г. Жилина, Е. А. Зак,

Н. Е. Конюхова, Я. В. Малкова, Т. И. Мурашкиной, А. Л. Патлах, В. Т. Потапова, Н. П. Удалова, Т. Ли, Ч. Ванг, Ю. Чао и Ю. Нинг. Несмотря на проведенные исследования, разработанные датчики недостаточно безопасны, так как чувствительны к перепадам напряжения.

Поэтому необходимо проведение полноценного комплексного исследования по разработке волоконно-оптической системы контроля для применения на шахтах, входящих в Карагандинский угольный бассейн, что и определяет актуальность диссертационной работы.

**Цели и задачи.** Целью настоящей работы является разработка нового метода и оригинальных технических решений для контроля геотехнического состояния горных выработок с использованием квазираспределенной системы волоконно-оптических сенсоров с аппаратно-программным комплексом, для повышения эффективности контроля и обеспечения безопасности ведения горных работ в условиях повышенной опасности по внезапному взрыву газа и пыли.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) проанализировать существующие методы контроля идентификации состояния кровли горных выработок с применением волоконно-оптических технологий и методов контроля горного давления;
- 2) проанализировать физические основы контроля деформации горных выработок на основе теории оптического интерферометра;
- 3) провести компьютерное моделирование процесса воздействия горного давления на элементы крепи;
- 4) провести ряд экспериментальных исследований для достижения оптимальных метрологических параметров датчиков, входящих в волоконно-оптическую систему, и внесения изменений для совершенствования конструкции на основе системного подхода;
- 5) разработать аппаратно-программный комплекс, предназначенный для оперативного контроля внезапных изменений параметров, влияющих на прочность горной выработки с перспективой мультиизмерений;

б) оценить эффективность разработанного метода после практического применения разработанного датчика.

**Научная новизна** заключается в том, что в ней впервые:

1. Предложен метод контроля идентификации геотехнического состояния с повышенной чувствительностью за счет применения волоконно-оптических датчиков с некогерентным источником излучения.

2. Исследован экспериментальный образец волоконно-оптического датчика, способного с точностью до 5 контролировать параметры геотехнического состояния горной выработки.

3. Разработана волоконно-оптическая квазираспределённая система контроля и аппаратно-программный комплекс для идентификации механических воздействий путем сравнения изменений дифракционного пятна моды света на матрице фотоприемника.

**Теоретическая и практическая значимость работы** состоит в получении новых результатов, решающих важную прикладную задачу по созданию метода контроля геотехнического состояния горных выработок на основе распределенных систем с волоконно-оптическими сенсорами и аппаратно-программного комплекса для обеспечения безопасности горного производства шахт Карагандинского угольного бассейна. Предложенный метод имеет ряд существенных преимуществ по эффективности измерения в сравнении с традиционными электронными измерительными системами, особенно в условиях повышенной искро- и взрывоопасности на производствах. Разработанная система и аппаратно-программный комплекс вошли в состав измерительного комплекса для проведения контроля идентификации механических воздействий на горную выработку рудника «Нұрқазған» филиала ТОО "Корпорация Казахмыс" ПО «Карагандацветмет», в дальнейшем планируется внедрить на шахте им. Костенко УД АО «Арселор Миттал Темиртау» (Приложение Б). Разработана принципиально новая система непрерывного мониторинга, отвечающая требованиям безопасности.

Теоретическая значимость исследования состоит в том, что материалы и обобщения, содержащиеся в диссертации, позволяют создать систему для проведения инженерных расчетов.

**Методология и методы исследования.** При выполнении исследований применялись следующие методы:

- визуализация трехмерного моделирования механического напряжения в программном пакете ANSYS;
- обработка результатов экспериментов при помощи компьютерной программы математического моделирования Wolframalpha;
- статистический анализ экспериментальных данных;
- имитационное моделирование;
- методы планирования эксперимента по оценке технического уровня и прогнозирование перспективных показателей;
- основные теоретические положения оптики, аналитической геометрии.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Математические выражения, устанавливающие прямо пропорциональные зависимости изменения дополнительных потерь световой энергии в чувствительных элементах волоконно-оптических датчиков в зависимости от параметров внешних воздействий на рабочий материал.

2. Методика определения смещения горного массива, основанная на численной оценке изменения параметров оптической волны, проходящей через оптическое волокно.

3. Программно-аппаратный комплекс для идентификации геотехнического состояния горных выработок путем сравнения изменений дифракционного пятна основной световой моды на матрице фотоприемника и обработки сигналов от сенсоров с учетом температурной корректировки.

**Достоверность полученных результатов** подтверждена результатами выполненных теоретических и экспериментальных исследований конструкции датчика; достаточным объемом лабораторных и стендовых испытаний; корректным проведением экспериментальных исследований с использованием



поверенных установок в сертифицированной лаборатории; корректной постановкой цели и задачи исследования; хорошей сходимостью теоретических и экспериментальных результатов.

**Апробация результатов.** Материалы, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались:

- на Международной научно-практической конференции, Караганда, 2017;
- IV Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле **SibTest**, Новосибирск, 2017;
- Международной научно-практической конференции, Караганда, 2018, 2019;
- V Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле **SibTest**, Екатеринбург, 2019;
- заседании технологической службы шахты им. Костенко УД АО «Арселор Миттал Темиртау»;
- заседании геофизической службы Угольного департамента АО «Арселор Миттал Темиртау»;
- заседании геотехнической службы рудника «Нұрқазған» филиала ТОО "Корпорация Казахмыс" ПО «Карагандацветмет».

**Внедрение результатов.** Разработанный в диссертационной работе датчик и аппаратно-программный комплекс вошли в состав измерительного комплекса для проведения контроля идентификации механических воздействий на руднике «Нұрқазған» филиала ТОО "Корпорация Казахмыс" ПО «Карагандацветмет». Внедрение на шахте им. Костенко Карагандинского угольного бассейна запланировано на 4 квартал 2021 г.

**Личный вклад автора** состоит в личном участии на всех этапах работы, в проведении анализа достижений по теме научной работы, проведении экспериментов с предварительной подготовкой образцов, последующей обработкой результатов и обобщением результатов, представленных в диссертации, написании научных статей.

**Публикации.** Результаты исследований приведены в 20 научных работах, в том числе 4 - в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ «Вестник ЮУрГУ», «Известия высших учебных заведений. Физика», «Омский научный вестник», «Вестник ТОГУ»); 3 статьи в журналах, индексируемых в международных базах данных WoS, Scopus; 1 статья базы КоКСОН РК; получены 5 патентов на изобретения РК, 6 СИС. Результаты опубликованы в 15 сборниках материалов конференций, в том числе 7 - в изданиях, индексируемых в международных базах данных WoS, Scopus, 1 монографии.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложена на 149 страницах машинописного текста, содержит 59 рисунков и 11 таблиц, список цитируемой литературы представлен 75 наименованиями. Имеются 2 приложения.

## ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оптоволоконная технология внедряется в горнодобывающую промышленность для обнаружения деформации с 2006 г. [1]. Мировыми производителями ВОД являются компании Siemens, ABB, Rocrest, Weterford, BackerHughes, Halliburton, Schlumberger и российские предприятия «Омега», «Оптолинк», «Интел-Системы».

Проанализировав мировой опыт развития направления ВОД в странах западной Европы и США, а также разработки ученых России, работающих в направлении развития волоконно-оптических датчиков, таких как В. Д. Бурков, В. И. Бусурин, М. М. Бутусов, В. М. Гречишников, В. Г. Жилин, Е. А. Зак, Н. Е. Конюхов, Я. В. Малков, Т. И. Мурашкина, А. Л. Патлах, В. Т. Потапов, Н. П. Удалов и др. можно сказать, что их работы направлены на совершенствование и создание различных волоконно-оптических систем контроля, мониторинга и измерений [2–7]. Вопросы по изготовлению оптического волокна рассматривались в источниках [8–10]. Проводятся научные работы в направлении использования ВОД для создания внутренних волоконно-оптических сетей сбора информации в условиях повышенной искро- и взрывоопасности. Особенно много работ посвящено использованию оптоволоконных датчиков в оборонной, авиакосмической, авиационной, транспортной, нефтегазовой сферах, а также в строительстве и медицине, как перспективных средств мониторинга, измерения и контроля параметров, при этом спрос на данные датчики ежегодно растет [11–15].

Создание системы, обеспечивающей безопасность, основанной на применении оптического волокна, позволит отказаться от использования аппаратуры, измеряющей технологические параметры, и осуществить переход к использованию волоконно-оптических сенсоров.

Шахты должны быть оборудованы комплексом систем и средств, обеспечивающих решение задач организации и осуществления безопасного производства и информационной поддержки контроля и управления технологическими и производственными процессами в нормальных и аварийных условиях [16–20]. Одним из вариантов решений этой проблемы является использование волоконно-оптических датчиков и технологий. С середины 70-х годов прошлого века эта технология используется в различных отраслях промышленности, но в основном используется для передачи информации в системах телекоммуникации.

Рудничная атмосфера, параметры массива угля и горной выработки, средства безопасности являются объектами контроля.

Применение волоконно-оптических технологий в условиях предприятий угольной промышленности обоснованно, так как оптоволоконные датчики наиболее чувствительны, без влияния электромагнитного поля, взрывобезопасны, обладают коррозионной стойкостью.

Волоконно-оптические датчики находят применение во всем мире в различных отраслях промышленности. Например, волоконно-оптическое зондирование использовалось для измерения электрического тока (Werthen, et al., 1996), для мониторинга зданий и сооружений (Jackson, 1995), для обнаружения утечки жидкости (Vogel et al., 2001), (Hurtig, et al., 1994) в биомедицине (Passia, et al., 2002), а также в зданиях и сооружениях (Hurtig and Grobwig, 1998). Оптоволоконная технология также была внедрена в горнодобывающей промышленности для обнаружения деформации (Naruse, et al., 2007), обнаружения подземных газов, таких как метан (Li, et al., 2005 и 2006), и мониторинга подземной среды (Sen and Datta, 1991) [21–26].

Волоконно-оптическая система выявления опасности на угольных шахтах предназначена для получения всей важной информации о состоянии атмосферы горных выработок в режиме реального времени. Подобные системы способны проводить измерения газа метана, контроль смещения кровли, давления воды.

Швейцарская компания SenseAir была основана Хансом Мартином в 2000 году, является мировым лидером в области производства сенсоров газа CO<sub>2</sub>. Компания начала разработку нового типа сенсора метанового газа, где датчики будут использоваться для повышения безопасности рабочих. Взрыв метанового газа - одна из опасностей, связанных с добычей угля. Метан, так называемый «огнеопасный газ», может накапливаться в шахтах и приводить к катастрофическим взрывам с концентрацией около 10%. Технология SenseAir, основанная на запатентованной ИК-спектроскопии, превосходит конкурирующие продукты с точки зрения меньших требований к калибровке, более высокой точности и лучшего качества [27].

В 2010 году была создана исследовательская группа в сотрудничестве с отделом горного машиностроения и лабораторией квантовой оптики в Университете Квинсленда (Австралия) и CRC Mining для разработки волоконно-оптических датчиков для горных работ. В сферу исследований входило исследование возможных применений в горнодобывающей промышленности существующей технологии волоконно-оптических датчиков в различных областях добычи полезных ископаемых, таких как вентиляция, мониторинг скважины, охрана здоровья и безопасность, геотехнический мониторинг и мониторинг состояния. Также были проведены исследования по разработке новых волоконно-оптических датчиков в области газового зондирования. Исследовательский проект был направлен на экспериментальное исследование пригодности системы распределенного измерения температуры (DTS) на основе оптоволоконной технологии для мониторинга подземных горных работ. Данная система является экономичным решением в тех ситуациях, когда требуется большое количество точек измерения.

Одновременно с этим австралийскими учеными были предприняты попытки разработать и испытать системы зондирования метана на основе волоконно-оптических систем на подземных угольных шахтах с использованием одиночных головок датчиков газа с открытым контуром. Цель этого проекта состояла в том, чтобы экспериментально исследовать работу последовательной многоточечной

волоконно-оптической сенсорной системы с использованием газовых ячеек с открытыми траекториями для измерения концентрации метанового газа. Потенциальные преимущества использования многоточечной волоконно-оптической сенсорной системы состоят в том, что измерения могут быть выполнены из разных мест с использованием одного лазера и одной волоконно-оптической линии [28].

Уголь как первичный источник энергии в Китае в настоящее время обеспечивает более 70% всей энергии. Самая глубокая шахта достигает 1400 м ниже уровня земли, что делает ситуацию с безопасностью на шахтах очень серьезной. Взрывы и аварии на шахтах в Китае ежегодно приводят к тысячам жертв. Обычная система мониторинга метана контролирует только его концентрацию, поэтому она не может предупредить об опасности. Китайскими учеными Т. Ли, Ч. Ванг, Ю. Чао и Ю. Нинг была разработана комплексная система обнаружения опасностей, состоящая из датчиков метана, датчиков давления, температурных датчиков, установленных в подземной горной выработке. Также была разработана интегрированная система слияния данных, обеспечивающая самодиагностику состояния датчика и статистический анализ, визуальную, звуковую и мобильную текстовую информацию. Экспериментальные исследования были весьма успешны, после чего авторы приступили к разработке методики для определения сейсмической энергии.

Распределенный оптоволоконный датчик – изобретение японских ученых: Ли Чэ-Сиэнь, Кисида Кинзо, Нисигути Кенити, Гузик Артур, Макита Ацуси, Ямаути Йосиаки. Данные датчики основаны на использовании оптического волокна и достаточно точно измеряют температуру и деформацию, а также на брэгговских решетках, с возможностью увеличения количества датчиков.

Направления исследований Свадеш Чауля и Г.М. Прасад, ученых в Центральном научно-исследовательском институте горного дела и топлива (Дханбад, Индия) включают проектирование и разработку систем мониторинга, управления и автоматизации для шахт и опасных зон; геотехнические и экологические исследования; применение технологий беспроводной связи в

подземных шахтах. Проекты данных ученых включали систему отслеживания и мониторинга для управления бедствиями, разработку модели оценки осуществимости подземной газификации угля и систему контроля за незаконной добычей и транспортировкой угля. В настоящее время они работают в сфере создания беспроводных датчиков, проектах мониторинга окружающей среды и надзора, спонсируемых правительством Индии. Совместно ученые выпустили книгу «Технология мониторинга шахт и опасных зон». В этой книге они представили основы горно-геотехнического риска и последние достижения в области зондирования и передачи данных для предотвращения аварий и их предупреждения. Книга охватывает широкий спектр последних разработок и технологий для использования в горнодобывающей промышленности и в других опасных зонах. В ней предоставлены детали различных систем зондирования и мониторинга, а также схемы соединений. Показаны последние результаты и технологии для предотвращения несчастных случаев на шахтах и снижения риска, инновационных идей и новых концепций технологий зондирования [29].

Ричард Моффат из Чилийского университета, совместно с коллегами, написал статью, в которой были представлены три различных применения горного производства для структурного мониторинга с использованием оптического волокна. Сделаны следующие выводы относительно возможности и эффективности этих приложений мониторинга:

- инструментальная трубка из ПВХ с использованием оптического волокна показывает, что можно измерять деформации вдоль трубки, вызванные относительными смещениями ее опорных точек. Лабораторные тесты и теоретический анализ это подтверждают;

- полевые испытания в глубине шахтного туннеля показывают, что можно обнаружить смещения, которые вызывают деформацию вдоль трубчатого датчика;

- трубчатые датчики легко устанавливаются и внедряются внутри скальных туннелей;

- полевые испытания показывают, что можно обнаружить деформации, которые происходят в скале, используя среднее значение частоты, кроме того, они

могут быть сопоставлены со средними деформациями, полученными с использованием оптического волокна.

Компания «Инверсия-Сенсор» - одна из лидирующих по изготовлению волоконно-оптических датчиков и технологий [30], которой удалось осуществить установку измерительного оборудования на ГЭС-1, а именно в деривационном туннеле ГЭС-1, который по условиям можно сопоставить с туннелями в шахтах, представленный на рисунке 1.1. Электрические датчики способны фиксировать информацию на расстоянии, не превышающем 1 км [31]. На ГЭС-1 были установлены оптоволоконные датчики, фиксирующие показатели температуры, перемещения, давления.



Рисунок 1.1 – Туннель на ГЭС-1

Температурная компенсация датчиков давления и линейных перемещений производится программными методами с помощью встроенных датчиков температуры.

Как говорилось выше, основной опасностью при ведении горных работ является возможность возникновения аварий, влекущих за собой угрозу жизни людей, большие материальные потери и остановку производственного процесса.



Решение этих проблем зависит от оперативности и точности осуществления контроля и ранней диагностики ключевых параметров.

Московская компания «ОМЕГА» занимается производством систем мониторинга протяженных объектов (СМПО). Действие СМПО было представлено одной из крупнейших нефтегазовых компаний мира - концерна Shell. На этом пути отмечен ряд важных для безопасности объектов достижений. Способность пущенного лазером пучка света чутко реагировать на изменения в вибрационном и температурном поле произвела настоящий переворот в науке и технике, который определил колоссальный рывок в деле охраны практически чего угодно: от техногенного и антропогенного воздействия [32].

Представителями Кузбасского государственного технического университета Гуменным А. С., Дырдиным В. В., Яниной Т. И. было разработано устройство для контроля идентификации состояния горной выработки. «Изобретение относится к горному делу, в частности к устройствам для непрерывного контроля напряженного состояния и степени удароопасности краевых зон массива горных пород в подземных выработках. Техническим результатом является повышение точности, оперативности и надежности работы устройства. Устройство непрерывного контроля напряженного состояния массива горных пород содержит источник светового сигнала, оптические датчики напряжений, волоконно-оптические кабели и блок индикации, регистрации и сигнализации. При этом в качестве источника светового сигнала использован источник монохроматического излучения. Дополнительно введены две собирающие линзы, установленные на участке измерения, оптический детектор и контролирующий компьютер, расположенные на дневной поверхности. Причем источник светового сигнала через волоконно-оптический кабель и первую собирающую линзу соединен с оптическим датчиком напряжений, который связан с оптическим детектором через волоконно-оптический кабель и вторую собирающую линзу. А оптический детектор соединен с контролирующим компьютером, выход которого соединен с блоком индикации, регистрации и сигнализации» [33].

Волоконно-оптические линии передачи информации, являющиеся достижением конца XX века, благодаря своей пропускной способности нашли применение в информационно-измерительных системах (ИИС) [16-17]. При этом оптическое волокно (ОВ) может быть использовано в качестве датчиков при построении ИИС для измерения электрических и неэлектрических величин [18-19].

Помимо высоких метрологических характеристик датчики должны обладать высокой надёжностью, долговечностью, стабильностью и быть совместимыми с микроэлектронными устройствами обработки информации при низкой трудоёмкости изготовления и небольшой стоимости [20, 34]. Данным требованиям в максимальной степени удовлетворяют современные волоконно-оптические датчики [34–36]. Отличительной особенностью ИИС с использованием ВОД является то, что в качестве датчика используется оптическое волокно, источник оптического излучения и светоприемное устройство. Вместо контрольного кабеля с электрическими сигналами используется световод, по которому передается свет. Световод одновременно является измерительным органом и транспортной магистралью для передачи информации к устройствам контроля и сравнения данных. Данное обстоятельство весьма важно для использования в подземных горных выработках, опасных по внезапному выбросу газа и пыли.

Обзор предшествующих научных исследований, проведенных в мире, относящихся к исследуемой теме, выявил, что среди большого количества работ, наиболее близки работы авторов: Paolo Mazzanti, M.J. Little, Ashkan Vaziri, Kavvadas M., Adam Chrzanowski, P. Farina, Brian Klappstein. Из постсоветских ученых данной проблематикой занимаются: Д.Ш. Ахмедов, А.И. Косолапов, А.В. Токаренко, Е.А. Несмашный, А.В. Болотников и др.

Системы ГЛОНАСС или GPS не имеют возможности функционировать в пространствах горных выработок шахт и рудников. Есть аналоги Европы, США, Азии и России, которые на анализе уровня принимаемого сигнала от стационарных точек доступа беспроводной сети используют технологии радиопередатчик WiFi, ZigBee или Bluetooth, которые не обеспечивают точность позиционирования и не способны выполнять измерения.

Несмотря на хорошие темпы развития данного направления, существует еще ряд проблем, требующих своего решения. Современные методы, используемые в шахтах, позволяют осуществлять контроль с определенными ограничениями из-за ряда различных причин: дорогостоящие исследования, устаревшие измерительные системы, непредвиденные инциденты. Создание многофункциональной системы безопасности с использованием оптоволоконных технологий позволяет решить существующие проблемы.

Шахта представляет собой объект повышенной опасности, в котором велика вероятность возникновения различных подземных аварий:

- взрывы метана ( $\text{CH}_4$ ) или пылевоздушной смеси;
- рудничные пожары (эндогенные, экзогенные);
- внезапные выбросы породы и газа;
- затопление;
- обрушение и завалы.

Разработанные компанией системы позволяют успешно решать задачи мониторинга потенциально опасных зон в шахтах:

- мониторинг состояния горных выработок (контроль состояния кровли, почвы и стенок выработок, междупластья);
- мониторинг напряженно-деформированного состояния металлических конструкций шахтных стволов;
- обнаружение самовозгорания (в угольных шахтах).

Шахты Карагандинского угольного бассейна относятся к сверхкатегорийным по взрыву газа и пыли, где периодически случаются катастрофы, повлекшие гибель работников. Сложилась необходимость в разработке системы контроля идентификации геотехнического состояния, с возможностью контроля необходимых параметров в режиме реального времени.

К сожалению, собственных разработок в Республике Казахстан нет, разработки ограничены только теоретическими исследованиями и предварительными работами по созданию лабораторных образцов. Направление диссертационной работы сводится к разработке ИИС для мониторинга

технического состояния объектов горного производства на основе оптического волокна.

## **1.1. ГОРНОЕ ДАВЛЕНИЕ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ**

Горное давление — это механическое воздействие, которое окружающие породы оказывают на крепь шахты из-за их деформации.

Форма и размер шахты или карьера, глубина выработки, тип горной крепи, глубина залегания пород — это те факторы, от которых зависят параметры горного давления.

По сравнению с туннелями, используемыми в гражданском строительстве, вход в горную выработку, обслуживающую всю панель лавы, имеет гораздо более короткий срок службы. Тем не менее, именно горные выработки подвергаются динамическим изменениям напряжения, вызванным прогрессивными действиями. Эти динамические изменения напряжения, также называемые напряжением опоры, могут быть в четыре-пять раз выше, чем напряжения на месте в вертикальном направлении. В период добычи необходимо отслеживать такие параметры, как смещение и напряжение горного массива. Традиционные методы мониторинга, которые основаны на ручных измерениях, не могут достичь этой цели. Электронные датчики успешно применяются в туннелях, но их применение в суровых условиях подземных горных работ ставится под сомнение, поскольку они подвержены помехам от электромагнитных сигналов и влиянию высоких температур и влажности в подземной среде.

Многие исследования отечественных и зарубежных ученых рассматривают вопросы горного давления [37–41]. Наиболее известными являются гипотезы горного давления профессоров М. М. Протодяконова и П. М. Цимбаревича [42].

По гипотезе профессора М. М. Протодяконова свод горной выработки представлен параболой (свод естественного равновесия), на которую оказывает давление находящаяся внутри горная масса, что он и доказал экспериментально (рисунок 1.2).

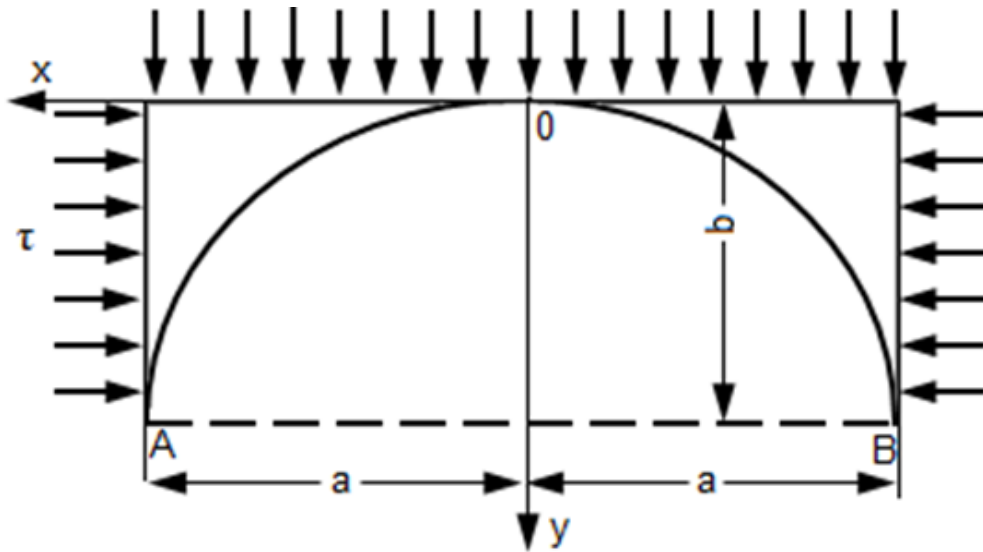


Рисунок 1.2 – Свод горной выработки по М.М. Протодяконову

Профессор М.М. Протодяконов разделял давление на период первичного (прилегающих пород к выработке) и вторичного горного давления (породы, заключенные внутри свода).

Высоту свода естественного равновесия [42] можно вычислить:

$$b = \frac{a}{f}, \text{ м}, \quad (1.1)$$

где  $a$  — полупролет свода, м;

$f$  — коэффициент крепости пород кровли по классификации проф. М. М. Протодяконова.

Площадь параболического свода (рисунок 1.2):

$$S = \frac{4}{3}ab, \text{ м}^2. \quad (1.2)$$

Величина установившегося горного давления на горизонтальной выработке 1 м:

$$P = \frac{4}{3}aby, \text{ тс/м}, \quad (1.3)$$

где  $y$  - объемный вес пород свода, тс/м<sup>3</sup>.

При работе выработки менее года, величина горного давления составит:

$$P = \frac{4}{3}\gamma \frac{a^2}{f}, \text{ тс/м}. \quad (1.4)$$

При увеличении срока службы выработки, высоту свода следует увеличить вдвое, исходя из (1.4).

Давление в зависимости от крепости породы представлено в таблице 1.1.

Таблица 1.1

№	Коэффициент крепости пород кровли, МПа	Направление давления
1	Более 6	Со стороны кровли, боковым можно пренебречь
2	Менее 5	Со стороны кровли и боковое давление в выработке

Согласно гипотезе М.П. Цимбаревича: «Величину бокового давления рекомендуется определить как активное давление на подпорную стенку сползающих призм  $m$ , нагруженных сверху породой в объеме параболических элементов  $n$  (рисунок 1.3)».

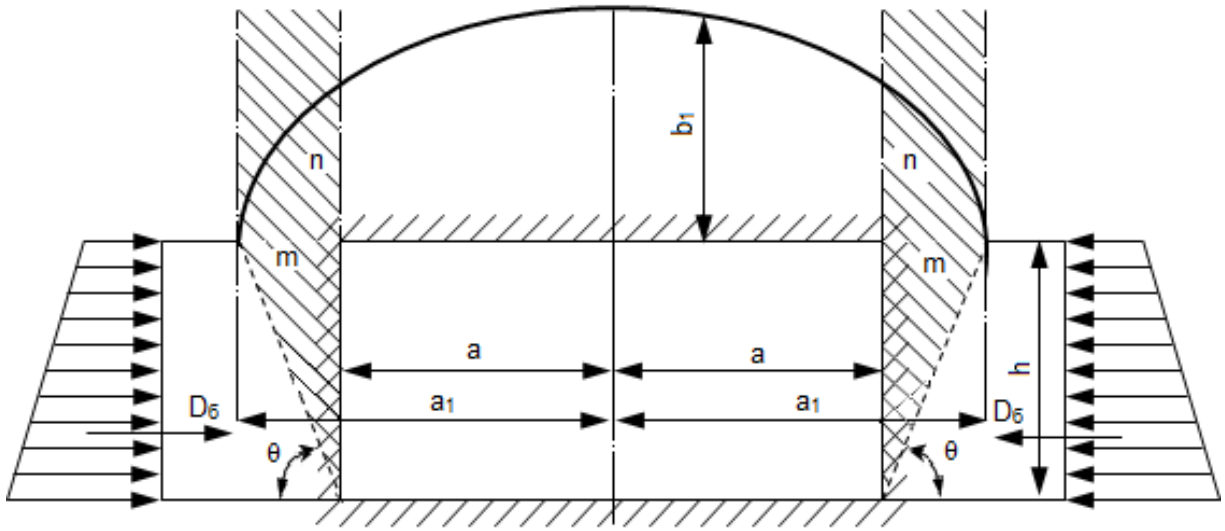


Рисунок 1.3 – Свод горной выработки по П. М. Цимбаревичу

Высота призм сползания  $m$  равна высоте выработки  $h$ , а угол сползания определяется по формуле:

$$\theta = \frac{90^\circ + \varphi_6}{2}, \quad (1.5)$$

где  $\varphi_6$  — угол внутреннего трения боковых пород.

При этом боковое давление:

$$D_6 = \frac{h\gamma_6}{2} (2b_1 + h) \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi_6}{2}, \text{ тс/м.} \quad (1.6)$$

Давление со стороны кровли:

$$P_k = 2\gamma_k a b_1, \text{ тс/м.} \quad (1.7)$$

Величина горного давления зависит от угла наклона самой выработки. При этом давление можно разложить на две составляющие силы:  $N$  — перпендикулярную оси выработки и  $T$  — параллельную ее оси. Обозначив угол наклона выработки через  $\alpha$ , определим значения  $N$  и  $T$ :

$$N = P \cos \alpha, T = P \sin \alpha, \text{ тс/м.} \quad (1.8)$$

Крепь наклонных выработок устанавливают перпендикулярно продольной ее оси. Поэтому за расчетное давление необходимо принимать нормальную составляющую  $N$ . Тангенциальная составляющая  $T$  также оказывает влияние на крепь, стремясь опрокинуть крепежные рамы. Чтобы этого не произошло, рамы в наклонных выработках устанавливают с небольшим наклоном ( $3^\circ$ - $5^\circ$ ) в сторону восстания и между замками крепежных рам устанавливают распорки. Величину давления на крепь для выработок с углом наклона от  $0^\circ$  до  $45^\circ$  определяют по формуле:

$$P_n = \frac{4}{3} \gamma \frac{a^2}{f} \cos \alpha, \text{ тс/м.} \quad (1.9)$$

При наклоне выработки от  $45^\circ$  до  $75^\circ$  при расчете принимают угол  $45^\circ$  и  $N = P \cos 45^\circ = 0,7P$ , считая  $N$  условно не зависящим от  $\alpha$ . При угле наклона выработки более  $75^\circ$  величину горного давления следует определять как давление на крепь вертикальной выработки.

Боковые давления на крепь у кровли и почвы выработки составят:

$$P_k = \gamma \frac{b_1}{\cos \alpha} \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2}, \text{ тс/м,} \quad (1.10)$$

$$P_n = \gamma \frac{b_1 + h}{\cos \alpha} \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2}, \text{ тс/м.}$$

Суммарное боковое давление определяем по формуле:

$$P_6 = \frac{\gamma h}{2 \cos \alpha} (2b_1 + h) \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2}, \text{ тс/м,}$$

где  $h$  — высота выработки, м.



## **1.2 МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ**

Горное производство является одним из самых трудоемких, сложных и опасных видов промышленного производства. В связи с этим, программно-информационные аналитические комплексы имеют довольно широкий диапазон применения, начиная с проведения горно-геологических анализов, оптимизации параметров горнотранспортных работ до автоматизированных систем геомониторинга. Одним из объектов исследований в горном деле является породный массив с капитальными, подготовительными и очистными выработками.

Широкое применение приборов на основе акустических и электромагнитных колебаний для мониторинга геотехнического состояния горной выработки ограничивается необходимостью учитывать геологические условия, при которых ведется добыча.

В данный период не существует нормативных документов, в которых были бы регламентированы нормативы о применении средств измерений, применяемых на предприятиях горного производства. Многие методы контроля идентификации геотехнического состояния в горных выработках основаны на бурении скважин и других методах геоконтроля [43], которые составляют геологические, геомеханические и геофизические группы [44]. Классификация данных групп представлена в таблице 1.2 на основе [44–49].

Таблица 1.2 – Методы контроля идентификации геотехнического состояния

Геологические методы	Геомеханические методы	Геофизические методы
Анализ геологических и геотектонических особенностей массива	Метод полной разгрузки керна	Ультразвуковой метод
	Метод частичной разгрузки	Электрометрические методы
	Метод частичной разгрузки на большой базе	
	Метод щелевой разгрузки	Методы, основанные на использовании эффектов памяти в горных породах и помещаемых в массив композиционных материалах
Оценка НДС на основе визуального осмотра горных выработок	Метод параллельных скважин	
	Метод разности давлений	
Оценка НДС массива по дискованию керна	Метод упругих включений	Звукометрические методы
	Метод гидроразрыва	Методы, основанные на приеме и анализе интенсивности электромагнитной эмиссии горных пород
	Метод компенсационной нагрузки	
	Метод буровых скважин	Гамма-метод
	Метод плоских домкратов	

## 1.3 ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО. ХАРАКТЕРИСТИКА. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

### 1.3.1 Оптическое волокно. Характеристика

Оптическое волокно – это тонкие стеклянные пряди (менее 1 мм в диаметре), способные передавать цифровую информацию в форме светового импульса. Такая передача возможна благодаря тому, что свет, входящий в стеклянное оптоволокно, проводится посредством отражения от одного конца волокна к другому без потери энергии. Изображения могут быть увеличены, искажены или зашифрованы.

ОВ состоит из внутренней сердцевины и окружающей ее оболочки (рисунок 1.4).

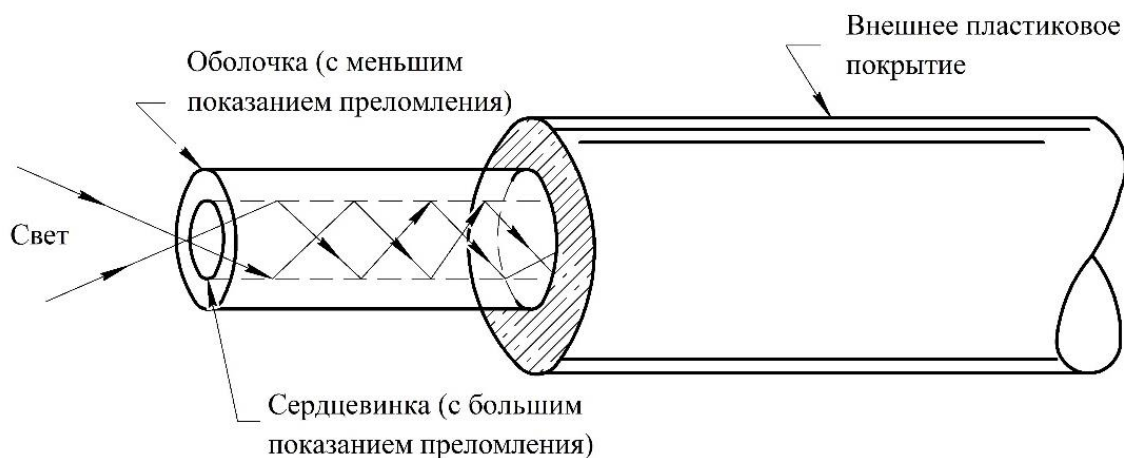


Рисунок 1.4 – Строение ОВ

Сердцевина волокна представляет собой стекло или пластик, в состав которого входит сверхчистый диоксид кремния или плавленого кварца с примесями, обеспечивающими необходимый показатель преломления. Световое излучение передается по оптическому волокну.

Покрытие волокна гарантирует, что свет отражается обратно в сердцевину волокна, а световые волны распространяются только вдоль сердцевины волокна, то есть световое излучение направляется вдоль сердцевины волокна. Защитная оболочка изготавливается из пластика толщиной 250-900 мкм, обеспечивает амортизацию и защиту от окружающей среды.

Оптическое волокно 50/125/250 обозначает, что волокно имеет диаметр сердцевины - 50 мкм, диаметр оболочки - 125 мкм и диаметр защитной оболочки - 250 мкм.

Классификация ОВ представлена на рисунке 1.5.

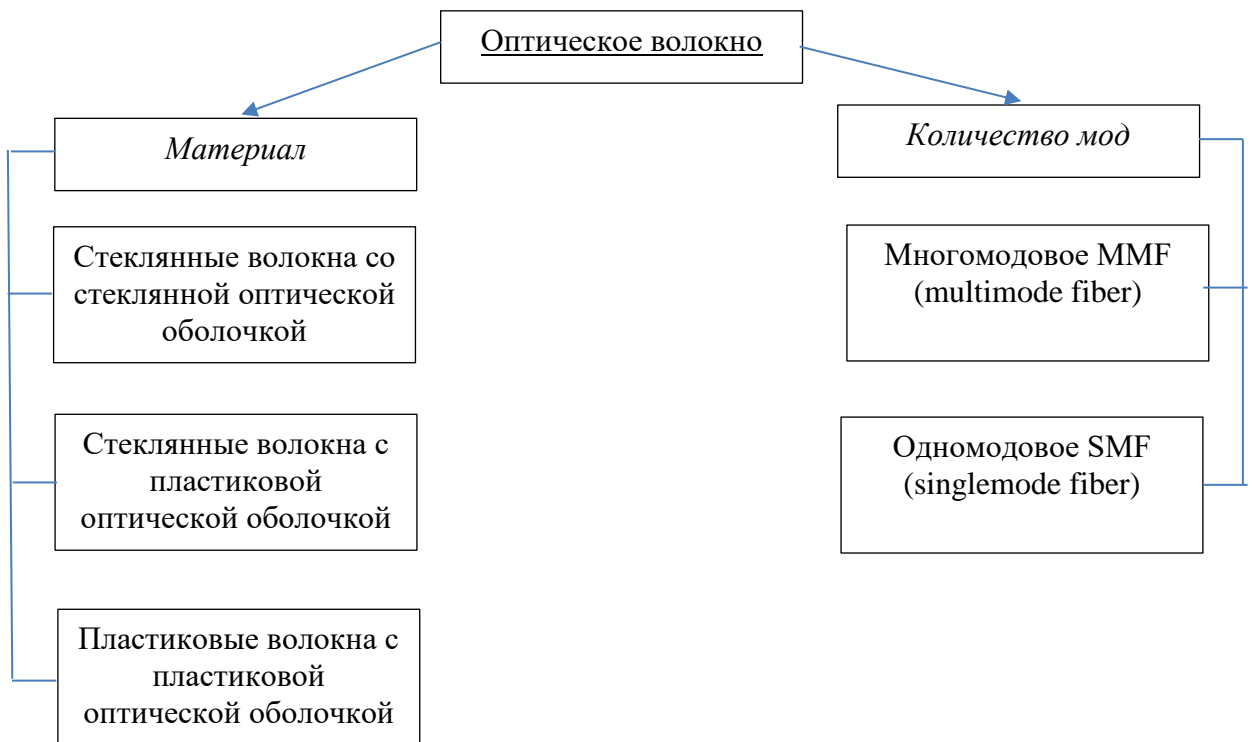


Рисунок 1.5 – Классификация ОВ

Мода оптического волокна – это математическое и физическое понятие, связанное с процессом распространения электромагнитных волн в среде. Мода – это вид траектории, вдоль которой может распространяться свет (рисунок 1.6). Количество мод может составлять от 1 до 100 000.

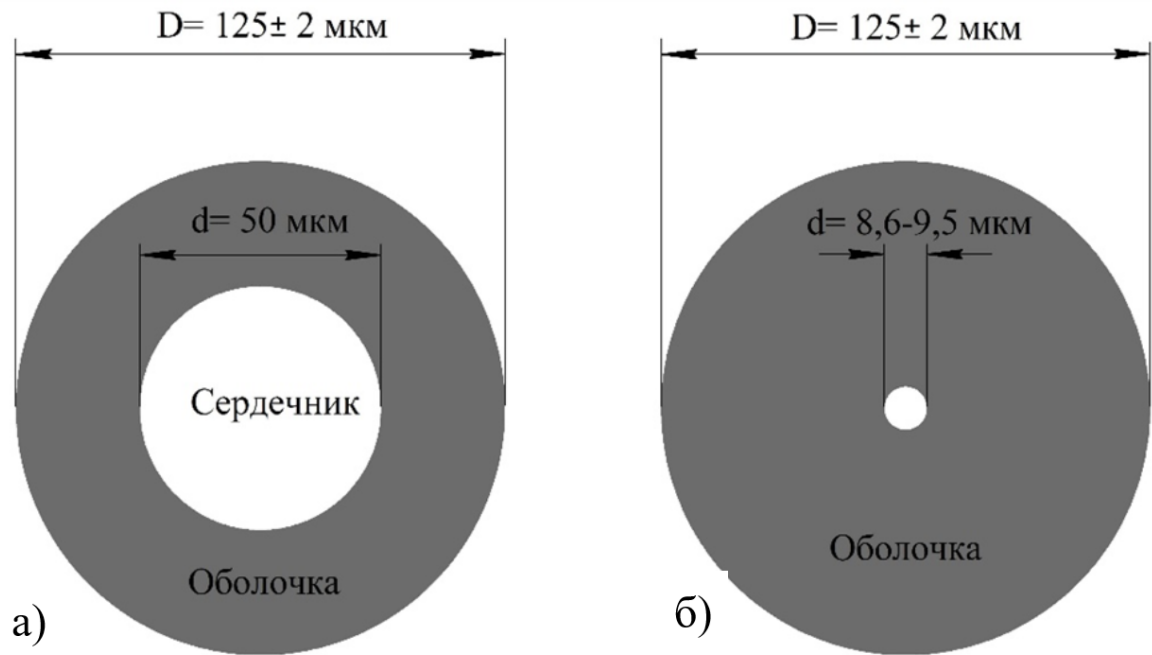


Рисунок 1.6 - Multimode fiber (а) и singlemode fiber (б)

Многомодовые волокна могут обладать ступенчатым или градиентным профилем показателя преломления, профили представлены в таблице 1.3.

Основные типы одномодовых волокон, применяемых в линиях связи, нормируются международными стандартами ITU-T Rec. G. 652...G. 655.

Основные параметры, влияющие на распространение света в ОВ, представлены в таблице 1.4 [50].

Таблица 1.3 – Профили ОВ





№	Графическое представление	Профиль показателя преломления	ОВ
1		ступенчатый	многомодовое и стандартное одномодовое волокно
2		градиентный	многомодовое волокно
3		треугольный	одномодовое волокно со смещённой дисперсией
4		треугольный	волокно с ненулевой смещённой дисперсией

Таблица 1.4 – Основные параметры ОВ

№	Параметр ОВ	Формула расчета	Примечание
1	Относительная разность показателей преломления	$\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2$	Если показатель преломления оболочки выбирается обычно постоянной величиной, то показатель преломления сердцевины в общем случае может зависеть от радиуса. В этом случае для проведения различных оценок параметров волокна вместо $n_1$ используют $n_{эфф}$ .
2	Дисперсия	$\Delta\sigma = \sqrt{\sigma_{out}^2 - \sigma_{in}^2}$	Зависимость скорости распространения и фазы электромагнитного излучения от длины волны этого излучения.
3	Затухание	$\alpha = \alpha_c + \alpha_k$ , где $\alpha_c$ – собственные потери, $\alpha_k$ – кабельные потери	Уменьшение мощности оптического излучения по мере распространения по оптическому волокну.
4	Числовая апертура	$NA = \sin \theta_A$ , где $\theta_A$ – апертурный угол ввода излучения из свободного	Волокно с большей апертурой будет принимать больше световой энергии от источника света, чем волокно с меньшей апертурой. Оптические

Продолжение таблицы 1.4

		пространства в волокно	волокна с большими апертурами или диаметрами принимают больше света, чем волокна с меньшими апертурами или диаметрами принимают больше света, чем волокна с меньшими апертурами или диаметрами. Волокна с большими апертурами и диаметрами больше подходят для недорогих передатчиков, таких, как светодиоды, которые не способны концентрировать выходную энергию в узкий когерентный пучок (как лазеры) и излучают под большим углом.
--	--	---------------------------	--

### 1.3.2 Применение ВОД

Волоконно-оптические датчики на основе решеток Брэгга нашли применение в строительной, геотехнической, аэрокосмической, энергетической, нефтегазовой промышленности (таблица 1.5). Подобные датчики активно применяются при работе с агрессивными средами, где датчики находятся в экстремальных условиях.



Таблица 1.5 – Применение ВОД в различных отраслях

Отрасль	Применение ВОД
Горнодобывающая отрасль	<ul style="list-style-type: none"> <li>• пожарное извещение в шахтах</li> <li>• мониторинг НДС шахтных стволов и горных выработок</li> <li>• распределенный термомониторинг конвейерных лент</li> </ul>
Нефтяная отрасль	<ul style="list-style-type: none"> <li>• термомониторинг скважин</li> </ul>
Газовая отрасль	<ul style="list-style-type: none"> <li>• оценка ресурса нагнетателя</li> <li>• интеллектуальные вставки</li> <li>• измерение НДС газопроводов</li> <li>• комплексный мониторинг КС</li> </ul>
Гидроэнергетика	<ul style="list-style-type: none"> <li>• мониторинг состояния деривационного тоннеля и шахты вертикального водосброса</li> <li>• распределенный мониторинг бассейна суточного регулирования</li> <li>• контроль пьезометрического уровня в грунтовых плотинах</li> <li>• комплексный мониторинг гидроагрегатов</li> </ul>
Электроэнергетика	<ul style="list-style-type: none"> <li>• распределенный мониторинг силового кабеля</li> <li>• распределенный мониторинг грозотроса</li> <li>• мониторинг вибрации и температуры генераторов</li> </ul>
Строительство и ЖКХ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• мониторинг элементов конструкции зданий (фундамент, несущие конструкции, балки и перекрытия)</li> <li>• мониторинг мостов, эстакад</li> <li>• мониторинг «умного дома»</li> <li>• мониторинг состояния теплотрасс</li> <li>• расходометрия</li> </ul>
Авиация и космос	<ul style="list-style-type: none"> <li>• внедрение чувствительных элементов в композиционные материалы (мониторинг деформации и температуры)</li> <li>• бортовая система мониторинга</li> </ul>

Волоконно-оптические системы применяются для передачи информации, а также в качестве локально распределенных измерительных датчиков. Влияние

таких параметров, как давление, температура, сила натяжения, при воздействии на ОВ изменяют его свойства.

Преимущества ВОД позволяют использовать их во взрывоопасных средах, учитывая их безопасность, долговременную стабильность и долговечность, компактность. Также существует особенность, состоящая в том, что информация, получаемая в процессе мультиизмерений, собирается и передается в единую информационную сеть посредством оптического излучения. ВОД имеют ряд существенных преимуществ по скорости измерений и нечувствительны по многим внешним воздействиям по отношению к любым проводным и эфирным системам, связанным с передачей информации, полученной при измерениях. При этом энергозатраты на ее передачу в десятки раз ниже. Оптическое волокно можно использовать как сенсор и как систему передачи информации на расстоянии в 100 и более километров.

Современные ВОД могут измерять практически любые параметры. Основные элементы представлены на рисунке 1.7

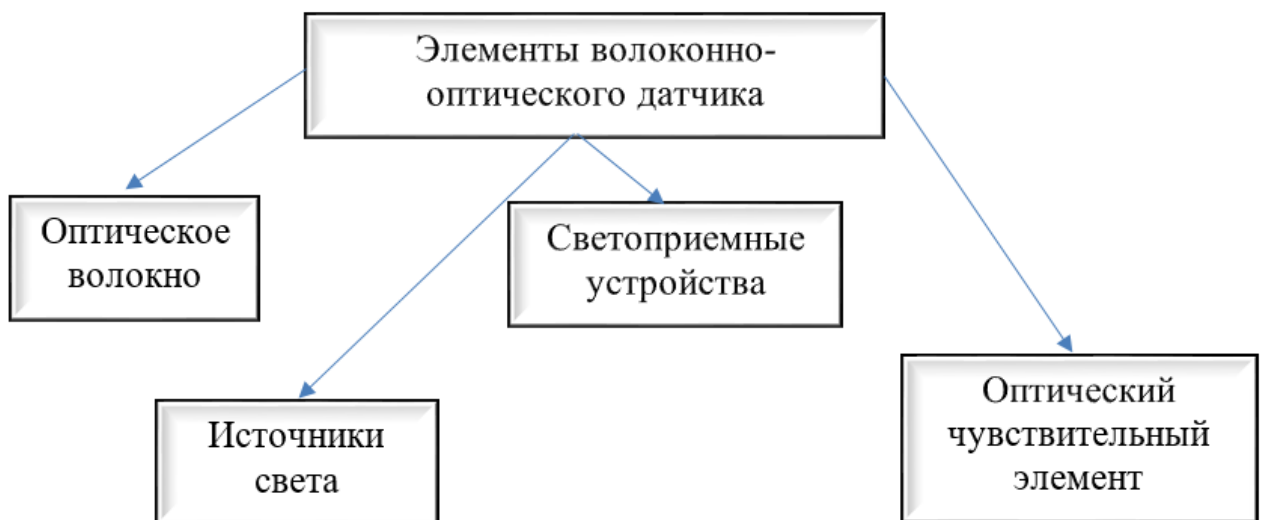


Рисунок 1.7 – Основные элементы ОВ

Самыми простыми считаются датчики, основанные на изменении интенсивности света. Особенно полезной особенностью оптоволоконных датчиков

является то, что они могут при необходимости передавать аудиосигналы на очень большие расстояния.

С точки зрения применения оптического волокна, ВОД разделяются на два типа: датчики, использующие чаще всего многомодовое ОВ, которое используется в качестве линии передачи сигнала, и датчики, использующие одномодовое ОВ, используемое как чувствительный элемент.

Основные структуры волоконно-оптических датчиков основаны на использовании следующих свойств (рисунок 1.8):

1) Изменение свойств волокна, подвергающегося механическому воздействию, основанное на эффектах Фарадея, Керра. Эти принципы используются для создания датчиков давления. Используется флуоресцентное оптоволокно.

2) Изменение параметров излучения, проходящего через оптическое волокно, основанное на принципе «физическая величина - свет». Чувствительным элементом является сам измеряемый объект.



Рисунок 1.8 - Типы ВОД

3) Изменение параметров датчика, подключенного к концу оптического волокна. Чувствительными элементами являются мембраны и другие гибкие элементы. Эти оптические датчики основаны на механическом принципе перемещения оптического элемента под действием внешних факторов.

## 1.4 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как следует из проведенного анализа литературных источников, подземные шахты являются одной из самых сложных и опасных сред для работы людей. Многообразие и сложность горнотехнических условий определяют необходимость применения новых научно обоснованных решений для проведения мониторинга состояния горных выработок.

В ходе анализа было выявлено, что волоконно-оптические системы возможно использовать для передачи информации и в качестве локальных распределённых измерительных датчиков, так как под воздействием температуры, давления и других параметров свойства световодов меняются.

Была сформулирована цель работы: разработка нового метода и оригинальных технических решений для контроля геотехнического состояния горных выработок с использованием распределенной системы волоконно-оптических сенсоров с аппаратно-программным комплексом, для повышения эффективности измерения и обеспечения безопасности ведения горных работ в условиях повышенной опасности по внезапному взрыву газа и пыли. Определен предмет исследования, которым является оптоволоконный датчик.

Значимость выбранного направления исследования подтверждается рядом противоречий, выявленных в результате теоретического анализа источников по теме исследования. Исследования проводятся в направлении создания датчиков, но они не объединены в единую систему.

Решение этой прикладной задачи заключается в проведении дополнительных исследований по данному направлению, а также создании аппаратно-программного комплекса, предназначенного для предупреждения о внезапных изменениях параметров, влияющих на прочность горной выработки. В этой связи исследование, направленное на повышение безопасности проведения работ в горных выработках, соответствует одному из приоритетных направлений развития науки любого государства - обеспечение безопасности труда.

Для решения данной задачи необходимо выполнить теоретические, экспериментальные и научные исследования, в том числе с применением компьютерной техники для проведения имитационного моделирования напряженно-деформированного состояния горной выработки, с планированием эксперимента и обработкой полученных данных.

## **ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1**

1. Произведен обзор существующих гипотез об измерении горного давления. Следует учитывать параметр крепости горной породы для определения направления давления в горной крепи. Давление горной породы может быть только со стороны кровли при коэффициенте крепости породы более 6, при коэффициенте менее 5 необходимо учитывать давление и со стороны боковых стенок.

2. Рассмотрены существующие методы контроля напряженного состояния горной выработки. Определены основные недостатки. Большинство методов

определения напряженно-деформированного состояния породных массивов в окрестностях подземных горных выработок связано с выполнением работ по бурению в геоматериале измерительных скважин.

3. Выполнен обзор характеристик оптического волокна и волоконно-оптических датчиков. Данные доказывают, что волоконно-оптические датчики - хорошие диэлектрики, не подверженные к влиянию электромагнитных помех. Данный факт позволяет использовать их на горных предприятиях, опасных по взрыву газа и пыли. Данные позволяют спланировать проведение дальнейших экспериментов.

4. Осуществлена постановка задач по исследованиям в области создания волоконно-оптической системы контроля идентификации геотехнического состояния.

## ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

### 2.1 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ ДАТЧИКОВ

Принцип измерения основан на контроле величины дополнительных потерь на рассеяние при механическом воздействии, измеряемое в дБ, а также различного рода рассеяния (Рэлеевское рассеяние), а также использования оптических эффектов Брегговских решеток или классической теории оптического интерферометра. При механическом воздействии на оптическое волокно изменяются показатели рассеяния энергии моды световой электромагнитной волны, проходящей по оптическому волокну. Поэтому использование оптических волокон для построения системы мониторинга - очень перспективное направление.

Теоретическая основа работы данного устройства известна и является суммой сложения двух световых волн  $E_1$  и  $E_2$ , что проявляется в изменении результирующей интенсивности  $I$ , которую регистрирует фотоприёмное устройство интерферометра [51].

Изменение фазы света, проходящего по ОВ при внешнем воздействии, представлено на рисунке 2.1.

Рассмотрим теоретические ИИС на основе ВОД. В первую очередь, нужно отметить, что основным показателем при механическом воздействии на ОВ является изменение свойств света, которое можно выразить  $I(t)$ , это уже достаточно изученный процесс, описанный в литературе. Во вторую очередь, нужно учесть, что при механическом воздействии возникает фотоупругий эффект, приводящий к изменению показателя преломления  $\Delta n$  между оболочкой и сердцевиной оптического волокна, что вызывает изменение фазы распространения

оптической моды  $\Delta\varphi$ . Выразим изменение вектора электромагнитной волны оптического диапазона  $E$  через связанные между собой параметры  $\Delta\varphi \sim \Delta n$ , которые в конечном итоге влияют на поляризацию световой волны, распространяющейся в кварцевом ОВ.

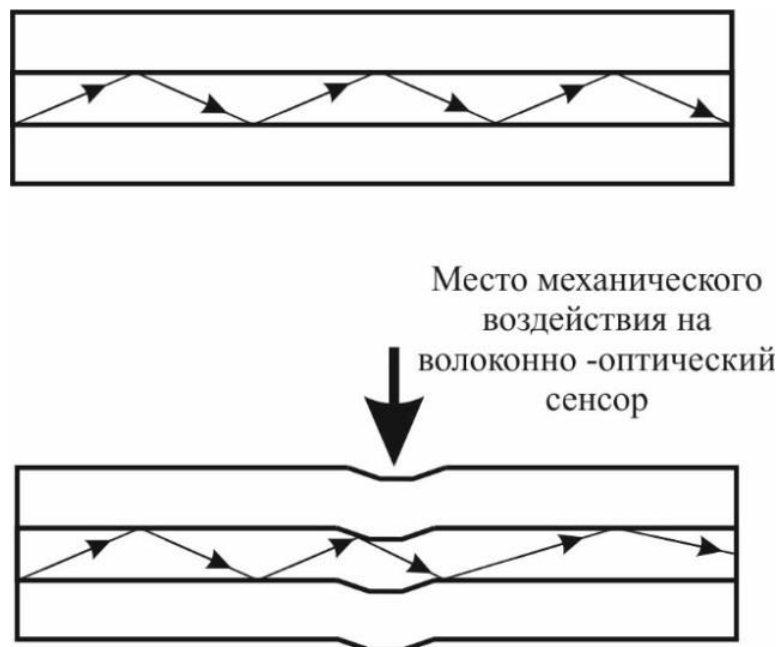


Рисунок 2.1 - Изменение свойств света, проходящего по ОВ

Если принять, что источник излучения когенерационный и генерирует непрерывное оптическое излучение определенной длины волны, то изменение интенсивности светового излучения на выходе из ОВ и падающего на поверхность фотоприёмного устройства можно зафиксировать и численно измерить. Соответственно, все изменения фазы распространения световой волны можно зафиксировать, а изменения фазы распространения прямо пропорционально связано с механическим воздействием на ОВ. Если представить вектор напряженности поля электромагнитной волны и ее интенсивности, то получится следующее выражение:

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

Используя известные теоретические сведения из [52], а также метод оптической интерферометрии, приходим к выражению, с помощью которого



можно выразить отношение напряженности электромагнитного поля двух когерентных волн, падающих на поверхность фотоприемника, который и фиксирует изменения векторов.

$$E_1 = E_{01} \cos(\omega t - \varphi_1), \quad (2.1)$$

$$E_2 = E_{02} \cos(\omega t - \varphi_2). \quad (2.2)$$

Получим сумму выражений (2.1) и (2.2), что является в итоге суммарным вектором:

$$E = E_0 \cos(\omega t - \varphi). \quad (2.3)$$

Выразим все с учетом изменения амплитуды волны, используя (2.1), (2.2) и (2.3):

$$E_0 = \sqrt{E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos(\Delta\varphi(t))}. \quad (2.4)$$

Фаза распространения оптического излучения или моды:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{E_{01} \sin \varphi_1 + E_{02} \sin \varphi_2}{E_{01} \cos \varphi_1 + E_{02} \cos \varphi_2}\right). \quad (2.5)$$

Примем условие, что разность фаз будет подчиняться закону  $\Delta\varphi = \Delta\varphi_H + \Delta\varphi(t)$ ,

где  $\Delta\varphi_H$  – начальное значение фазы;

$\Delta\varphi(t)$  – значение фазы, которое сформировалось под действием внешних механических нагрузок или деформации оптического волокна.

Можно сказать, что имеет место квазиначальная разность фаз. Установим значение максимальной интенсивности интерференции двух когерентных волн:  $\Delta\varphi(t) = \pm 2\pi n$ , где  $n \in \mathbb{Z}$  при  $\cos(\Delta\varphi) = 1$ , в итоге результирующая напряженность электромагнитного поля двух когерентных волн будет  $E_0 = E_{01} + E_{02}$ .

В процессе проведения натуральных экспериментов установлено, что использование классического оптического интерферометра Маха-Цандера, для построения ИИС на основе ВОД сопряжено с рядом существенных технических проблем. Данные проблемы отражены в работах других ученых, которые пытались использовать в чистом виде оптический интерферометр Маха-Цандера для создания ИИС на основе ВОД [52]. Основной проблемой является изменение показателя преломления  $\Delta n$  при изменении температуры ОВ, соответственно при изменении внешней температуры и изменяется температура и самого ОВ [52]. Так как имеется связь между параметрами  $\Delta \varphi \sim \Delta n$ , что в конечном итоге влияет на поляризацию световой волны, распространяющейся в кварцевом ОВ. Соответственно, наблюдается уход начального значения фазы или «0», что приведет к появлению ложного сигнала в системе измерения. При использовании многомодового оптического волокна данная проблема менее ощутима и влияние изменения температуры в меньшей мере влияет на процессы работы ИИС на основе ВОД, но применение многомодового волокна невозможно, из-за значительной протяженности измерительных каналов. Так как протяжённость измерительных каналов значительная и составляет несколько километров, то для построения ИИС для контроля геотехнического состояния горных выработок используем оптическое волокно стандарта G.652. Соответственно, необходимо разработать методы корректировки значения  $\Delta \varphi_n$ . Установлено, что изменение температуры до  $1^\circ \text{C}$  уже может вызвать нарушение в работе системы контроля и привести к ложным срабатываниям ВОД, из-за изменения  $\Delta n$ , что приводит к изменению  $\Delta \varphi$ .

Рассмотрим данный процесс с теоретической точки зрения для внесения определенной ясности в принципы работы ИИС на основе ВОД. Основными внешними факторами являются температура и механическая нагрузка на ОВ, что приводит к изменению уровня дополнительных потерь  $A$  и показателя оптического преломления  $\Delta n$ . Представим данное утверждение выражением:

$$\frac{\Delta q}{q} = \frac{1}{q \left( \frac{dq}{dT} \right) k \Delta T} + \frac{\delta q}{q}. \quad (2.6)$$

где  $q$  - дополнительные потери, возникающие в ОВ;

$\Delta q$  - изменение дополнительных потерь  $\left(\frac{dq}{dT}\right)$ ;

$k$  - значение частной производной температурной зависимости потерь в ОВ;

$\delta q$  - показатель дополнительных потерь с учетом эффекта фотоупругости;

$$\frac{1}{q} \cdot \left(\frac{dq}{dT}\right).$$

Первая часть выражения описывает изменение дополнительных потерь в ОВ, которые возникают при механическом изгибе ОВ. Вторая часть выражения представляет изменение потерь с учетом эффекта фотоупругости  $\delta q/q$ , который возникает при механическом воздействии на ОВ и его деформации.

Опишем влияние изменения значения температуры и силы механического воздействия на ОВ, при которой возникает микроизгиб, оболочка и сердцевина деформируются, что приводит к изменению показателя преломления ОВ:

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{1}{n} \left(\frac{\partial n}{\partial T}\right) p \Delta T + \frac{\delta n}{n}, \quad (2.7)$$

где  $n$  - показатель преломления сердцевины ОВ;

$\Delta n$  - изменение показателя преломления;

$\left(\frac{\partial n}{\partial T}\right) p$  - частная производная по температуре, характеризующая изменение плотности кварцевого стекла;

$\delta n$  - показатель преломления за счет эффекта фотоупругости.

Если первая часть формулы (2.7) учитывает изменение плотности стекла, то вторая часть фиксирует изменение эффекта фотоупругости, который возникает при деформации ОВ.

Первоначальная часть выражения (2.7) отражает изменения плотности кварцевого стекла, а вторая выражает изменения показателя преломления сердцевины ОВ стандарта G.652, связанные с эффектом фотоупругости:

$$\frac{1}{n} \left( \frac{\partial n}{\partial T} \right) p = 0,68 \cdot 10^{-5} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}. \quad (2.8)$$

В процессе создания эффекта фотоупругости коэффициент преломления  $\delta n$  изменяется, и его можно представить выражением, где используется коэффициент Погкельса  $p_{ij}$ :

$$\delta n = -\frac{n^2}{2} (p_{11}\varepsilon_1 + p_{21}\varepsilon_2 + p_{12}\varepsilon_z). \quad (2.9)$$

Здесь  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  - относительная деформация в поперечном сечении;  
 $\varepsilon_z$  - вдоль оси ОВ.

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta l}{l}, \quad (2.10)$$

где  $\Delta l$  - изменение длины отрезка волокна длиной  $l$ ,

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = -\nu\varepsilon_z, \quad (2.11)$$

Через  $\nu$  выражается отношение коэффициента Пуассона.

Используя формулы (2.10) и (2.11), запишем выражение:

$$\delta n = -\frac{n^3}{2} (p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})\varepsilon_z). \quad (2.12)$$

Примем для ОВ из кварцевого стекла значения  $n = 1,46$ ,  $p_{11} = 0,121$ ,  $p_{12} = 0,27$ ,  $\nu = 0,164$ . Затем, используя данные значения, подставим их в формулу (2.12) и получим выражение:

$$\delta n = -0,32 \cdot \varepsilon_z. \quad (2.13)$$

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

Известна скорость распространения оптического излучения в ОВ:

$$v = \frac{c}{n}, \quad (2.14)$$

где  $v$  - скорость распространения оптического сигнала в сердцевине ОВ;

$c$  - скорость света в вакууме;

$n$  - показатель преломления сердцевины ОВ.

Далее можно выполнить расчет параметров задержки оптического излучения или моды. Примем условие, при котором длина измерительного канала равна 1 км, а значение механической деформации 0,3%:

$$\delta\tau = \frac{1 \cdot \delta n}{c} = 3,2 \text{ нс}. \quad (2.15)$$

Используя выражение (2.15), можно произвести расчет задержки оптического сигнала или моды при длине измерительного канала, выполненного из одномодового ОВ длиной 5 км. При этом примем, что максимальный период повторения световых импульсов при автоколебательном режиме работы источника излучения будет составлять 50 мкс, это создает определенную разницу в количестве кумулятивных импульсов (изображений секторов), время накопления импульсов до 30 секунд.

Рассмотрим случай, когда механическое воздействие и возникающая при этом деформация ОВ отсутствуют, тогда можно использовать выражение (2.7) и (2.8) в следующем виде:

$$\frac{\Delta n}{n} = 0,68 \cdot 10^{-5} \Delta T, \quad (2.16)$$

где  $\Delta n$  - изменение показателя преломления сердцевины оптического волокна за счет изменения температуры;

$n$  - показатель преломления сердцевины оптического волокна;

$\Delta T$  - изменение температуры.

Если температура ВОД изменилась от первоначального значения выбранной установки температуры калибровки на  $5\text{ }^\circ\text{C}$ , это приведет к изменению показателя оптического преломления на  $\Delta n = 4964 \cdot 10$ . Если длина измерительного канала составляет до 5 км, время накопления 30 с, а преломление электромагнитной волны оптического диапазона заранее задано параметрами ВОД и режимом измерения, это вызовет задержку в ОБ в пределах 0,16 нс. Соответственно, формируется разница в количестве суммарных импульсов. Возможны изменения, так как это соотношение равно 2 по отношению к полученному значению во время калибровки.

Учитывая чувствительность фотоприемника и его динамический диапазон измерения, мощность источника оптического излучения, количество датчиков, оптические потери в каждом измерительном канале, длину оптического канала, уровень общих потерь, можно определить обнаруженную отраженную моду излучения [52]. Выполним расчет динамического диапазона измерения, при этом наименьшим сигналом будет сигнал обратного рассеяния, который является оптическим импульсом, отраженным от последнего оптического перехода или точки механического воздействия:

$$\beta > \beta_T + \alpha_1 \cdot l, \quad (2.17)$$

где  $\beta$  - потери на отражение одного оптического соединителя;

$\beta_T$  - потери на отражение на выходном торце последней секции измерительного преобразователя;

$\alpha_1$  - погонное затухание волоконно-оптического кабеля;

$l$  - длина последней секции волоконно-оптического кабеля.

Выполним расчёт динамического диапазона:

$$W = W_0 - n \cdot \alpha_{oc} - 2 \cdot L \cdot \alpha_1 - \beta, \quad (2.18)$$

$$W_0 = \frac{P_{и}}{P_{пор}},$$

где  $W_0$  - энергетический запас датчика;

$P_{и}$  - импульсная мощность источника оптического излучения;

$P_{пор}$  - порог чувствительности цифрового фотоприемника;

$W$  - динамический диапазон;

$n$  - количество соединителей в измерительном преобразователе;

$\alpha_{oc}$  - оптические потери, вносимые одним соединителем;

$L$  - длина оптического кабеля до места установки последнего оптического соединителя;

$\alpha_1$  - погонное затухание волоконно-оптического кабеля на рабочей длине волны оптического излучения;

$\beta$  - потери на отражение одного оптического соединителя.

Если неравенство (2.17) несправедливо, формула для расчета динамического диапазона будет выглядеть следующим образом:

$$W = W_0 - n \cdot \alpha_{oc} - 2 \cdot L_{\Sigma} \cdot \alpha_1 - \beta_{т}. \quad (2.19)$$

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

$\beta_{т}$  - потери на отражение на выходном торце последней секции измерительного преобразователя [53].

Структурная схема интерференционной системы представлена на рисунке 2.2.

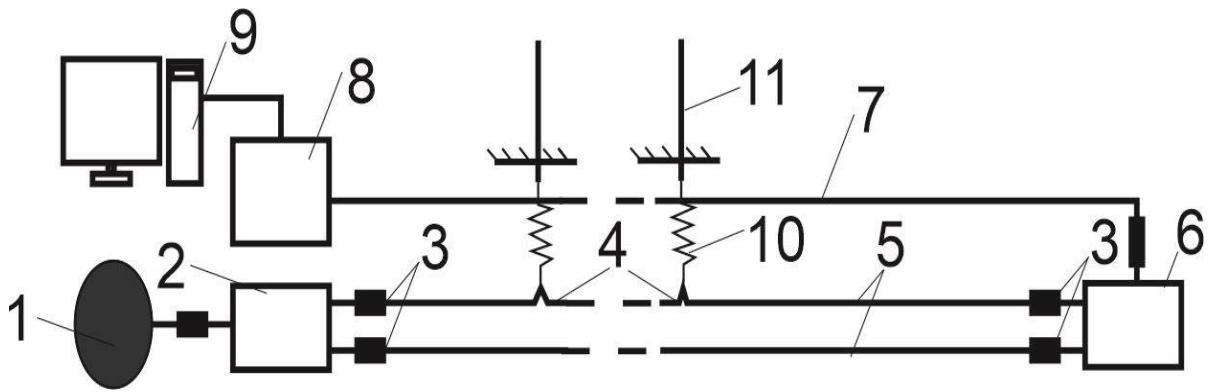


Рисунок 2.2 – Структурная схема интерференционной системы

Схема работает следующим образом, источник излучения 1 должен быть когерентным, лазерный луч с длиной волны 1310 или 1550 нм при помощи оптического разветвителя 2 разделяется на две оптические волны в соотношении  $\frac{1}{2}$ . Через оптические коннекторы 3 типа SC подключаются волоконно-оптические сенсоры 4, которые являются идентичными по своим параметрам и длине. Все указанные элементы схемы используют в телекоммуникационных системах и широко распространены, поэтому их стоимость невысока, что в конечном итоге значительно снижает стоимость измерительной системы в целом. На рисунке показано место механического воздействия 4 на оптическое волокно 5, приводящее к возникновению к микроизгибу. В конце волоконно-оптические сенсоры подключены через коннекторы 3 к разветвителю 6 и выходному оптическому волокну 7, соответственно происходит интерференция обеих лучей. Далее оптические волны от обоих сенсоров попадают на фотоприемник устройства обработки данных 8. Стандартные телекоммуникационные коннекторы типа SC необходимы для коммутации сенсоров, так как сварка оптических волокон в условиях взрывоопасной среды шахты не допустима, также возможно использование квазисоединений, у которых уровень затухания сигнала ниже. Когда оба плеча интерферометра находятся в невозмущенном состоянии, в случае отсутствия механического воздействия и возникновения, интерференционная картина остается неизменной. При механическом воздействии интерференционная картина изменяется и наблюдается оптическая разность хода в чувствительных волокнах (т.е. плечах интерферометра). Фотоприемное устройство выполнено на



основе телевизионной матрицы. В данном случае использована матрица от камеры системы видеонаблюдения стандарта HD. При помощи аппаратно-программного комплекса, установленного на компьютере 9, ведется обработка изображений дифракционных пятен и любых изменений интерференционной картины, при этом возможно зафиксировать любые микроизгибы, деформации и перемещения, возникающие в сенсорах, с достаточно высокой точностью в пределах границ нанометров. ВОДД привязываются через упругие элементы 10 к реперной станции 11. При смещении горной породы в слоях кровли вызывает смещение реперов, которые, перемещаясь, вызывают микроизгибы ОВ. Все изменения фиксируются системой мониторинга, а программное обеспечение переводит все изменения свойств света в единицы измерения давления.

Следует отметить, что результаты измерений зависят от изменений температуры и одновременно от изменений деформации. Секции измерительного датчика в распределенной системе можно разделить по назначению - для измерения температуры и для измерения деформации.

На основании проведенных исследований были разработаны конструкции датчиков наклона и положения буровой скважины, получены патенты на полезную модель Республики Казахстан (Приложение А).

## **2.2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗДЕЙСТВИЯ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ЭЛЕМЕНТЫ КРЕПИ**

Основное направление работы связано с разработкой и созданием ИИС, основой которой будет являться ВОД, рассмотрены литературные источники, где уже приведены некоторые результаты исследования [54-60]. Данные исследования

направлены на поиск конструктивных решений для создания наиболее оптимальной конструкции датчика давления, способного с высокой точностью преобразовывать давление горной массы на элементы крепи с изменением свойств световой волны, проходящей по отеческому волокну. При исследовании установлено, что имеет место воздействие со стороны массива пород выработки на ограждающую крепь забоя. Данное воздействие создает некую опасность внезапного обрушения свода выработки. Также можно отметить, что для идентификации параметров, приводящих к обрушению выработки, необходимо установить первоначальное смещение и деформацию пластов кровли перед обрушением. Изменение в характере напряжений проявляется следующим образом: образуются области с низким значением механических напряжений в кровле и почве выработки и увеличиваются в боковых стенках, при этом в кровле преобладают растягивающие напряжения. Учитывая данное обстоятельство, было проведено моделирование данного процесса.

На рисунках 2.3 и 2.4 представлена компьютерная модель ВОД, созданная в программе ANSYS. Данная модель имитирует механическое воздействие на волоконно-оптический датчик давления при воздействии на него горной массы. Компьютерная модель состоит из следующих частей: 1 – оптическое волокно; 2 – стальной стержень диаметром 1 мм; 3 – упругая резиновая прокладка.

Известно, что по контуру сечения горной выработки формируются трещины, которые образуются естественным образом после прохождения выработки рабочим органом комбайна. Создаётся повышенная концентрация избыточной энергии, которая трансформируется в энергию, направленную на разрушение контура выработки, что в конечном итоге приводит к раскрытию сформировавшихся трещин. Для численного анализа и моделирования воздействия горного давления на элементы крепи был использован метод конечных элементов ANSYS STATIC STRUCTURAL. Также выполнена имитация точечного воздействия на оптическое волокно, которое является датчиком, при изменении горного давления в своде выработки.

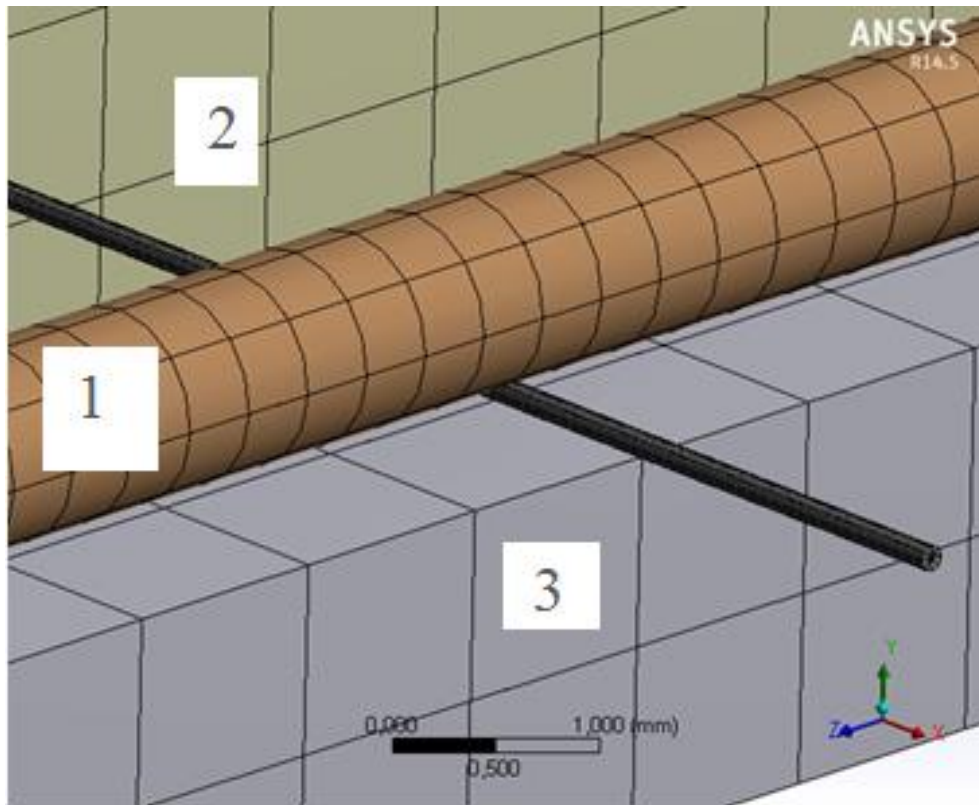


Рисунок 2.3 - Компьютерная модель ВОД в среде ANSYS

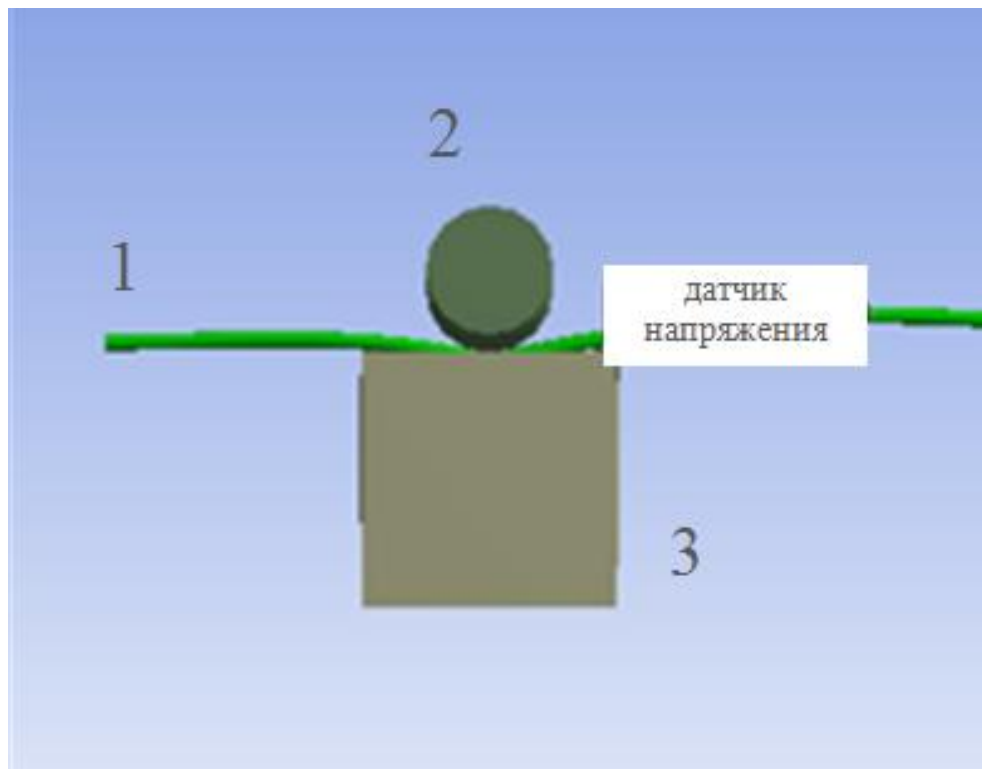
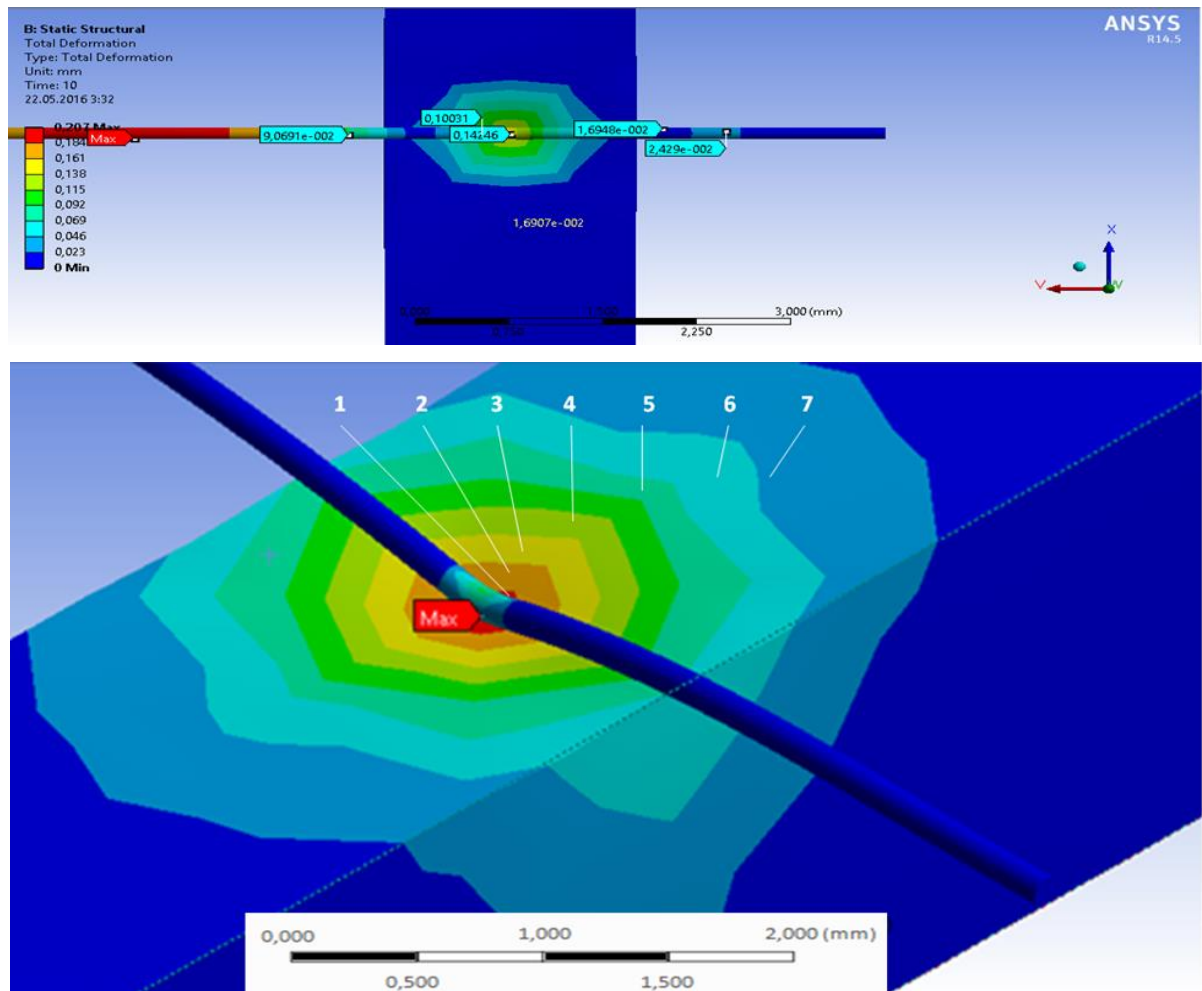


Рисунок 2.4 - Схема ВОД для исследования на механические воздействия

Процесс образования и рост трещин являются самопроизвольными и влекут за собой изменения общей картины распределения горного давления, при этом возможно формирование очагов концентрации напряжений, которые приводят к раскрытию трещин и опасности обрушения свода. В качестве объекта исследования рассмотрен волоконно-оптический датчик, разработанный для измерения горного давления породы на конструктивные элементы крепи. Основой измерительного элемента ВОД является оптическое волокно диаметром 9 микрон, расположенное на двух демпферах, представляющих собой две резиновые прокладки. Горное давление передается на два стальных стержня, расположенных на расстоянии 4 мм друг от друга. В дальнейшем количество точек контакта будет увеличено до нескольких десятков, так как для контроля давления горных пород массива двух точек явно недостаточно. Критический радиус составляет менее 1 мм. Задан шаг изменения давления на стержень равный 1 МПа, при начальном давлении 0 МПа и конечном 10 МПа. Соответственно, прикладывалось давление с интервалом в 1, 2, 3 МПа до 10 МПа. Заданная температура волокна составила 20 °С, это тоже учитывалось, так как температура влияет на показатель преломления оптического волокна и ее изменение необходимо учитывать. На рисунке 2.5 представлена модель датчика ВОД, который состоит из стального стержня диаметром 2 мм, при этом стержень давит непосредственно на само оптическое волокно. Нагрузка изменялась пошагово от 1 до 10 МПа с интервалом времени в 1 секунду. По результату моделирования получены зависимости изменения значений механических напряжений, возникающих при механическом воздействии на оптическое волокно, при этом полученная кривая достаточно линейная. Использован полупроводниковый лазер в качестве источника оптического излучения. В моделировании задавались параметры длины волны в диапазоне 1310 – 1625 нм. Для моделирования давления на стальные стержни и передачи его оптическому волокну использованы возможности программного продукта ANSYS, с помощью которого был проведен эксперимент. ANSYS позволяет рассчитать перемещения, деформации, напряжения, внутренние усилия, возникающие в теле под действием статической нагрузки. Параметры конечно-элементной модели и

физическо-технические данные задаются в приложении Mechanical. В соответствии с условиями проведения эксперимента элементам модели присвоены необходимые физические параметры. В расчёте использовались основные свойства контактных взаимодействий элементов. Результатом расчёта стало вычисление механического напряжения в области контакта оптическое волокно - стальной стержень. 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 2.5.



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 2.5 - Визуализация механических напряжений трехмерного моделирования в программном пакете ANSYS

Моделирование показало, что дополнительные потери импульса световой волны увеличиваются при таком радиусе изгиба, который является критическим, когда волоконный проводник находится на грани механического повреждения.

### **2.3 ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА, ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ И ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

Изучение любого явления начинается с наблюдения. Полученная информация требует теоретических знаний и обобщения. Теоретические методы в виде математических моделей раскрывают способы воздействия на изменения в желаемом направлении. Но при построении математических моделей возникает необходимость во введении ограничений, предположений или гипотезы. Следовательно, возникает проблема с оценкой надежности созданной модели. Эксперимент является методом проверки адекватности теоретических моделей.

Для получения достоверной информации о свойствах исследуемого объекта, которым является волоконно-оптический датчик, установленный в горной выработке, выполнено  $n$  экспериментов. Точность построенных математических моделей оцениваем по критерию Фишера, который доказал, что рациональное планирование эксперимента дает не менее существенный выигрыш в точности оценок, чем оптимальная обработка результатов измерения [61]. Целью эксперимента является получение математических моделей, связывающих с помощью ряда параметров значения факторов и результаты эксперимента.

Основным требованием планов факторных экспериментов является минимизация количества экспериментов, в которых получается надежная оценка

расчетных параметров  $\sigma_{\max}$  и  $\varepsilon_{\max}$  при сохранении приемлемой точности математической модели в факторном пространстве. Задача обработки результатов текущего эксперимента - определение численных значений  $\sigma_{\max}$  и  $\varepsilon_{\max}$ .

Целью эксперимента является получение и проверка математической модели объекта исследования, описывающей в функциональной и количественной форме взаимосвязи между входными и выходными параметрами. Входные параметры измерены и являются факторами (рисунок 2.6).

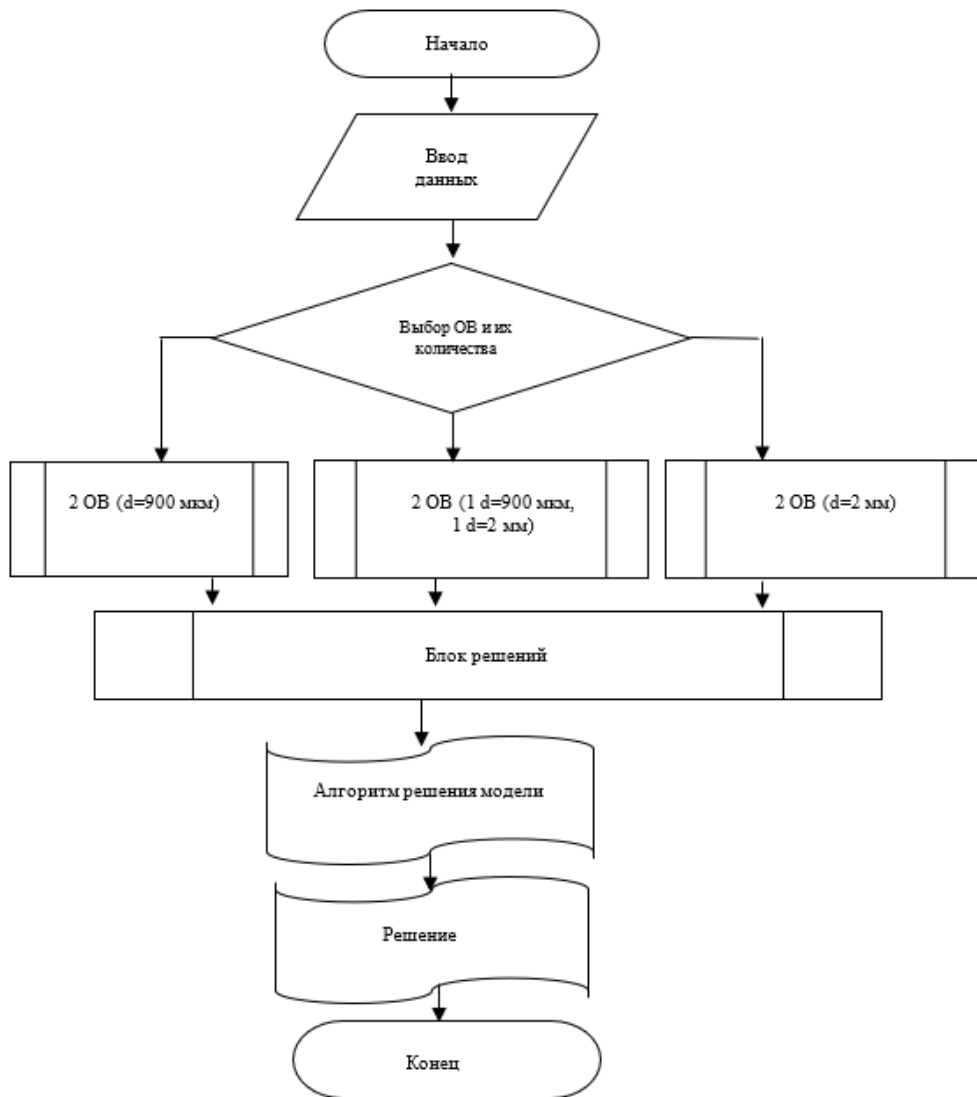


Рисунок 2.6 – Схема выбора процедур исследования волоконно-оптического датчика

Полученные в ходе исследования и представленные в дальнейшем математические модели удовлетворяют требованию удобства математического

использования и интерпретируемости. Примем предел применимости модели с граничным условием  $Q=0,001$  до 100 МПа. Для оценки относительной надежности модели используют среднеквадратичное отклонение СКО%. По величине СКО% можно оценить модель по следующим критериям:  $СКО\% \leq 20$  - отличная модель;  $20 < СКО\% \leq 50$  - хорошая модель,  $50 < СКО\% \leq 80$  - удовлетворительная модель,  $СКО\% > 80$  - неудовлетворительная модель. Через СКО% рассчитывается и критерий Фишера (F). Расчет F и его критические величины для уровня значимости 001 и 005 проводятся программой ANETR. Как известно, наличие существенной связи утверждается с надежностью 99% при  $F \geq F_{001}$  и с надежностью 95% при  $F \geq F_{005}$ . С помощью программы ANETR составляем матрицы планирования, где m – число аргументов (факторов), n - число уровней каждого аргумента. По каждой матрице число аргументов можно сократить путем удаления одноименной (по расположению) колонки цифр в числовом прямоугольнике. Условие надежности плана: m не более, чем  $n + 1$ . Матрица планирования состоит из серии опытов, оценка дисперсии всего эксперимента получается в результате усреднения значений дисперсии всех опытов [61]. Измерения  $\sigma_{\max}$  и  $\epsilon_{\max}$  выполнялись с использованием имитационной модели горной выработки, исследованной при помощи программы ANSYS. Количество выполненных измерений 10 при полностью совпадающих значениях повторных измерений.

Изучение процессов, связанных с напряжениями и деформациями в исследуемом объекте, связано с разработкой детерминированных моделей, отражающих его физическую сущность явлений и содержащих описание механизмов протекания в них элементарных процессов. Среди задач, решаемых нами по планированию эксперимента, можно выделить следующие: определение (уточнение) параметров модели; дискриминация, отбрасывание проверяемых механизмов элементарных процессов. Метод базируется на разработках проф. М. М. Протодьяконова [42]. Он позволяет работать с данными неуправляемого и управляемого (уровень аргументов каждого может быть задан) экспериментов. Обращение к программе не требует длительной специальной подготовки.



Одним из достоинств данного метода является возможность провести оценку результатов измерений с высоким уровнем достоверности (например, согласно критерию Фишера). Это обеспечивается процедурой постепенной нейтрализации влияния сильных аргументов на функцию, где начинает проявляться влияние более слабых аргументов. Метод является детерминированным, что означает, что он позволяет ограничить выбор модели известными данными из теории процессов (типами уравнений, границами и т. Д.). В конце программы представлены графики и рейтинги надежности, расставлены факторы по силе их влияния на результат, что позволяет выделить факторы, оказывающие существенное влияние.

Для обработки полученных данных применен статистико-детерминированный метод построения моделей с использованием ЭВМ и программы ANETR. Принимаем граничное условие: давление породы на горную выработку  $Q$  от 0,001 до 100 МПа;  $\sigma_{\max} < \sigma_T$ ; перемещение по осям после приложения давления  $Ox=0$  м;  $Oy=0$  м;  $Oz=0$  м. Начальные условия значения приложенной силы  $Q_{\text{раб}} = 10000$  Па,  $Q'_0 = 0$ . В ходе аппроксимирования при помощи программы ANETR были сформулированы однофакторные математические модели:

1) Значение максимальных напряжений  $\sigma_{\max}$  в зависимости от приложенного давления на области горной выработки  $Q$  от 0,001 до 100 МПа:

$$\sigma_{\max} = F(Q_{\text{раб}}), \quad (2.19)$$

$$\sigma_{\max} = Q_{\text{раб}} / (0,228692 + 6,12396 \cdot 10^{-13} \cdot Q_{\text{раб}}), \text{ МПа.}$$

Критерии оценки модели по среднеквадратичному отклонению  $СКО = 0,09\%$ , при условии  $СКО\% \leq 20$  – модель отличная. Оценка модели по коэффициенту Фишера  $F = 1135372,82250$  при условии наличия существенной связи утверждается с надежностью 99% при  $F \geq F_{001}$ .

2) Значение максимальных напряжений  $\sigma_{\max 1}$  (зеленая зона) в зависимости от приложенного давления на области горной выработки  $Q$  от 0,001 до 100 МПа:

$$\sigma_{\max 2} = F(Q_{\text{раб}}), \quad (2.20)$$

$$\sigma_{\max 2} = 42194,5 + 2,91625 \cdot Q_{\text{раб}}, \text{ МПа.}$$

Критерии оценки модели по среднеквадратичному отклонению СКО= 0,05%, при условии  $\text{СКО}\% \leq 20$  - модель отличная. Оценка модели по коэффициенту Фишера  $F = 3630478,00590$  при условии наличия существенной связи утверждается с надежностью 99% при  $F \geq F_{001}$ .

3) Значение максимальных напряжений  $\sigma_{\max 2}$  (желтая зона) в зависимости от приложенного давления на области горной выработки  $Q$  от 0,001 до 100 МПа:

$$\sigma_{\max 1} = F(Q_{\text{раб}}), \quad (2.21)$$

$$\sigma_{\max 1} = -6,5007,8 + 1,94385 \cdot Q_{\text{раб}}, \text{ МПа.}$$

Критерии оценки модели по среднеквадратичному отклонению СКО= 0,08%, при условии  $\text{СКО}\% \leq 20$  – модель отличная. Оценка модели по коэффициенту Фишера  $F = 1652002,69770$  при условии наличия существенной связи утверждается с надежностью 99% при  $F \geq F_{001}$ .

4) Значение максимальных напряжений  $\sigma_{\max}$  в зависимости от  $\sigma_{\max 2}$  (желтая зона) при приложенном давлении на области горной выработки  $Q$  от 0,001 до 100 МПа и условии  $\sigma_{\max} < \sigma_T$ .

$$\sigma_{\max} = F(\sigma_{\max 2}), \quad (2.22)$$

$$\sigma_{\max} = 38993,2 + 1,49810 \cdot \sigma_{\max 2}, \text{ МПа.}$$

Критерии оценки модели по среднеквадратичному отклонению СКО= 0,14%, при условии  $\text{СКО}\% \leq 20$  – модель отличная. Оценка модели по коэффициенту

Фишера  $F = 476634,87352$  при условии наличия существенной связи утверждается с надежностью 99% при  $F \geq F_{001}$ .

5) Значение максимальных напряжений  $\sigma_{\max}$  в зависимости от  $\sigma_{\max 1}$  (зеленая зона) при приложенном давлении на области горной выработки  $Q$  от 0,001 до 100 МПа и условия  $\sigma_{\max} < \sigma_T$ :

$$\sigma_{\max} = F(\sigma_{\max 1}), \quad (2.23)$$

$$\sigma_{\max} = 2.48116 + 2.24752 \cdot \sigma_{\max 1}, \text{ МПа.}$$

Критерии оценки модели по среднеквадратичному отклонению  $СКО = 0,08\%$ , при условии  $СКО\% \leq 20$  – модель отличная. Оценка модели по коэффициенту Фишера  $F = 1528056,0173$  при условии наличия существенной связи утверждается с надежностью 99% при  $F \geq F_{001}$ .

б) Значение максимальных деформаций  $\varepsilon_{\max}$  в зависимости от приложенного давления на области горной выработки  $Q$  от 0,001 до 100 МПа:

$$\varepsilon_{\max} = F(Q_{\text{раб}}), \quad (2.24)$$

$$\varepsilon_{\max} = -689,927 + 6,49300 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{\text{раб}}, \text{ МПа.}$$

Критерии оценки модели по среднеквадратичному отклонению  $СКО = 1,05\%$ , при условии  $СКО\% \leq 20$  – модель отличная. Оценка модели по коэффициенту Фишера  $F = 9013,65617$  при условии наличия существенной связи утверждается с надежностью 99% при  $F \geq F_{001}$ .

В результате автоматизированной аппроксимации полученных данных эксперимента программой ANETR, получены следующие многофакторные математические модели:

1) Значение максимальных деформаций  $\varepsilon_{\max}$  в зависимости от приложенного давления  $Q$  и максимальных напряжений  $\sigma_{\max}$ , в диапазоне  $Q$  от 0,001 до 100 МПа и условия  $\sigma_{\max} < \sigma_T$ :

$$\varepsilon_{\max} = F(Q_{\text{раб}}; \sigma_{\max}), \quad (2.25)$$

$$\varepsilon_{\max} = (-4,18699 \cdot 10^{-11} \cdot Q^2 + 1,38076 \cdot 10^{-2} \cdot Q + (-59675,1)) \times \\ \times (-1,83992 + 0,3081 \cdot \log(\sigma_{\max})).$$

Критерии оценки модели по среднеквадратичному отклонению СКО= 1,05%, при условии  $20 < \text{СКО}\% \leq 50$  – хорошая модель. Оценка модели по коэффициенту Фишера  $F = 8,87722$  при условии наличия существенной связи утверждается с надежностью 95% при  $F \geq F_{005}$ .

2) Значение напряжений в зоне 2 в зависимости от приложенной нагрузки  $Q$  и значений максимальных напряжений  $\sigma_{\max}$ , в диапазоне  $Q$  от 0,001 до 100 МПа и условия  $\sigma_{\max} < \sigma_T$ :

$$\sigma_{\max 2} = F(Q_{\text{раб}}; \sigma_{\max}), \quad (2.26)$$

$$\sigma_{\max 2} = (54259,4 + 2,91619 \cdot Q) + (31338,2 + (-3,1341 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_{\max})).$$

Критерии оценки модели по среднеквадратичному отклонению СКО= 0,05%, при условии  $\text{СКО}\% \leq 20$  - модель отличная. Оценка модели по коэффициенту Фишера  $F = 3337511,9334$ , при условии наличие существенной связи утверждается с надежностью 99% при  $F \geq F_{001}$ .

Также для обработки результатов испытаний использовалась программа WolframAlpha, которая позволяет обрабатывать массивы данных. Оценивание достоверности проводится по трем критериям:

- АИС - информационный критерий Акаике, критерий выбора из класса параметризованных регрессионных моделей, оценивающий модели с разным числом параметров;

- ВИС – Байесовский информационный критерий, критерий выбора модели из класса параметризованных моделей, зависящий от количества параметров;
- $R^2$  - коэффициент детерминации — это отношение дисперсии зависимой переменной, объясняемой расчетной моделью зависимости.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Проведен анализ физических основ контроля деформации горных выработок на основе теории оптического интерферометра. Установлено, что фотоупругий эффект, приводящий к изменению интенсивности света, возникает при внешнем воздействии. Показатель преломления сердцевины ОВ составит  $\delta n = 9,6 \cdot 10^{-4}$  при изменении параметров конструкции на 0,3% и более.

2. При моделировании процесса воздействия горного давления на крепь было проимитировано точечное давление на ОВ в случае образования трещины, грозящей обрушением, при помощи программы ANSYS STATIC STRUCTURAL.

3. 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 проф. М. М. Протодьяконова. Критерии оценки модели по среднеквадратичному отклонению СКО%, при условии  $\text{СКО}\% \leq 20$  – модель отличная. Оценка модели по коэффициенту Фишера с надежностью 95% и 99% при  $F \geq F_{005}$  и  $F \geq F_{001}$ .

### ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ ПО РАЗРАБОТКЕ ОПТОВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА

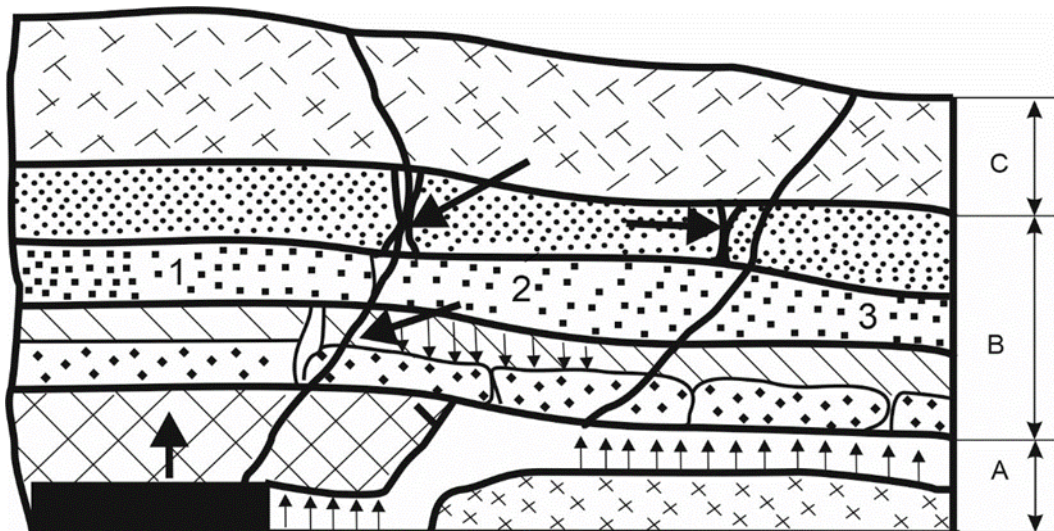
Горная крепь представляет собой техническое сооружение, встроенное в подземные горные выработки для обеспечения их устойчивости, технической безопасности и контроля горного давления. Горная крепь выполняет несколько функций:

- защита подземных сооружений от вывалов горной породы;
- сохранение размеров поперечного сечения подземных сооружений на протяжении всего срока эксплуатации,
- обеспечение защиты от давления воды и его перераспределения;
- обеспечение защиты от разрушения горной выработки.

Основные требования к опорным конструкциям горных пород: гибкость системы «порода-крепь» в неустойчивых породах; криволинейная форма обеспечивает высокую прочность конструкции за счет снижения изгибающих моментов и растягивающих напряжений. Кроме того, крепи должны подвергаться внешним и внутренним нагрузкам и, по возможности, максимально перекрывать горную массу (деформации скальных опор не должны превышать ожидаемого достаточно определенного уровня); иметь минимальную конструктивную толщину. Из-за длительного срока службы к опорам для горных выработок предъявляют повышенные требования надежности и долговечности. В связи с этим, чаще всего применяются крепи из монолитного бетона и железобетона.

На предприятиях со сложной геотехнической ситуацией применяют сборные крепи горные из бетонных и железобетонных блоков и тюбингов. В благоприятных для поддержания условиях иногда используют более лёгкие крепи (из набрызг-бетона, анкерную и др.).

Обработка месторождения угля со временем требует перехода на более глубокие горизонты, и как следствие этого, растет горное давление на стенки выработок и крепь. Увеличение горного давления приводит к деформации выработки и ее обрушению. Горное давление формирует очаги концентраторов, которые в свою очередь ведут к проседанию кровли и возникновению опасных зон внезапного обрушения, особенно вблизи лавы, где осуществляется добыча угля. Непосредственно в самой лаве данные проблемы уже решены за счет ограждающей и поддерживающей временной крепи с гидростойками, которые передвигаются вслед за добычным комплексом и выдерживают горное давление более 50 МПа, при этом горняки находятся под надежной защитой, но для прилегающих к лаве выработок данная крепь не используется. На крепление основных и вспомогательных выработок шахты затрачиваются значительные материальные средства, так как при увеличении величины горного давления, увеличивается и стоимость крепи. Прилегающие к очистному забою выработки подвергаются динамическим изменениям напряжения, вызванным продвижением добывающего комплекса, и изменению геотехнических параметров призабойного пространства. Можно разделить около забойное пространство на несколько частей: зону обрушения 1, зону трещиноватости 2, зону прогиба и посадки 3 (рисунок 3.1) [62-63].



1 - зона обрушения; 2 - зона трещиноватости; 3 - криволинейная зона проседания

Рисунок 3.1 - Разделение движения вышележащих слоев

В направлении продвижения очистного забоя блок 1 представляет собой основу горной массы на угольный пласт и является зоной установившихся напряжений. Блок 2 является горной массой, которая представляет собой область интенсивного движения пластов горных пород (область развития трещин), а также область интенсивных изменений горного давления, трещин и опускания. Блок 3 является агрегатом горной массы, который является зоной повторного уплотнения. Движение горного слоя снова становится стабильным, и трещина горного слоя снова закрывается.

Поэтому особое внимание необходимо уделить вопросам предотвращения разрушения горных выработок, примыкающих непосредственно к самому забою в пределах 40 - 50 метров от него. Возникают напряжения в 3-4 раз выше в отдалённых от забоя выработках, находящихся на такой же глубине.

### **3.1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАТЧИКОВ ПРИ УСТАНОВКЕ НА МОНОЛИТНОЙ БЕТОННОЙ ШАХТНОЙ КРЕПИ**

Существующие методы неразрушающего контроля прочности бетонной крепи имеют определенную сложность и требуют проведения определенного объема дорогостоящих подготовительных работ [64-67].

Для контроля качества бетонной крепи применяются методы неразрушающего контроля: отрыва со скалыванием, скалывание ребра, метод импульсного удара и т.д. Но подобные методы требуют временных затрат и не дают гарантию в определении деформаций на ранней стадии.



Идея разработки системы контроля дефектов бетонной крепи заключается в использовании телекоммуникационного одномодового оптического волокна в качестве чувствительного элемента и сенсора в системе контроля. Оптическое волокно принимает на себя механическое воздействие, которое вызывает изменение свойств света моды (фазы, частоты, интенсивности), проходящей по его сердцевине, все изменения фиксируются на установленный на выходе из ОВ фотоприёмник устройства для обработки сигналов и принятия решений. Одномодовое оптическое волокно стандарта, например G 652, а также сопутствующее оптоэлектронное оборудование, работающее в оптическом диапазоне 1310 и 1550 нм, ежегодно совершенствуется и имеет тенденцию к снижению стоимости, так как оно в первую очередь предназначено для наиболее динамически развивающейся сферы телекоммуникации, поэтому отдельных вложений не требует. Конечно, использовать без соответствующей оболочки стеклянную нить недопустимо, но нанесение на нее винилового покрытия является отработанной операцией при производстве оптического кабеля и имеет весьма низкую стоимость. Волоконно-оптическая система контроля деформации имеет значительно большую протяженность измерительных каналов, при этом энергозатраты на передачу оптических сигналов минимальны по сравнению с традиционными информационно-измерительными системами, передающими электрические сигналы по медным контрольным кабелям или эфиру. Энергоэффективность и значительная протяженность волоконно-оптических систем измерения уже доказанный факт, помимо этого оптическое волокно имеет высокую устойчивость к коррозии, внешним электромагнитным помехам, температурному воздействию, различным газам.

Можно отметить взрыво- и пожаробезопасность при работе, так как по его сердцевине передается оптическая мода. ОВ обладает достаточно высокой механической прочностью на разрыв, около 5 ГПа для диаметра 245 мкм (с внешней виниловой оболочкой), что вполне достаточно для использования в качестве чувствительного сенсора, помещенного внутрь тела фундамента.

Волоконно-оптический сенсор может быть размещен как в теле строительной конструкции (бетонной крепи), так и снаружи на ее поверхности.

Для организации измерения физических параметров необходимо наличие источника излучения, которым является полупроводниковый лазер и многомодовое или одномодовое оптическое волокно в качестве сенсора, а также наиболее сложный элемент системы - устройство для обработки данных и вывода информации с алгоритмами принятия решений. Последнее отличается сложностью в построении и требует разработки программного обеспечения для обработки данных. Конечно, можно обойтись более простыми наборами логики и использовать компараторы, но тогда возникает множество проблем с точностью измерения из-за различного рода помех, в том числе температурных.

Для натуральных испытаний с последующим созданием опытного образца в строительной лаборатории на базе Карагандинского технического университета были проведены лабораторные исследования и разработан лабораторный стенд на основе волоконно-оптической системы контроля деформации железобетонных конструкций (бетонной крепи). Стенд позволяет отработать различные типы системы измерения на основе оптических волокон. Исследовались изменения свойств света, проходящего по сердцевине ОВ при механическом воздействии как кратковременно, так и при долговременном режиме, при этом фиксировались изменения фаз, амплитуды, интенсивности, дополнительных потерь оптического излучения, поляризации, уровня оптического рассеяния и частоты.

ВОД работают в диапазоне инфракрасного излучения 1310 или 1550 нм и встраиваются внутри конструкции железобетонного фундамента, для имитации которого были изготовлены бетонные балочки с арматурой (ГОСТ 310.4-81).

В ходе эксперимента были изготовлены бетонные балочки размером 40x40 длиной 100 мм из цемента ПЦ-400 Д.0, песок Вольский (рисунки 3.2, 3.3).

Внутрь балочки было помещено ОВ диаметром 245 мкм без внешней силиконовой оболочки. В балочку укладывались два сенсора в оболочках, два с диаметром 245 и два с диаметром 900 мкм. Сенсоров может быть размещено несколько десятков, а их концы выведены наружу и уложены в специально

закрепленную монтажную коробку. Для коммутации сенсоров, источника излучения и измерительных приборов использованы стандартные телекоммуникационные коннекторы с адаптерами типа SC. ВОД, размещенный внутри лабораторной бетонной балочки, способен измерять механические нагрузки, приводящие к возникновению деформаций и смещений.

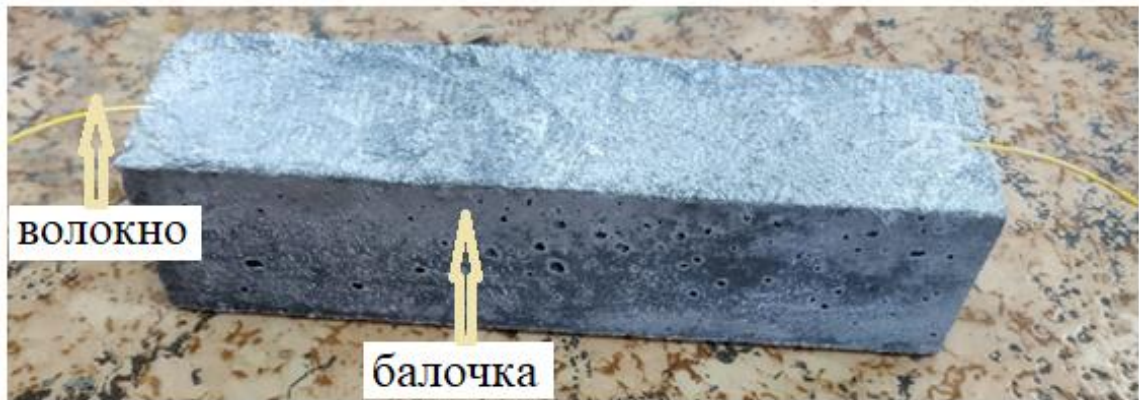


Рисунок 3.2 - Лабораторный образец балочки



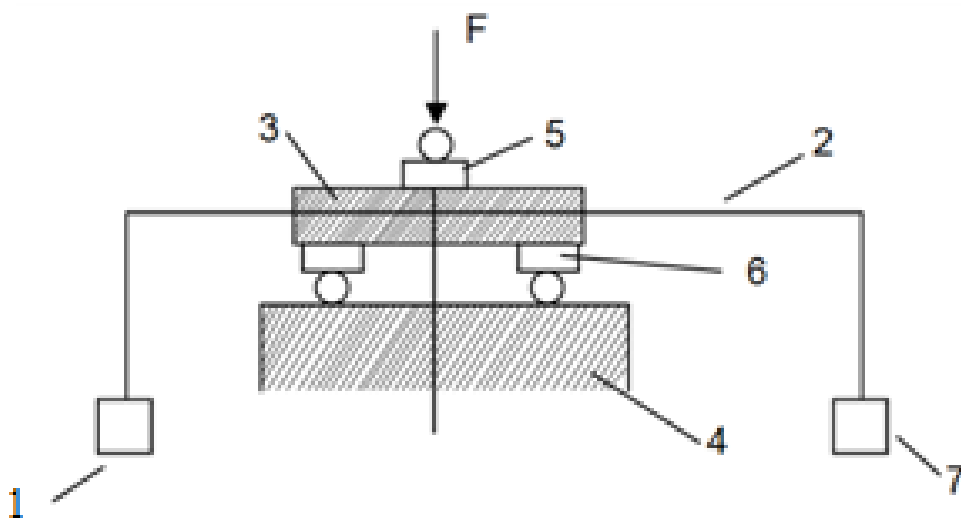
Рисунок 3.3 - Процесс подготовки балочек

Воздействие имитируется при помощи испытательной машины МИИ– 100 (рисунок 3.4). Схема нагружения испытательной машины МИИ – 100 показана на рисунке 3.5. Данная машина применяется для определения предела прочности при изгибе цементных образцов в соответствии с ГОСТ 310.4-81. Определяется предел прочности в кгс/см<sup>2</sup> при изгибе балочки. Средняя скорость нарастания испытательной нагрузки на образец  $(0,05 \pm 0,01)$  кН/с [ $0,12 \pm 0,02$  МПа/с в пересчете на единицу площади приведенного сечения балочки].



1 – источник излучения; 2 – оптическое одномодовое волокно в защитной оболочке; 3 – балочка; 4 – испытательная машина МИИ– 100; 5 – область приложения давления; 6 – стационарная опора; 7 – измеритель оптический мощности

Рисунок 3.4 - Испытательная машина МИИ – 100 (двухопорный изгиб)



1 – источник излучения; 2 – оптическое одномодовое волокно в защитной оболочке; 3 – балочка; 4 – испытательная машина МИИ– 100; 5 – область приложения давления; 6 – стационарная опора; 7 – измеритель оптический мощности

Рисунок 3.5 - Схема нагружения испытательной машины МИИ – 100

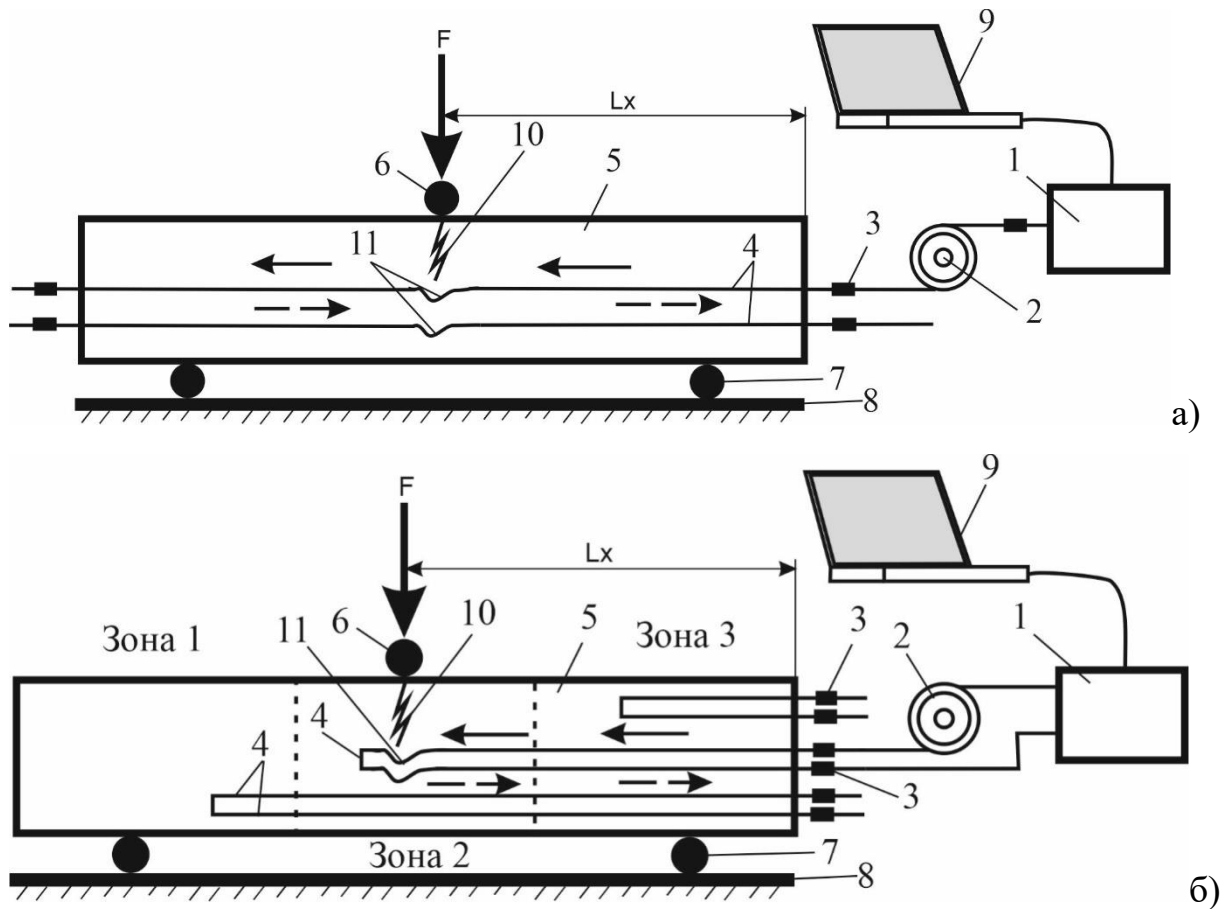
Испытание образцов балочек с помещенными в них оптическими волокнами проводилось по двум схемам: первая на основе точечных волоконно-оптических датчиков (рисунок 3.6, а), а во второй схеме использованы распределенные ВОД (рисунок 3.6, б).

Эксперименты проводились по двум схемам, представленным на рисунке 3.6, которые позволяют измерить деформации бетонной крепи при его нагружении, а также определить место механического воздействия. Каждая из схем имеет общие элементы и некоторые особенности.

При измерении использован анализатор оптического спектра BRISTOL INSTRUMENTS 771A, диапазон длин волн 375-1100 нм / 520-1700 нм, спектральное разрешение до 4 ГГц, точность измерения длины волны до  $\pm 0.2$  ppm (0,2 пм на 1000 нм), динамический диапазон выше 40 дБ. Для оптических рефлектометров Yokogawa AQ1200E характерны динамический диапазон, 38 дБ, мертвая зона по событию, 0,75м, точность измерения потерь  $\pm 0.05$  дБ или  $\pm 0.05$  дБ/дБ. Измерения проводились на трех длинах волн – 1310 нм, 1550 нм, 1625 нм в режиме автоматического измерения.

Рассмотрим общие элементы, которыми является блок 1 предварительной обработки данных, в котором находятся фотоприемник и источник излучения. Формируемый импульс проходит через компенсационную катушку с ОВ 2, необходимую для имитации реального измерительного канала. Для подключения ВОД 4 используется стандартный телекоммуникационный коннектор 3 типа SC. ВОД помещены в тело балочки 5. Сверху на балочку давит металлический стержень 6 с силой F. Балочка расположена на двух опорах 7, которые лежат на основании 8, эти элементы являются частью испытательной машины МИИ-100. Пройдя по ВОД, импульс света возвращается в блок предварительной обработки данных и попадает на фотоприемник. При помощи программного обеспечения и компьютера 9 осуществляется окончательная обработка данных, и на экран выдается результат измерения. При возникновении трещины 10 в теле балочки 5, оптическое волокно подвергается деформации и микроизгибу в месте 11, что, в свою очередь, приводит к изменению свойств света, проходящего через ОВ, и ведет

к изменению фазы распространения моды, увеличению дополнительных потерь, фиксируемых фотоприемником.



а - на основе точечных волоконно-оптических датчиков, б – на основе распределенных волоконно-оптических датчиков

Рисунок 3.6 – Схемы для измерения деформации железобетонной конструкции при помощи точечных и распределенных ВОД

Схема на рисунке 3.6, а является более простой в аппаратно-программном оснащении, но точность места определения механического воздействия невысока, так как используются точечные ВОД, указывающие только приблизительное место расположения трещины в балочке, на практике в реальной железобетонной конструкции, которая может быть протяженной, соответственно понадобится множество зон. Технически данный способ более прост, так как фотоприемником фиксируются только значения дополнительных потерь, которые программа преобразовывает в значения деформации. Для организации измерительного канала

необходимо, чтобы импульс света проходил от источника излучения до фотоприемника по закольцованной траектории.

Источник излучения блока 1 посылает зондирующий импульс, длительность которого зависит от длины измерительного канала. Посланные импульсы частично отражаются от возникшего микроизгиба 11 и возвращаются назад к фотоприемнику, уровень оптического рассеяния преобразовывается в значения деформации.

Система контроля бетонной крепи состоит из оптического рефлектометра OTDR VISA USB M2, измерителя оптической мощности VIAVI (JDSU) SmartPocket OLP-38, работающего в динамическом диапазоне от -50 до +26 дБм, с длиной волны 780-1650 нм, источника оптического излучения SmartPocket OLS-34/35/36 со встроенными опциями Auto-λ и Multi-λ, SmartPocket OLP-38, который может автоматически измерять уровень мощности и вносимые потери в одномодовом и многомодовом оптическом кабеле (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 – Измеритель мощности оптического излучения SmartPocket OLP-38 и источник оптического излучения SmartPocket OLP-38

Если балочка повреждена, волокно остается неповрежденным, но микротрещины дают возможность идентифицировать место деформации. Данный метод можно применять для контроля деформаций железобетонных строительных конструкций и сооружений.

При проведении эксперимента начальные условия составляли: сила давления на ОВ  $0 \text{ кгс/см}^2$  для ОВ с длиной волны 1310 и 1550 нм, внутренняя температура помещения  $25^\circ\text{C}$ . Количество измерений – 10. Этого количества было достаточно для достоверного результата исходя из коэффициента  $K_{\text{вар}}$  и требуемой степени точности [69-70]. Результаты представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Результаты эксперимента с использованием МИИ – 100

Длина волны, нм	Начальные условия, дБ	Значения при изломе, дБ	Значение на установке при изломе, $\text{кгс/см}^2$	Примечание
1310	13,09	14,97	17,9	Волокно без оплетки
1550	13,51	11,75	18	Волокно без оплетки
1310	37,01	38,09	87	Волокно в оплетке
1550	11,91	19,72	87	Волокно в оплетке

При проведении автоматизированной аппроксимации данных для ОВ с длиной волны 1310 и 1550 нм с помощью программы Wolframalpha были получены данные, занесенные в таблицы 3.2, 3.3 соответственно.

Таблица 3.2 – Результаты аппроксимации ОВ с длиной волны 1310 нм

Тип аппроксимации	Вид уравнения
Четвертой степени	$-0,0000256218P^4 - 0,000769835P^3 + 0,00551127P^2 + 0,0730599P + 13,0919 = A$
Третьей степени (кубическая)	$0,000256989P^3 - 0,00480114P^2 + 0,107501P + 13,079 = A$
Второй степени (квадратичная)	$0,00217029P^2 + 0,0612011P + 13,1231 = A$



Наилучшей можно принять аппроксимацию четвертой степени, при которой коэффициент детерминации составляет  $-11,0164, R^2=0,9932$ .

Таблица 3.3 – Результаты аппроксимации ОВ с длиной волны 1550 нм

Тип аппроксимации	Вид уравнения
Линейная	$0,0903301P + 11,3059 = A$
Третьей степени (кубическая)	$2,5,02098 * 10^{-6}P^3 - 0,000239908P^2 + 0,0690168P + 11,6261 = A$
Второй степени (квадратичная)	$0,000441897P^2 + 0,0459859P + 11,7179 = A$

Зависимость значений потерь в оптическом волокне с длиной волны 1550 нм лучше представить квадратичной аппроксимацией, при которой информационный критерий Акаике составляет  $-10,2253, R^2=0,99$  (коэффициент детерминации) [51].

График зависимости значения потерь оптического волокна с длиной волны 1310 нм (волокно без оплетки) при пошаговом увеличении давления при проведении испытаний на изгиб представлен на рисунке 3.8.

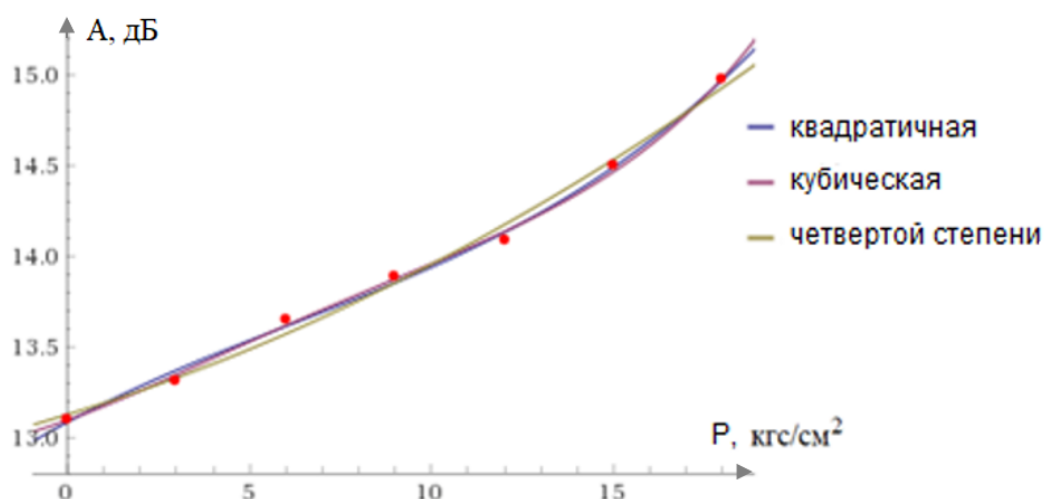


Рисунок 3.8- Значение потерь оптического волокна с длиной волны 1310 нм при пошаговом увеличении давления на изгиб

График зависимости значения потерь оптического волокна с длиной волны 1550 нм (волокно в оплетке) при пошаговом увеличении давления при изгибе представлен на рисунке 3.9.

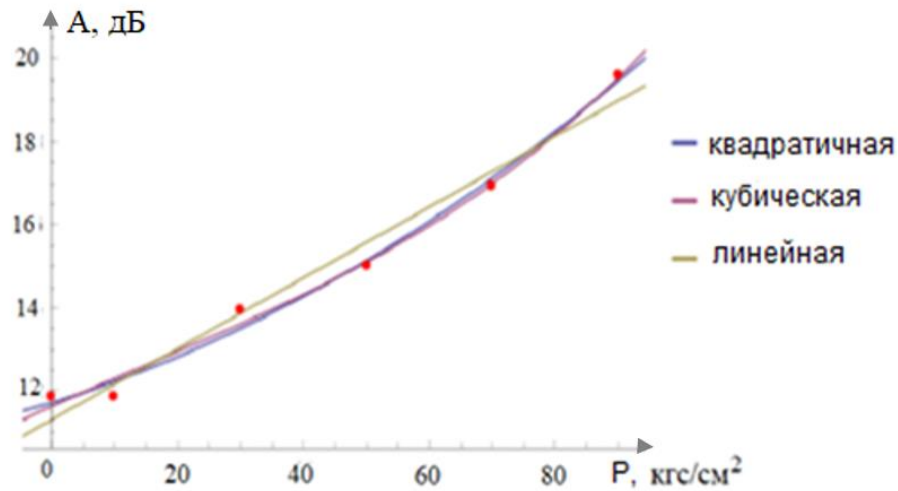
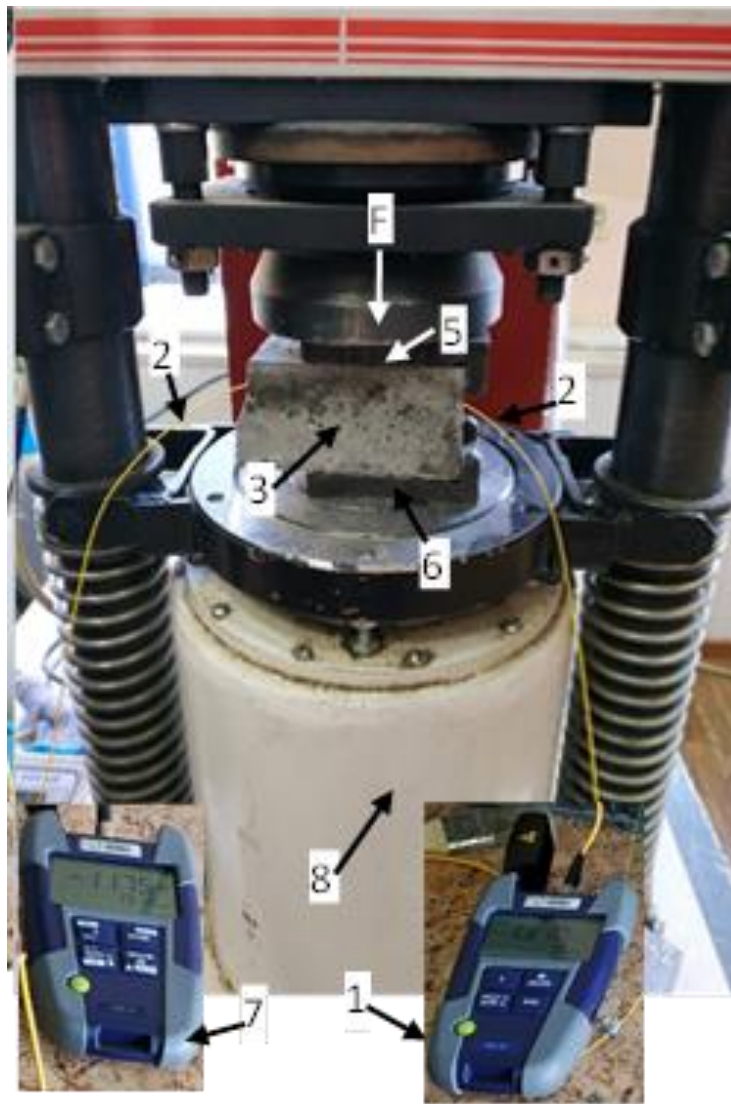


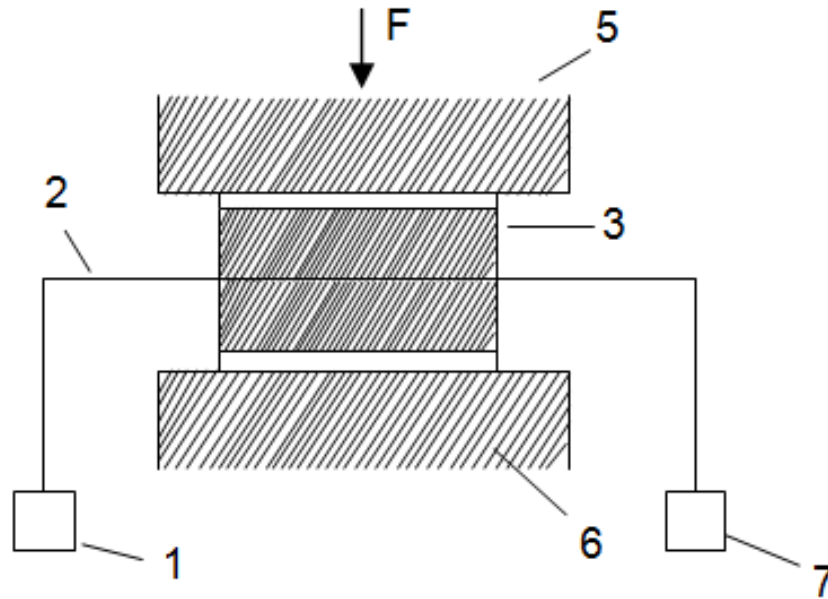
Рисунок 3.9 - Значение потерь оптического волокна с длиной волны 1550 нм при пошаговом увеличении давления на изгиб

Также лабораторные образцы бетонных балочек были испытаны на прессе гидравлическом измерительном ПГИ – 500, который предназначен для испытания на прочность (рисунок 3.10). Средняя скорость нарастания нагрузки при испытании 2,8 мм/мин. Схема нагружения пресса показана на рисунке 3.11. График зависимости значения потерь оптического волокна с длиной волны 1310 нм при пошаговом увеличении силы давления при действии пресса представлен на рисунке 3.12.



1 – источник излучения; 2 – оптическое одномодовое волокно в защитной оболочке; 3 –балочка; 4 - испытательная машина МИИ– 100; 5 – область приложения давления; 6 – стационарная опора; 7 – измеритель оптической мощности; 8 – пресс

Рисунок 3.10 - Пресс гидравлический измерительный ПГИ – 500



1 – источник излучения; 2 – оптическое одномодовое волокно в защитной оболочке; 3 – балочка; 4 – испытательная машина МИИ– 100; 5 – область приложения давления; 6 – стационарная опора; 7 – измеритель оптической мощности; 8 – пресс

Рисунок 3.11 - Схема нагружения пресса гидравлического измерительного ПГИ – 500

Результаты представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Результаты эксперимента с использованием гидравлического пресса ПГИ – 500

Длина волны, нм	Начальные условия, дБ	Значения при изломе, дБ	Значение на установке при изломе, кгс/см <sup>2</sup>	Примечание
1310	17,48	57,3	22	Волокно без оплетки
1550	18,29	63,45	22,8	Волокно без оплетки
1310	28,18	60,7	35,2	Волокно в оплетке
1550	35,54	46,6	77,2	Волокно в оплетке

График зависимости значения потерь оптического волокна с длиной волны 1310 нм (волокно без оплетки) при пошаговом увеличении силы давления при действии прессы представлен на рисунке 3.14.

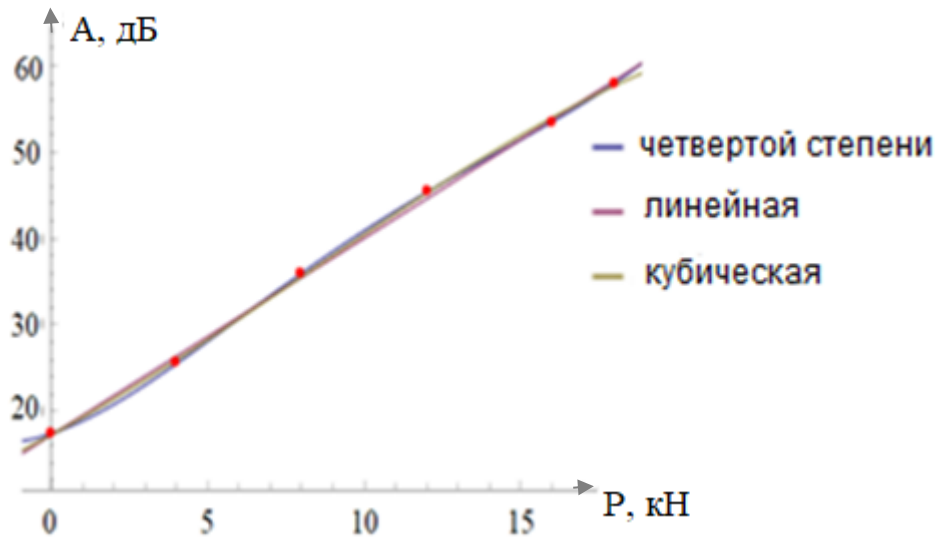


Рисунок 3.12 - Значение потерь оптического волокна с длиной волны 1310 нм при пошаговом увеличении силы давления прессы

При проведении аппроксимации были получены следующие результаты:

$$1. 0,000559605P^4 - 0,0226758P^3 + 0,285055P^2 + 1,20594P + 17,3754 = A$$

аппроксимация четвертой степени;

$$2. -0,00252663P^3 + 0,0615173P^2 + 1,95615P + 17,2432 = A$$

аппроксимация третьей степени (кубическая);

$$3. 2,28045P + 17,2006 = A \text{ аппроксимация линейная.}$$

Зависимость значений потерь в оптическом волокне лучше представить аппроксимацией четвертой степени, при которой информационный критерий Акаике составляет  $-2,88722, R^2=0,99$  (коэффициент детерминации).

График зависимости значения потерь оптического волокна с длиной волны 1550 нм (волокно с оплеткой) при пошаговом увеличении давления при изгибе представлен на рисунке 3.13.

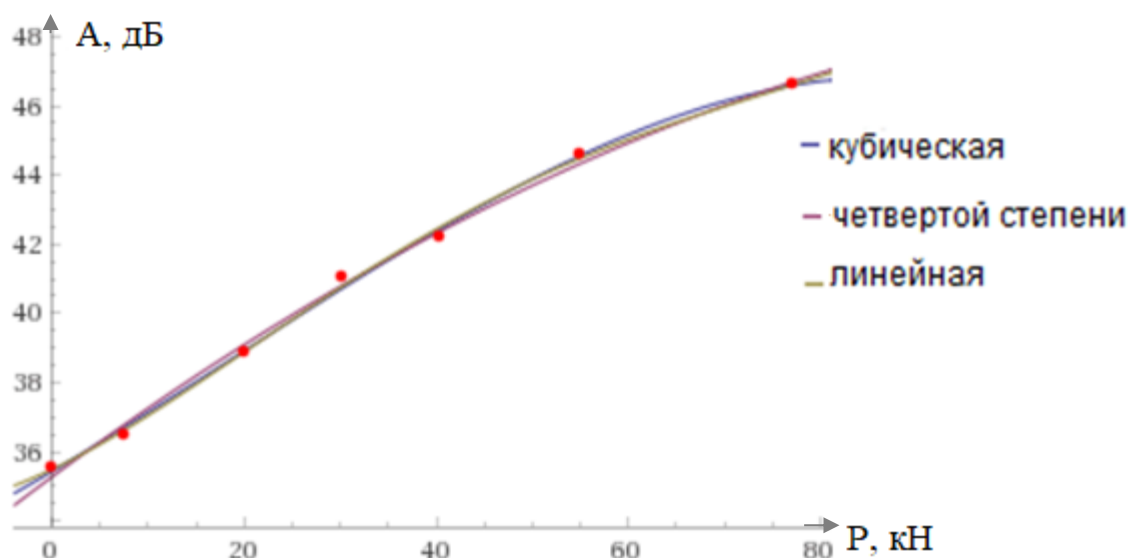


Рисунок 3.13 - Значение потерь оптического волокна с длиной волны 1550 нм при пошаговом увеличении давления на изгиб

При проведении аппроксимации были получены следующие результаты:

1.  $9,74476P + 28,6191 = A$  аппроксимация линейная;

2.  $-0,0174078P^4 + 1,10795P^3 - 4,75095P^2 + 14,6446P + 28,1652 = A$

аппроксимация четвертой степени;

3.  $0,997536P^3 - 4,53536P^2 + 14,5163P + 28,1708 = A$  аппроксимация третьей степени (кубическая);

Зависимость значений потерь в оптическом волокне лучше представить кубической аппроксимацией, при которой информационный критерий Акаике составляет 9,22255,  $R^2=0,99$  (коэффициент детерминации).

Использование приведенных выше методов позволит установить предполагаемое место дефектов (трещин) и повреждений бетонной крепи, чего не могут использоваться существующие методы неразрушающего контроля прочности бетона. Возможно получение значений механических напряжений и деформаций в режиме реального времени с хранением полученных данных.

С помощью описанных выше методов можно определить предполагаемое расположение полостей (трещин) и повреждений бетонной крепи, которые ранее нельзя было использовать для неразрушающего контроля прочности бетона.

### **3.2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАТЧИКОВ ПРИ УСТАНОВКЕ НА АРОЧНОЙ КРЕПИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ**

Первым шагом в создании новых конвергентных систем безопасности нового поколения с высокими техническими характеристиками и скоростью измерения, способных работать во взрывоопасных средах горных предприятий на основе оптических датчиков, является проведение аналитического исследования имеющихся результатов в этой области на основе системного подхода и решения всей проблемы. Результаты анализа литературы позволили использовать накопленный опыт для разработки ИИС, способной эффективно работать при опасном внезапном выбросе метана и пыли из шахт. Для разработки методов мониторинга и измерения геотехнических параметров горной выработки была разработана лабораторная испытательная модель, которая представлена на рисунке 3.14.

Проведенные исследования послужат основой для создания перспективных систем для наблюдения за состоянием грунтового массива в основании и в окрестностях зданий. К примеру, до сих пор на горных предприятиях остается проблема с внезапным обрушением бортов карьера и бермы, которые приводят к значительным простоям производственной цепочки и в некоторых случаях к гибели людей. Геофизические исследования и замеры, которые необходимо проводить в случае обнаружения опасности исхода, требуют значительных материальных затрат и сопряжены с постоянным требованием маркшейдеров.

Несовершенство информационно-измерительных систем (мониторинга различных технических параметров) требует поиска новых путей решения, основанных на новых методах и средствах. Переход с традиционных электрических сигналов, генерируемых датчиками и передаваемых по

проводникам или эфиру к устройству обработки результатов измерения, к волоконно-оптическим технологиям, где передача сигналов осуществляется при помощи импульса света (моды), позволит встать на более высокий уровень в точности, скорости, дальности проводимых измерений.

Прямых конкурентов волоконно-оптических систем в мире нет, они не имеют аналогов, но другие технологии, например радиорелейная связь или беспроводные системы, имеют свои сильные и слабые стороны и являются смежными, связаны между собой и уместнее рассматривать аргументы «за» и «против». Используемые ранее медные кабели устарели, возможности использования спутниковых каналов слишком ограничены. А волоконно-оптические системы и технологии очень надежны, отказоустойчивы, безопасны и позволяют передавать информацию с большой скоростью и в большом объеме [71–73].

Для апробации своих теоретических исследований была разработана натурная модель горной выработки с арочной крепью. Данная модель позволяет отработать конструкцию волоконно-оптических датчиков. Также есть возможность имитировать работу информационно-измерительной системы на основе оптических волокон при различного рода нагрузок на элементы горной крепи. Модель выполнена с учетом реальных размеров и пропорций реальной горной выработки, оснащенной стальной разборной арочной крепью. В качестве чувствительного сенсора использовано одномодовое оптическое волокно фирмы Corning типа SMF, которое изготовлено в США. Его параметры следующие: сердцевина 9 мкм; оболочка 125 мкм; виниловая оболочка внешнего покрытия 248 мкм; пластиковая наружная оболочка 900 мкм. Волокно изготавливается из кварцевого стекла, отвечает требованиям стандарта G.652.D и используется в качестве проводников в системах телекоммуникации. В процессе натурных экспериментов выявлено, что применение волокна стандарта G.652 типа Ultra не желательно, так как данный тип кварцевого оптического волокна отличается тем, что оно менее восприимчиво в микроизгибам. То же относится и к волокнам стандартов G.655 – 657 и выше по серии стандарта G.750+. Последние разработки ученых из Японии, которые создали оптические волокна стандарта G.950+, не



имеющие дополнительных потерь при микроизгибе. Это обстоятельство не позволяет создать высокоэффективные датчики давления, так как основная идея заключается в контроле дополнительных потерь при возникновении микроизгиба. Соответственно, лучше для ВОД подходят волокна более раннего выпуска - начала XXI века. На рисунке 3.14 приведено фото натурной модели с ВОД на основе оптических волокон G.652.D.



Рисунок 3.14 – Натурная модель с ВОД на основе оптических волокон G.652.D

Лучшими показателями обладают оптические волокна стандарта G.651-652, но они уже сняты с производства, так как имеют большее затухание оптического сигнала и более чувствительны к микроизгибу. Использование многомодового волокна в исследовании было исключено, так как данный тип волокон предназначен для локальных систем передачи информации протяженностью в пределах 5000 метров, что недостаточно для протяженных выработок шахты или

карьеров. Структурные схемы измерений с использованием оптического ваттметра и оптического рефлектометра показаны на рисунках 3.15 и 3.16 соответственно. Для определения значений мощности оптического излучения и потерь использовался измеритель оптической мощности VIAVI (JDSU) Smart Pocket OLP-38, работающий в динамическом диапазоне от -50 до +26 дБм, с диапазоном длины волны 780-1650 нм (рисунок 3.17). Также нами был использован источник когерентного излучения на основе полупроводникового лазера типа Smart Pocket OLS-34. Данный источник имеет ряд необходимых автоматически поддерживаемых функций измерений, в том числе автоматическая стабилизация излучения световой волны в диапазоне 900 – 1625 нм, а также функции Auto -  $\lambda$  и Multi -  $\lambda$ , что крайне необходимо для реализации точности измерений. В качестве измерительного прибора использован Smart Pocket OLP-38, который обладает способностью автоматически оценивать уровень оптической мощности в диапазоне 780 – 1625 нм без переключения диапазона измерений, а также с достаточно высокой точностью измерить вносимые потери, сформировавшиеся в оптическом проводнике при прохождении световой волны по его сердцевине. Прибор также способен одинаково эффективно работать с одномодовым и многомодовым оптическим волокном. Прибор имеет достаточно широкий диапазон от -50 до 26 дБ. В экспериментах использована компенсационная катушка с оптическим волокном стандарта G.652.D, ее длина составила 2 км. Схема измерений представлена на рисунке 3.15.

Оптическое волокно присоединяется к измерительному прибору измерения посредством оптических коннекторов типа FC или SC, что очень удобно при использовании стандартных патч-кордов. Тип использованного оптического адаптера - UPP 2.5 мм.

Также проведены измерения с использованием другого метода контроля потерь в оптическом волокне при помощи оптической рефлектометрии. Это позволяет исключить ошибки в полученных экспериментальных данных. В качестве измерителя использован оптический рефлектометр OTDR фирмы Yokogawa. Yokogawa AQ1200E является высокоточным измерительным

прибором, позволяющим определить не только уровень дополнительных потерь, но и место обрыва оптического волокна. Схема измерений приведена на рисунке 3.16.

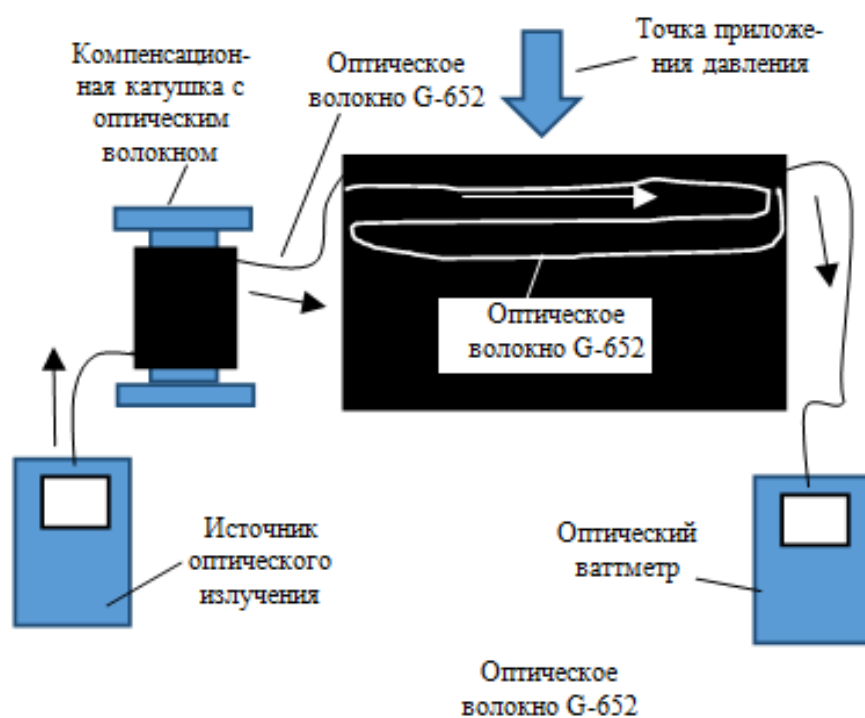


Рисунок 3.15 – Схема измерения с использованием оптического измерителя мощности излучения Smart Pocket OLP-38 и источника излучения OLS-34

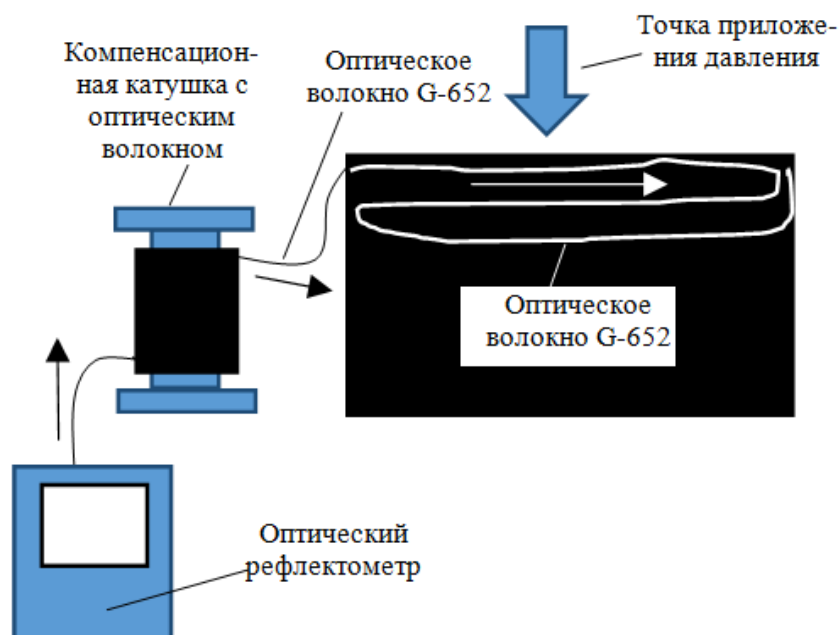
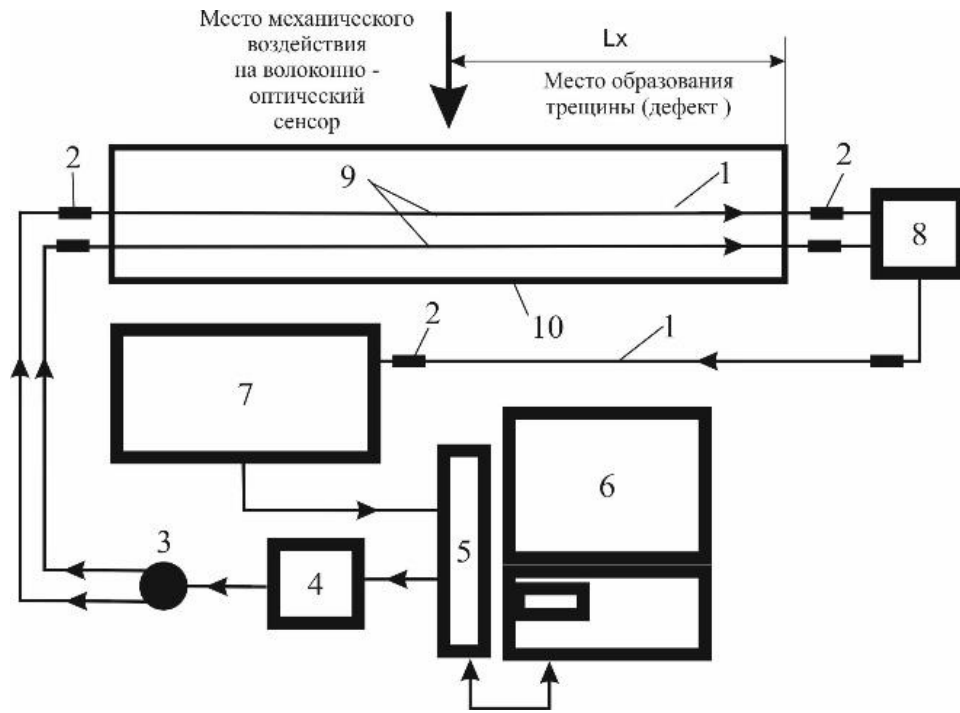


Рисунок 3.16 – Схема измерений с использованием оптического рефлектометра Yokogawa AQ1200E

Проведен ряд экспериментов по измерению дополнительных потерь, возникающих в оптическом волокне при механическом воздействии на него и возникновении микроизгиба, приводящего к изменению свойств световой волны, проходящей через его сердцевину. При увеличении давления на оптическое волокно увеличивается значение дополнительных потерь, которые фиксирует измерительный прибор. На этом принципе и действует ВОД. Оптическое волокно находится между источником света и фотоприёмником. Соответственно при механическом воздействии на оптическое волокно изменяются свойства оптической волны, падающей на поверхность фотоприемника. Чем выше механическое давление и значение микроизгиба, тем выше потери оптического излучения и, соответственно, выше давление на оптическое волокно.

Также в работе рассмотрен метод идентификации механических воздействий на основе оптического интерферометра Маха-Цандера (рисунок 3.17) показал высокую линейность и точность при проведении измерений и может быть использован для контроля деформации массива после соответствующей доработки его конструкции. По двум сенсорам, основой которых является ОВ, проходит свет, а по третьему волокну свет передается дальше до анализатора системы.

Важным моментом в получении надежных научных сведений, полученных в результате проведения эксперимента, является выбор метода обработки данных. Для этого были использованы математические методы обработки статистических данных на основе компьютерной программы Wolframalpha, которая позволила получить численные результаты для построения графиков зависимости потерь оптического излучения в волокне при механическом воздействии при различных длинах волн, в частности при длине волны 1310 и 1550 нм. Wolframalpha, являясь программным продуктом с интерактивной системой, ориентирована на работу с массивами данных, находится в свободном доступе и может быть использована для обработки результатов экспериментов.



1 – оптическое волокно, 2 – оптические коннекторы, 3 – оптический разветвитель,  
 4 – полупроводниковый лазер, 5 – устройство согласования, 6 – ПК, 7 –  
 устройство обработки, 8 – устройство ввода, 9 – место механического  
 воздействия, 10 – тело балки

Рисунок 3.17 - Метод идентификации механических воздействий на основе  
 оптического интерферометра

Условия проведения экспериментов и граничные условия следующие: длина световой волны 1310 и 1550 нм, приложенный вес от 0 до 15 Н, интервал шага 2,4 Нм, общее количество 7 шагов, температура внутри помещения лаборатории 25 °С. Исключаются перемещения ОВ по осям до приложения давления  $Ox=0m$ ;  $Oy=0m$ ;  $Oz=0m$ . Результаты представлены графиком зависимости параметров на рисунке 3.18.

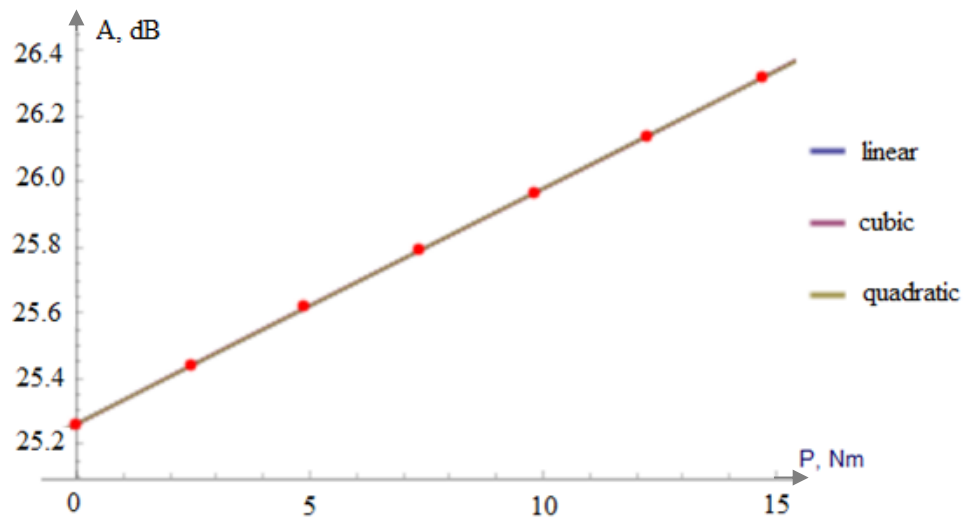


Рисунок 3.18 – График зависимости дополнительных потерь в оптическом волокне при пошаговом увеличении весовой нагрузки при длине волны 1310 нм

В результате автоматизированной аппроксимации данных получены однофакторные зависимости дополнительных потерь на длине волны 1310 нм в зависимости от приложенной весовой нагрузки на ВОД. Каждое измерение проводилось 10 раз.

Программа выполнила три вида аппроксимации, что является оптимальным выбором конечного результата. Три вида полученных аппроксимаций представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5

Тип аппроксимации	Вид уравнения
Линейная	$0,0718438P + 25,2616 = A$
Квадратичная	$0,0000237653P^2 + 0,0721934P + 25,2609 = A$
Кубическая	$0,000022611P^3 - 0,000522694P^2 + 0,0749118P + 25,2589 = A$

Вывод: наиболее приемлемой является квадратичная аппроксимация, при которой достигнут наиболее высокий информационный критерий Акаике -53,6639.

Второй эксперимент был проведен в аналогичных условиях, при использовании длины оптической волны 1550 нм. На рисунке 3.19 представлен график зависимости дополнительных потерь в оптическом волокне при

механическом воздействии на него. Весовая нагрузка была идентична первому эксперименту и изменялась с шагом шага 2,4 Нм. Граничные условия приложенного веса от 0 до 15 Н.

В результате автоматизированной аппроксимации данных получены однофакторные зависимости дополнительных потерь на длине волны 1310 нм в зависимости от приложенной весовой нагрузки на ВОД. Каждое измерение проводилось 10 раз.

Программа выполнила три вида аппроксимации, что является оптимальным выбором конечного результата. Ниже представлена таблица (таблица 3.6) с тремя видами полученных аппроксимаций кривых графиков зависимости.

Таблица 3.6

Тип аппроксимации	Вид уравнения
Линейная	$0,109018P + 22,1951 = A$
Кубическая	$-0,0000395923P^3 + 0,00181238P^2 + 0,0904493P + 22,2269 = A$
Квадратичная	$0,000938742P^2 + 0,0952092P + 22,2234 = A$

Вывод: наиболее приемлемой является квадратичная аппроксимация, при которой достигнут наиболее высокий информационный критерий Акаике -24,11.

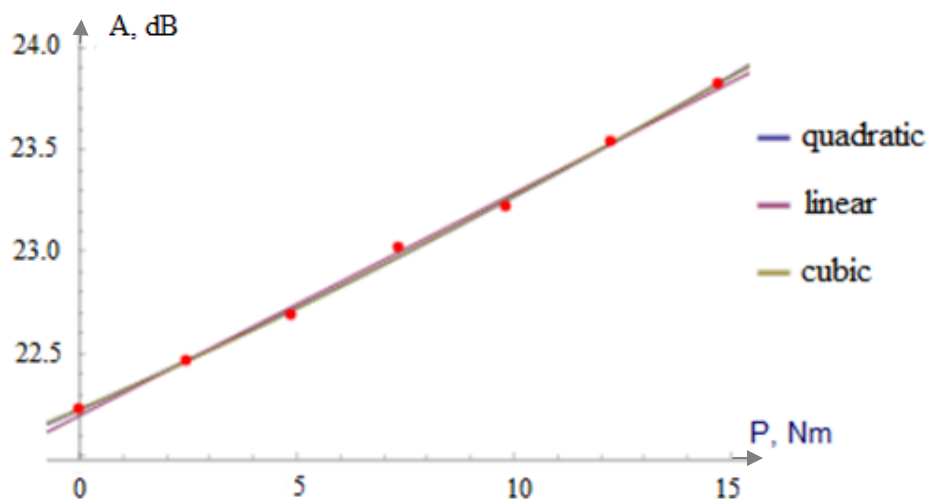


Рисунок 3.19 –График зависимости дополнительных потерь в оптическом волокне при пошаговом увеличении весовой нагрузки при длине волны 1550 нм

Второй частью исследования было измерение дополнительных потерь и определение места приложения нагрузки методом рефлектометрии. Для определения расстояния до места приложения давления использовался рефлектометр YOKOGAWA AQ1200 OTDR, внешний вид которого представлен на рисунке 3.20.



Рисунок 3.20 - Внешний вид рефлектометра YOKOGAWA AQ1200 OTDR

Полученные рефлектограммы были обработаны и проанализированы. Одна из них представлена на рисунке 3.21. На фото видно место, на котором динамически изменяется уровень дополнительных потерь оптического излучения в ОВ, которые были вызваны механическим воздействием. Данный метод позволяет установить место воздействия, что позволит в будущем создать квази-распределенную и распределенную систему контроля горного давления в выработках с определением точного места ВОД.



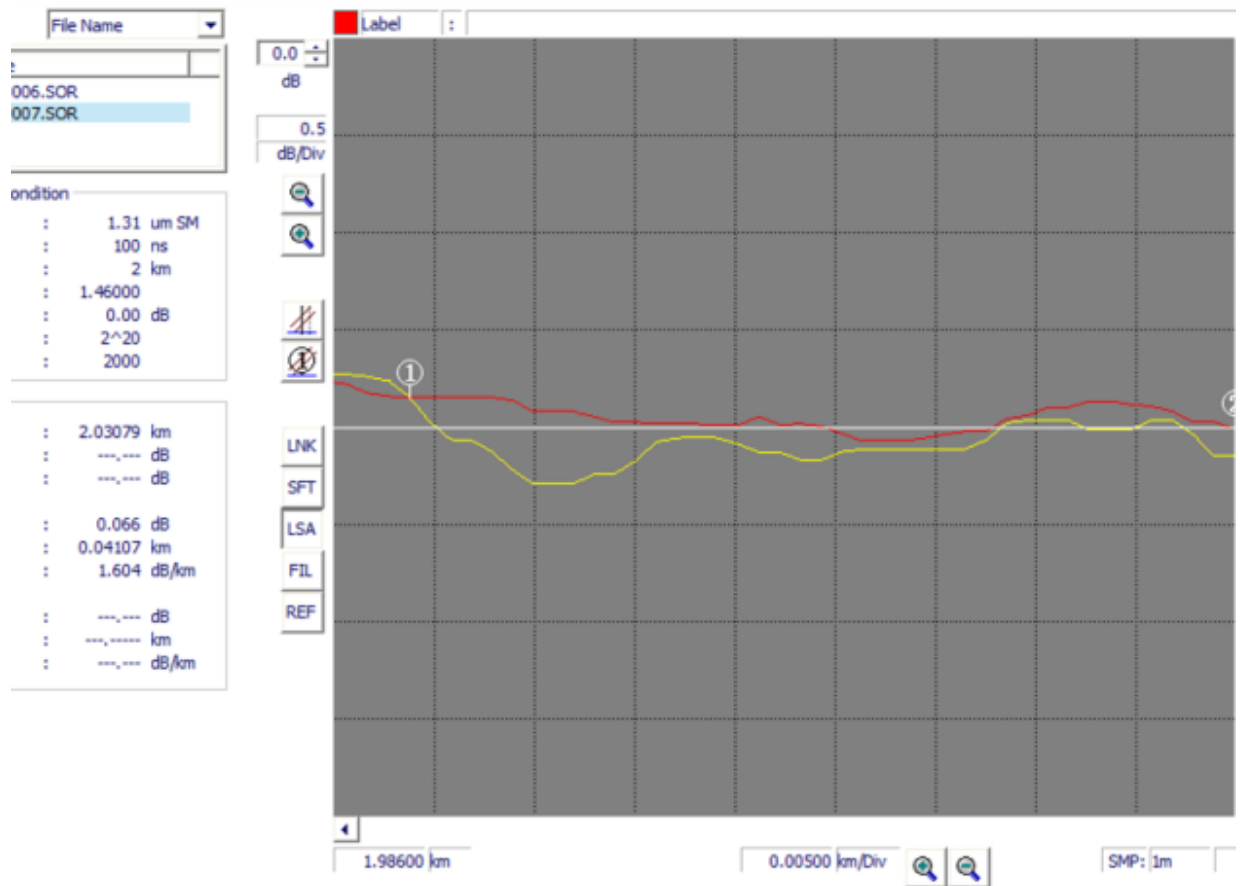


Рисунок 3.21 - Рефлектограмма

На рефлектограмме показано, что в диапазоне 1,989-2,03079 км потери оптического излучения в волокне составили 0,066 дБ, соответственно можно получить численное значение горного давления в пересчете на относительные единицы.

Как сказано ранее, проведены натурные эксперименты по имитации механического воздействия на ОВ, которое в конечном итоге вызывает микро- и макроизгиб, что ведет к возникновению определенного численного значения дополнительных потерь оптического излучения в сердцевине кварцевого волокна. Соответственно, возможно установить через изменение значений дополнительных потерь значение горного давления, а также установить величину смещения пород горного массива. Основным преимуществом информационно-измерительных систем на основе ВОД является их безопасность для шахт, опасных по внезапному выбросу пыли и газа. Данные системы обеспечивают полную искро- и пожаробезопасность, так как каналы связи и сами ВОД являются энергетически

пассивными и не способны выделить искру в процессе работы или их повреждения. При этом энергозатраты на передачу измерительных сигналов составляют доли ватта, а реже более одного ватта. При этом источник питания ИИС находится на поверхности или в безопасной зоне околоствольного двора в условиях хорошего проветривания. Протяженность измерительных каналов может достигать 30 км. ИИС работает в полностью автоматическом режиме в течение суток и не требует остановки для проведения обслуживания. ИИС может быть изготовлена в различных вариантах в зависимости от реальной потребности шахты. Одним из видов может быть ИИС, основанная на методе контроля дополнительных потерь оптического диапазона 1310 – 1550 нм при помощи оптического измерителя мощности или на методе оптической рефлектометрии OTDR, но в любом случае контроль давления выполняется через изменение дополнительных потерь световой волны в оптическом волокне при механическом воздействии на него. Соответственно, с увеличением давления растут и дополнительные потери в оптическом волокне.

ИИС на основе ВОД может содержать в одном модуле более 100 каналов и столько же точек измерения. Датчики давления располагаются в шпурах, пробуренных в кровле выработки и не могут нарушить технологический процесс производства при добыче угля или как-то мешать производственному персоналу при его работе. Шпур имеет длину от 3 до 7 метров, соответственно можно в одном шпуре размещать до трех ВОД, что при необходимости позволит повысить точность измерения и контроля на проблемных участках призабойных выработок, находящихся в опасности внезапного обрушения кровли. Важным моментом является удобство присоединения ВОД к направляющей сети передачи информации посредством оптических коннекторов и адаптеров типа FS и SC, которые уже длительное время используются в телекоммуникации и имеют малую стоимость и вносимые потери до 0,3 дБ на одно присоединение. Это позволяет исключить опасные процессы сварки в условиях взрывоопасной среды угольной шахты.

Концепция функционирования ИИС на основе ВОД простая, для ее реализации необходим источник лазерного излучения, который формирует импульсы длительностью от 5 нс до 20 мкс, что выбирается в зависимости от длины измерительного канала и длительность импульса увеличивает с его длиной. Источник излучения работает на длине волны 1310 нм и 1550 нм, но возможна его работа на других диапазонах, включая видимый сектор оптического излучения, последний вариант больше приемлем на коротких дистанциях до 5 км. Источник излучения подключается к ВОД через оптический разветвитель для увеличения числа каналов. Между источником света в качестве направляющей системы используется волоконно-оптический кабель, используемый в телекоммуникации, который выполнен из одномодовых волокон, что позволяет практически без ощутимых потерь передавать сигнал на расстояние в 100 км. Основной частью ВОД является одномодовое оптическое волокно и при механическом воздействии на него возникают дополнительные потери, которые можно численно измерить, соответственно, чем выше потери, тем выше механическое давление на волокно. Пущенный импульс частично отражается от места микроизгиба, возникшего при механическом воздействии на ОВ, и возвращается к фотоприемнику, который преобразует его в электрический сигнал для дальнейшей обработки и измерения величины времени задержки сигнала, при этом имеется таймер синхронизации времени отправки сигнала в ОВ и времени прихода отраженного импульса. Это позволяет установить время прямого и обратного хода луча, что в итоге позволяет установить расстояние до места механического воздействия, причем количество точек воздействия может быть не ограничено. Так как скорость света известна, то возможен расчёт расстояния до точки механического воздействия. Нужно учесть тот фактор, что полученные данные при одиночном зондировании ОВ одним световым импульсом могут носить случайный характер и быть ошибочными. Для исключения ошибки необходимо проводить усреднение нескольких значений при формировании результата за определенный период времени измерения. Данный период может быть очень коротким от доли до одной секунды, это также позволит снизить влияние оптического шума, что вполне достаточно для формирования

картины динамики изменения горного давления и создает возможность для его контроля в режиме реального времени. В качестве источника излучения используется полупроводниковый лазер, используемый в системах телекоммуникации. Можно отметить, что лазеры, оптическое волокно, фотоприемники и другое оптическое оборудование ежегодно дешевеет на рынке. Это позволит создавать довольно недорогие ИИС. Важным и наиболее наукоемким элементом ИИС на основе ВОД является блок анализа и обработки данных. Обработка данных выполняется аппаратно-программным комплексом с выводом информации на экран оператора. Можно увидеть численные значения, выдаваемые ВОД в определенных точках мнемосхемы. Также система подает предупредительный сигнал в случае значительных динамических изменений давления в пластах кровли горной выработки и возникновения опасности обрушения. Оператор также может отследить изменение горного давления в течение суток, так как все результаты хранятся в памяти ИИС.

В настоящее время на шахтах Карагандинского угольного бассейна используется анкерная или арочная металлическая крепь. Это давно известная технология крепления и хорошо отработанная, способная отлично справляться с горным давлением. Но не всегда возможно предусмотреть величину горного давления и правильно произвести его расчет. Если при расчетах выбрать величину несущей способность крепи с запасом, то потребуются увеличить финансовые затраты на крепление выработки, так как возрастет ее металлоёмкость, а если несущая способность крепи окажется меньшей или крепление выполнено ненадлежащим образом, то создается опасность внезапного обрушения кровли в результате чрезмерного проседания и отслоения ее от массива, что создает опасность для работников шахты, находящихся под землей. Указанная проблема может еще больше осложниться при возникновении геологических аномалий в угольных пластах.

### ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Были разработаны два метода контроля деформации горной выработки:
  - с размещением оптоволоконного датчика в тело балки монолитной бетонной крепи;
  - с размещением оптоволоконного датчика по внутренней стороне свода горной выработки (с использованием оптического ваттметра и оптического рефлектометра Yokogawa AQ1200E).

При размещении датчика в бетонной крепи при повреждении или полном разрушении волокно остается неповрежденным, но в месте возникновения трещины сохраняется деформация волокна из-за микроизгиба, благодаря чему данную точку можно легко идентифицировать и определить расстояние до нее.

2. Использование одномодового оптического волокна стандарта ITU-T G.652.D (9/125 мкм) для идентификации геотехнического состояния горных выработок является весьма перспективным, так как разработанные на его основе волоконно-оптические датчики обладают достаточно высокой точностью, скоростью измерения и имеют хорошую линейность характеристик. Нежелательно использование волокна с серии Ultra, так как оно имеет более низкую чувствительность к изгибу.

## **ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ**

### **4.1 РАЗРАБОТКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА**

В настоящий момент времени контроль горного давления выработок, закрепленных анкерной и арочной крепью, проводится с помощью реперных станций двойной или тройной высоты, а также визуальным и инструментальными наблюдениями с участием маркшейдеров. Влияние на точность контроля оказывает человеческий фактор, также нужно учитывать внезапность изменения картины горного давления на определенных участках и формирования аварийно-опасных зон обрушения. Длительные наблюдения за проявлениями горного давления показали достаточно острую проблему внезапной деформации крепи, приводящую к существенному сокращению ее сечения, соответственно, возникает необходимость в разработке аппаратно-программных средств мониторинга горного давления, что позволит получить более точный инструмент и при первоначальных его изменениях проводить упреждающие мероприятия по усилению крепления выработок, предотвращая случаи обрушения и деформации арочной крепи. На рисунках 4.1, 4.2 показаны изменения, зафиксированные при разной глубине установки репера (2,1 м, 4 м, 7 м) в течение 60 суток. Измерения проводились на разных участках забоя.

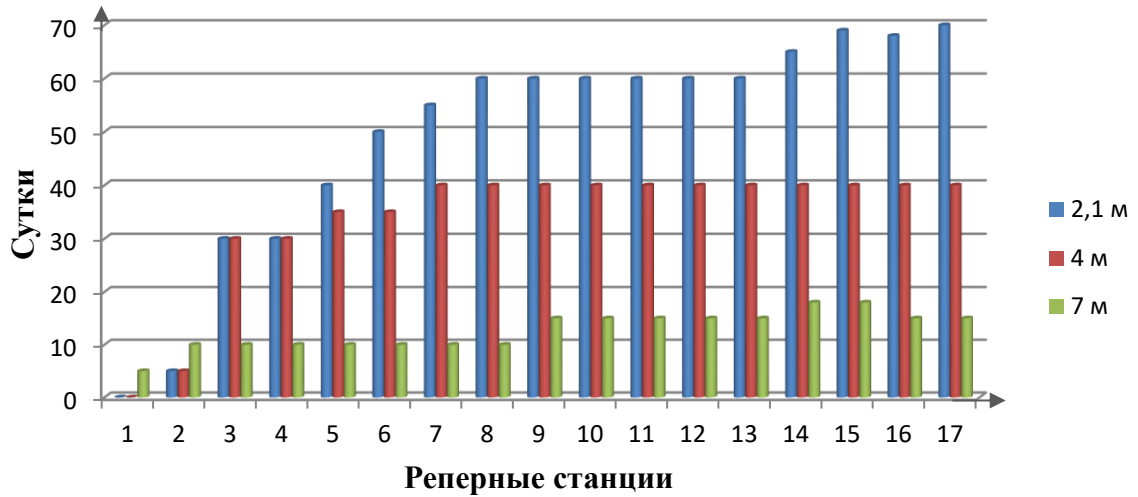


Рисунок 4.1 - Изменения на реперных станциях, установленных в выработке на сопряжении с очистным забоем

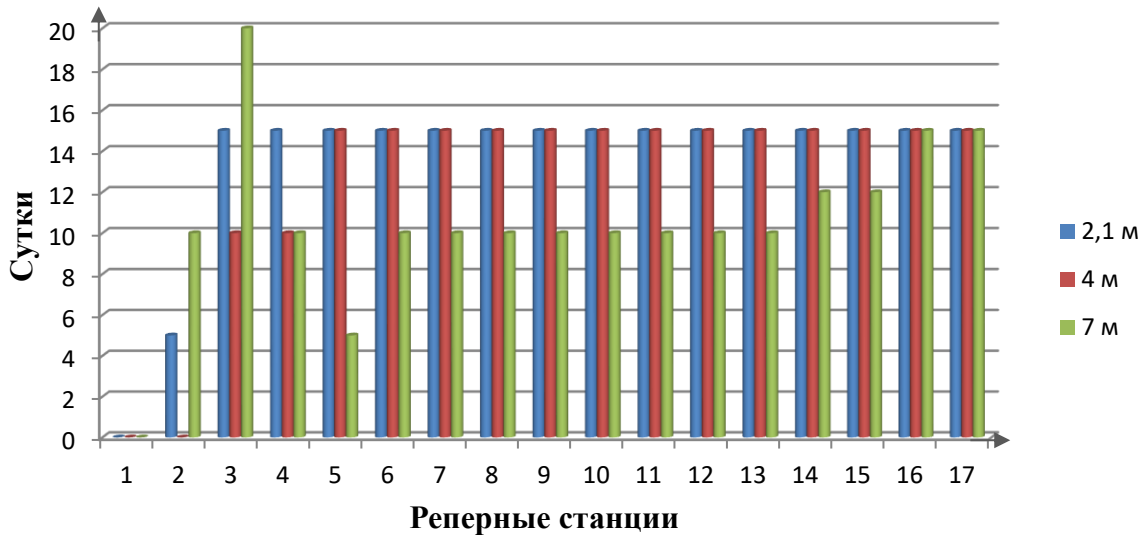
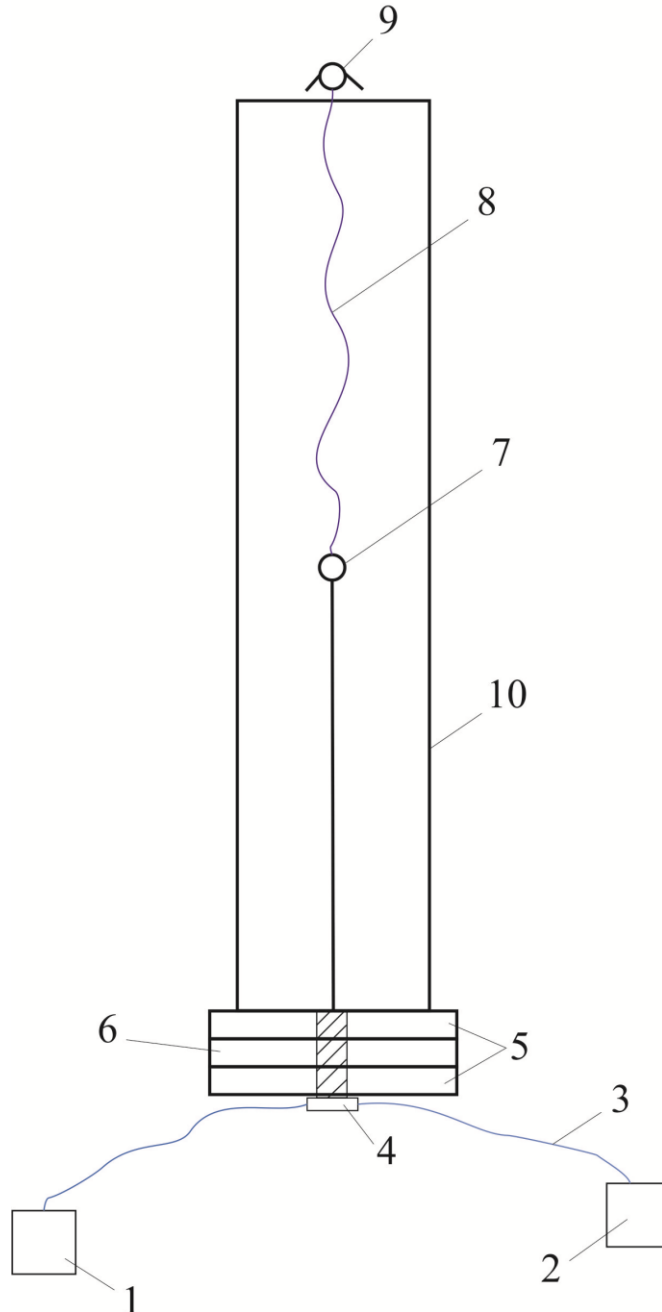


Рисунок 4.2 - Изменения на реперных станциях, установленных в выработке на очистительных сооружениях

Можно сделать вывод, что особое внимание необходимо уделить контролю за горным давлением в местах сопряжения, на выработках с анкерным креплением. Система идентификации геотехнического состояния на основе волоконно-оптических технологий позволит не только повысить уровень безопасности проведения горных работ, но и снизить затраты на крепление и поддержание горных выработок в целом. Оптическое волокно может контролировать не только параметры горного давления, но и шахтную атмосферу, температуру угольных

пластов и другие параметры, можно существенно расширить функции системы идентификации.

Конструкция разработанного волоконно-оптического датчика представлена на рисунке 4.3.



1-оптический ваттметр, 2-источник оптического излучения, 3-оптическое волокно, 4-держатель, 5-стальная пластина, 6-уплотнительный элемент, 7-элемент крепления троса, 8-трос, 9-распор, 10-корпус датчика

Рисунок 4.3 – Конструкция волоконно-оптического датчика



К оптическому ваттметру 1 и источнику оптического излучения 2 подсоединяется оптическое волокно 3, помещенное в корпус 10. Волокно проходит между держателем 4 и уплотнительным элементом 6. С помощью держателя 4 уплотнительный элемент 6 соединен со стальной пластиной 5, которая закрепляется с элементом крепления троса 7, к которому присоединен трос 8, с распором 9 на конце. Смещение горной породы в слоях кровли вызывает смещение распора датчика, который, перемещаясь, вызывает микроизгибы ОВ. Все изменения фиксируются системой идентификации, а программное обеспечение переводит все изменения свойств света в единицы измерения давления. При изменении положения репера изменяются и свойства света, проходящего по ОВ, соответственно датчики будут распределены по кровле выработки в местах установки реперных станций.

Чувствительность разработанного датчика в 5 раз превышает чувствительность применяемых реперных станций. При этом необходимо учитывать, что оператор осуществляет контроль параметров реперной станции визуально, уверенно может заметить смещение уровня репера не менее чем на 5 мм, что является ценой деления. В то время как датчик способен фиксировать изменения в 1 мм дистанционно и непрерывно в режиме реального времени. Диапазон измерений датчика составляет 0-100 мм смещения. Порог чувствительности составляет 1 мм.

Был проведен ряд экспериментов по определению потерь мощности оптического излучения, проходящего по плечам ВОД при различном значении смещения датчика. Измерение значений перемещений датчика осуществлялось многократно с последующей обработкой данных эксперимента и усреднением полученных значений при помощи линейки. Для измерения потерь мощности оптического излучения использовался измеритель оптической мощности VIAVI (JDSU) SmartPocket OLP-38, работающий в динамическом диапазоне от -60 до +26 дБ, с диапазоном длины волны 780-1650 нм. В качестве источника оптического излучения использовался SmartPocket OLS-34/35/36. Результаты экспериментов

представлены графиком зависимости оптических потерь от значения смещений датчика, представлены на рисунке 4.4.

Результаты экспериментов обработаны с учетом наименьшего значения информационного критерия Акаике, выбран лучший вариант аппроксимацией второй степени, при которой коэффициент детерминации  $R^2=0,982$ . Лабораторный образец ВОД на основе интерферометра Маха–Цендера показал высокую линейность и точность при проведении измерений и может быть использован для контроля деформации массива после соответствующей доработки его конструкции.

Аналогом разработанного датчика является ВОД интерферометрического типа на двух одномодовых волокнах, работающий принципу Маха-Цендера. В его состав входят источник оптического излучения (лазер), коллимирующая система с линзами, делители светового потока, микрообъективы, измеритель разности фаз. Условием работы данной схемы является обязательное соблюдение принципа квадратур, откуда вытекает необходимость в стабилизации фазы волны в опорном волокне, используется изоляция от воздействия внешних факторов, для этого используются различные методы стабилизации рабочей точки интерферометра, не приводящие к компактности.

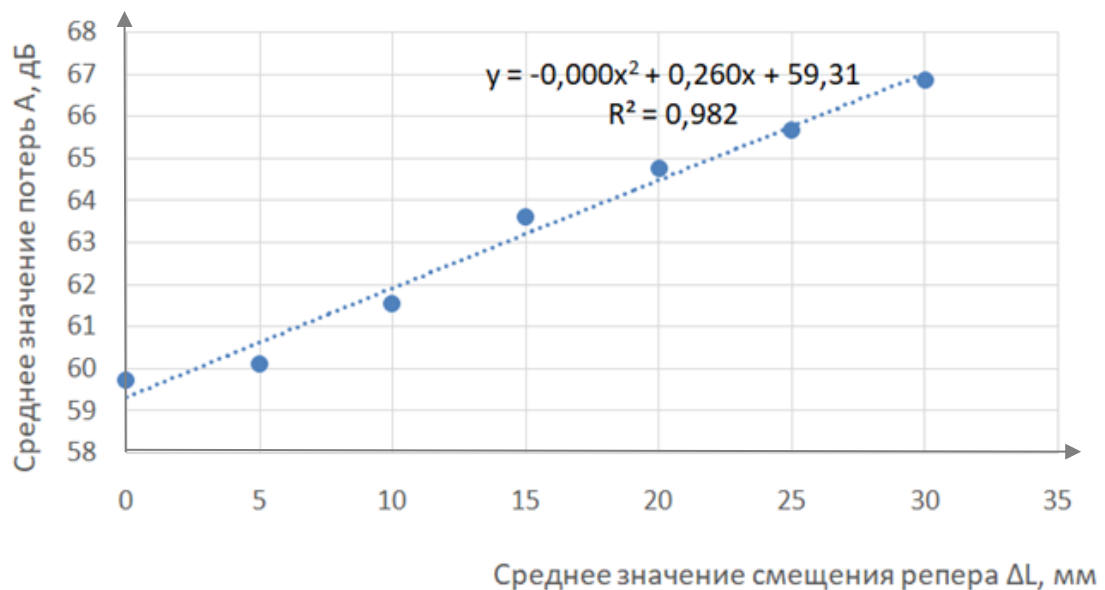
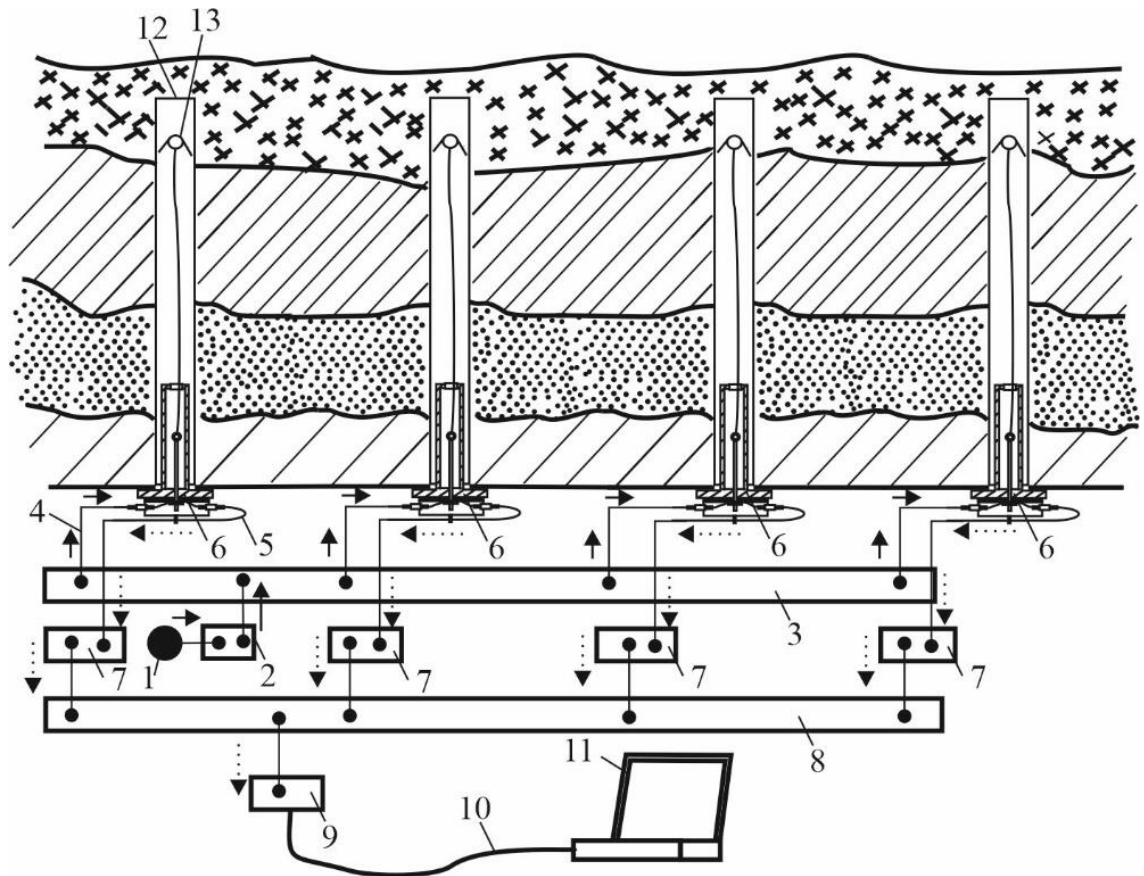


Рисунок 4.4 - График зависимости оптических потерь от значения смещений репера

## 4.1 РАЗРАБОТКА СХЕМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Предложенная квазираспределенная система способна с высокой точностью измерять изменение горного давления и смещение пород кровли в условиях взрывоопасной среды. Для ее создания не требуется дорогостоящее оборудование, связанное с использованием спектроанализаторов и рефлектометров, что позволит существенно снизить стоимость волоконно-оптической системы (ВОС) по сравнению с зарубежными аналогами, что является немаловажным фактором. Структурная схема волоконно-оптической системы контроля идентификации представлена на рисунке 4.5. Предложенная ВОС состоит из источника когерентного излучения 1 с длиной волны в пределах 650 нм мощностью 30 мВт, поляризатора и оптического изолятора 2, оптического разветвителя 3, прямого и обратного волокна 4 и 5, ВОД 6, фотоприемника 7, устройства предварительной обработки данных 8, устройства согласования с компьютером, соединительных кабелей 9 и 10, а также персонального компьютера с программным обеспечением 11, шнура с фиксирующим элементом 12 и 13. В лабораторной версии ВОС используется видимый диапазон красного света, в будущем возможно перейти на диапазоны 1310 или 1550 нм для увеличения протяженности измерительной системы свыше 30 км. Теоретическая протяженность настоящей направляющей линии ВОС составляет 30 км, что вполне достаточно для контроля самых удаленных точек шахты или рудника. Для снижения помех от источника излучения используется оптический поляризатор и изолятор 2. Оптическое излучение разделяется в равных пропорциях в оптическом разветвителе 3, с его помощью происходит разделение оптической мощности излучения источника в пропорции  $\frac{1}{4}$ . Лабораторный образец ВОС имеет 4 канала, но в реальных условиях предприятия может иметь практически неограниченное количество измерительных каналов. В реальных условиях один модуль ВОС использует оптический кросс и

разветвитель с числом каналов до 64, в качестве направляющей системы применяется стандартный телекоммуникационный одномодовый волоконно-оптический кабель. Для присоединения ВОД используются ответвительные коробки. Все присоединения ВОД выполняется при помощи стандартных универсальных адаптеров UPP 2.5 мм и оптических коннекторов типа SC. ВОД подключен при помощи двух оптических волокон прямого и обратного направления движения оптического сигнала 4 и 5 соответственно. ВОД на схеме представлен позицией 6. Направления движения световой волны к ВОД показаны сплошной стрелкой, пунктиром движение световой волны в сторону фотоприемника 7, который фиксирует все изменения интенсивности и формы светового пятна. ВОСМ содержит четыре ВОД и соответственно четыре фотоприёмника на каждый канал. Все четыре фотоприемника подключены в устройство предварительной обработки данных 8. Далее уже электрический сигнал через устройство согласования 9 соединяется через соединительный кабель 10 с компьютером 11. ВОД размещается в шпуре 12, пробуренным в кровле горной выработки. В шпуре располагается фиксирующий элемент 13, к которому прикреплен трос одним концом, вторым концом трос крепится к воздействию элементу ВОД.



1 – когерентный источник лазерного излучения, 2 – поляризатор и оптический изолятор, 3 – оптический разветвитель, 4 - прямое волокно, 5 - обратное волокно, 6 - ВОД, 7 - фотоприемник, 8 – устройство предварительной обработки данных, 9 – устройство согласования с компьютером, 10 – соединительный кабель, 11 - персональный компьютер с программным обеспечением, 12 – шпур, 13 – фиксирующий элемент

Рисунок 4.5 - Структурная схема волоконно-оптической системы контроля идентификации

Калибровка лабораторного образца датчика выполнена при помощи измерителя оптической мощности VIAVI (JDSU) SmartPocket OLP-38. В качестве источника оптического излучения использовался SmartPocket OLS-34/35/36. Данные приборы используются для контроля параметров дополнительных потерь волоконно-оптических линий передачи. Для измерения нагрузки использован электронный динамометр.

Также была исследована квазираспределённая волоконно-оптическая система контроля горного давления ВОД, которая основана на методе контроля

дополнительных потерь. Отличием является обработка изменения формы светового пятна и его интенсивности, параметры контролируются при помощи фотоматрицы. Разработанный метод позволяет более точно производить измерения горного давления и перемещений горной массы, имеет ряд усовершенствований и адаптирован под конкретные условия горных выработок. В качестве сенсора используются три оптических одномодовых волокна стандарта G652, которые одновременно используются как датчик и направляющая система связи между датчиком и устройством обработки. При обработке данных об изменении параметров светового пятна на выходе из волокна, падающего на поверхность фотоматрицы, использованы возможности нейронных сетей. Важным моментом является размещение устройства обработки и вывода информации на поверхности, так как оптический сигнал имеет очень низкие показатели затухания. В отличие от ВОД с решетками Брэгга или ВОД, основанных на методе оптической рефлектометрии Бриллюэна, предложенная схема является более простой и менее затратной. Структурная схема волоконно-оптической системы контроля (ВОСК) представлена на рисунке 4.6.

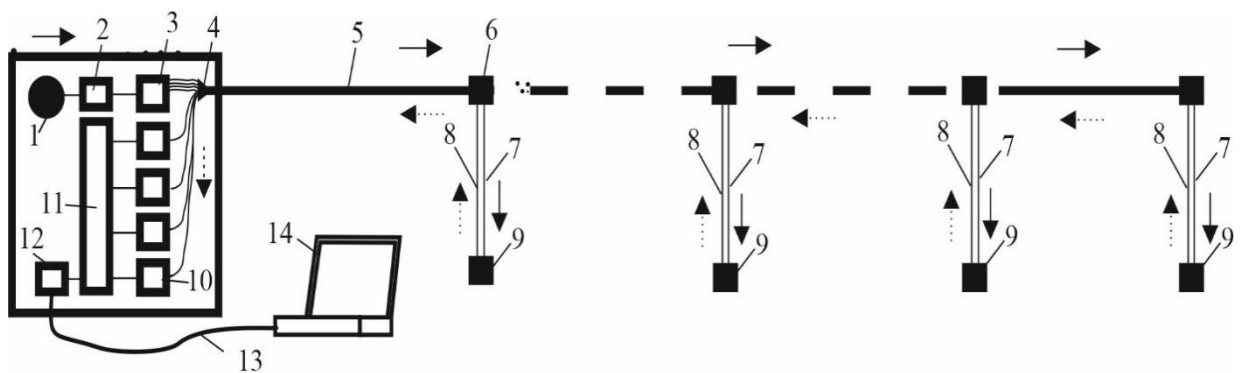


Рисунок 4.6 - Структурная схема системы контроля

Предложенная ВОСК содержит источник когерентного излучения 1 с длиной волны в пределах 650 нм, мощностью 30 мВт. В лабораторной версии ВОСК используется видимый диапазон красного света. Теоретическая протяженность направляющей линии ВОСК составляет 30 км, что вполне достаточно для контроля самых удаленных точек практически любой шахты. Для снижения помех от источника излучения используется оптический поляризатор и изолятор 2.

Оптическое излучение разделяется в пропорции  $\frac{1}{4}$  в оптическом разветвителе 3. Лабораторный образец ВОСК имеет 4 канала, но в реальных условиях предприятия ВОСК может иметь практически неограниченное количество измерительных каналов, один модуль ВОСК может использовать оптический кросс и разветвитель с числом каналов до 64. ВОСК содержит устройство ввода и вывода оптических волокон 4. В качестве направляющей системы используется стандартный телекоммуникационный одномодовый волоконно-оптический кабель 5, для присоединения используются ответвительные коробки 6. Все присоединения ВОД выполняются при помощи стандартных универсальных адаптеров UPP 2.5 мм и оптических коннекторов типа SC, так как сварочные работы запрещены в условиях взрывоопасной атмосферы угольной шахты. ВОД подключен при помощи двух оптических волокон прямого и обратного направления движения оптического сигнала, это позиции 7 и 8 соответственно. ВОД на схеме представлен позицией 9, который размещается в шпуре пробуренной в кровле горной выработки. На схеме обозначены направления движения световой волны, к ВОД сплошной стрелкой и пунктиром движение волны в сторону фотоприемного устройства 10, которое фиксирует все изменения интенсивности формы светового пятна. ВОСК содержит четыре ВОД - соответственно четыре фотоприёмных устройств по одному на каждый канал. Все четыре фотоприемника подключены в устройство предварительной обработки данных 11. Далее уже электрический сигнал, ВОСК через устройства согласования 12 соединяется с компьютером 14 через соединительный кабель 13.

Важным элементом ВОСК является ВОД, который по своей конструкции отличается простотой, а по себестоимости производства будет не выше типовой реперной станции, что весьма важно. Предложенный ВОД имеет ряд общих элементов с типовой конструкцией реперной станции и не имеет сложных технологических деталей. Его отличием от существующей конструкции является использование одномодового волокна в качестве чувствительного элемента. Упрощенная схема показана на рисунке 4.7.

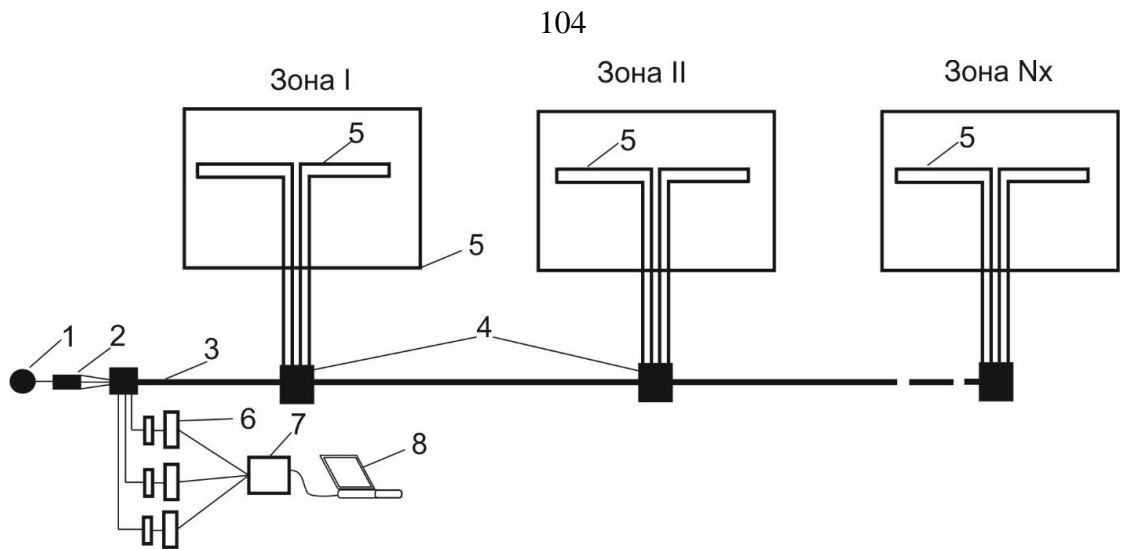
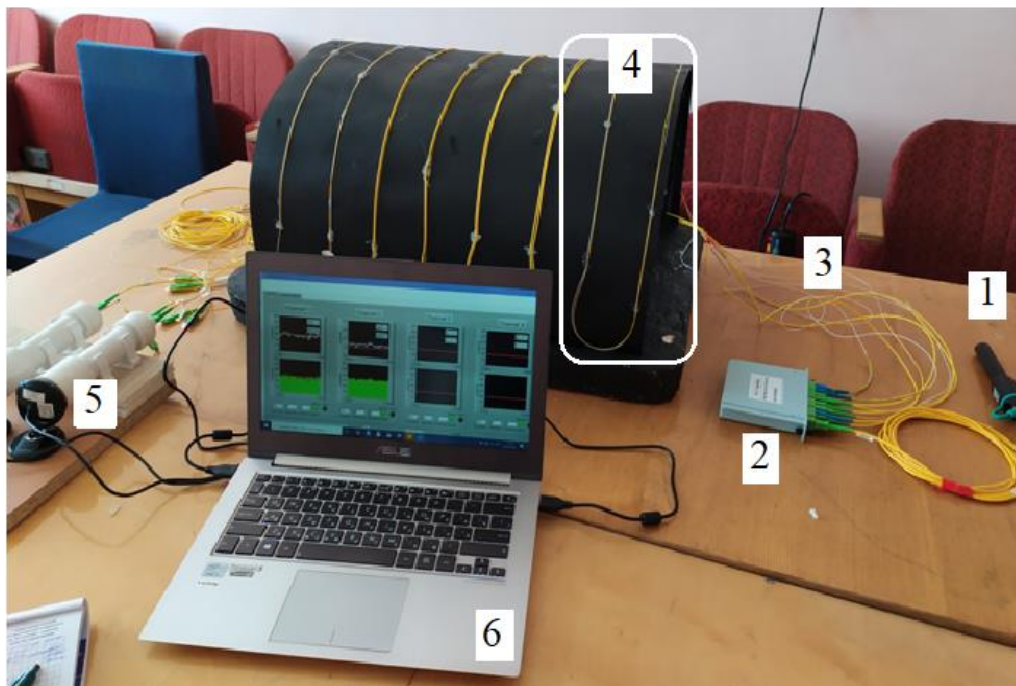


Рисунок 4.7 - Упрощенная схема волоконно-оптических систем на основе контроля дополнительных потерь в ОВ с размещением сенсоров по зонам

На практике данная схема представлена лабораторным стендом на рисунке 4.8, но исключая устройство обработки, данные с фотоприемника сразу поступают в компьютер и обрабатываются аппаратно-программным комплексом.



1 – полупроводниковый лазер, 2 – оптический разветвитель, 3 – оптическое волокно, 4 – зона, 5 – фотоприемник, 6 - компьютер

Рисунок 4.8 - Схема волоконно-оптической системы на основе контроля дополнительных потерь в ОВ с размещением сенсоров по зонам



Далее были построены и проанализированы зависимости, связывающие потери в оптическом волокне и давление на определенную зону. В эксперименте рассматривались 3 варианта:

- 1 зона состоит из двух оптических волокон с оболочкой 900 мкм;
- 2 зона состоит из оптических волокон с оболочками 900 мкм и 2 мм;
- 3 зона состоит из оптических волокон с оболочками 2 мм.

Матрица фотоприемника улавливает дифракционные пятна основной световой моды двух волокон в одной зоне, совмещая их. Экспериментальные данные обработаны и представлены на рисунке 4.9.

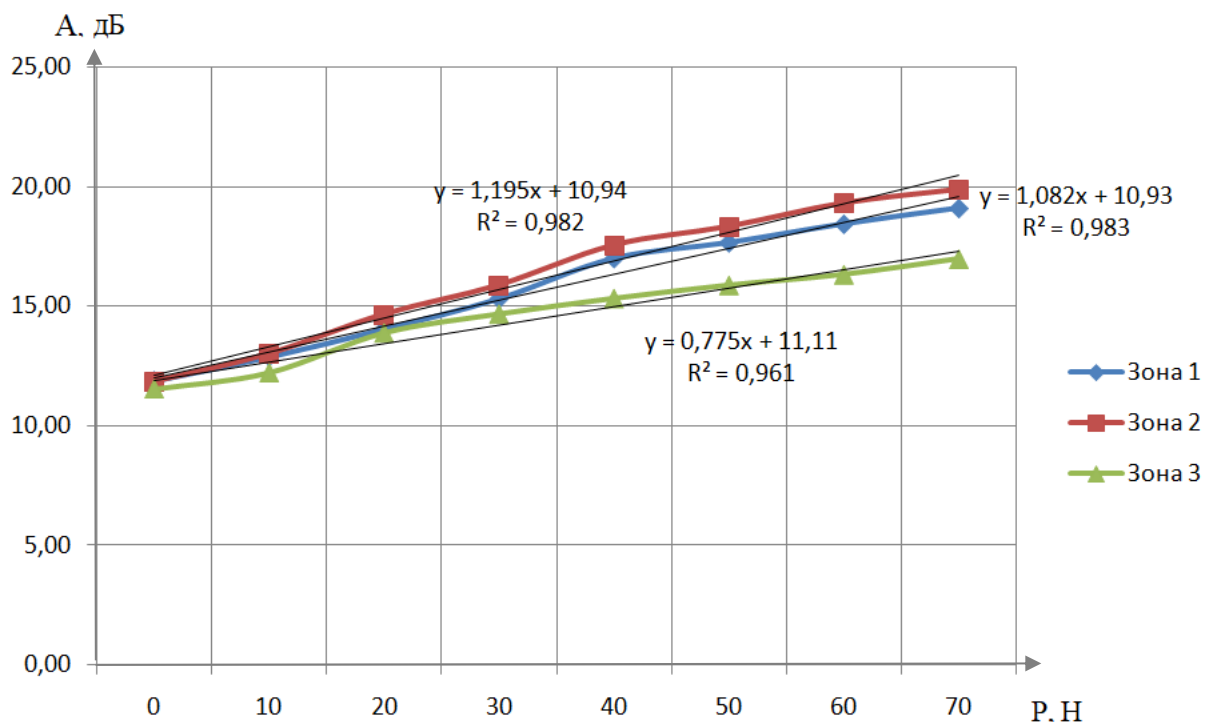


Рисунок 4.9 - График сравнения потерь на волоконных линиях в разных зонах

Анализ аналитических зависимостей позволяет утверждать, что в качестве сенсора предпочтительней использовать два волокна с оболочками 900 мкм и 2 мм, что связано с большей чувствительностью.

При любом механическом воздействии на сенсор происходит изменения свойств света, проходящего по сенсору, возникают дополнительные потери и изменение фазы световой волны, что и фиксирует фотоприемник. Далее микропроцессорное устройство производит анализ полученных данных и выдает

решение о срабатывании системы. Важным моментом является разработка программного обеспечения, позволяющего эффективно бороться с помехами.

## 4.2 АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС

Аппаратно-программный комплекс — это техническое решение концепции алгоритма работы сложной системы, управление которой осуществляется, как правило, исполнением кода из определённого базового набора команд (системы команд), в состав которого входят технические средства и программное обеспечение, совместно применяемые для решения задач определенного типа.

Процесс объектно-ориентированного анализа в контексте разработки программного обеспечения является одним из первых и определяющих этапов создания программы. Модель объектно-ориентированного анализа должна описывать объекты, составляющие вместе с различными структурными и динамическими отношениями саму исследуемую систему. Модель объектно-ориентированного анализа должна служить формализованным представлением исследуемой системы и определять те объекты, которые выступают в качестве организационных структур этой системы, а также различные правила и ограничения, накладываемые на отношения объектов между собой и внешней средой.

Программно-аппаратный комплекс для системы идентификации геотехнического состояния горных выработок с использованием распределенной системы волоконно-оптических сенсоров создан на графическом языке программирования «G» в среде разработки LabVIEW 2018. В состав аппаратно-программного комплекса входят:

- персональный компьютер (ПК);
- волоконно-оптический датчик;
- веб-камера;
- источник света;
- источник питания для источника света;
- программное обеспечение.

Программное обеспечение, входящее в состав аппаратно-программного комплекса, является простым в использовании и позволяет вносить изменения в информационный интерфейс. Комплекс осуществляет сбор, обработку и анализ данных с волоконно-оптических датчиков.

Использовать подобные комплексы можно везде, где необходимо обеспечить связь устройств, не используя при этом дорогостоящий кабель, который к тому же является искробезопасным. Очень удобно с помощью данного комплекса связывать охранные датчики и исполнительные устройства с управляющим вычислительным устройством.

Блок-схема технического средства, принцип которого основан на компьютерной обработке видеосигналов с расчетом значений информативных параметров представлен на рисунке 4.10.

- 1 блок – диалоговое окно настройки видеорежимов веб-камер (рисунок 4.11);
- 2 блок – временный буфер в участке оперативной памяти для видеоизображения (рисунок 4.12);
- 3 блок – копия буфера;
- 4 блок – эталонное видеоизображение;
- 5 блок – открытие видеосессии в режиме реального времени;
- 6 блок – запуск модуля компьютерного зрения; блок, который изменяет яркость/контраст в заданной области для минимизации искажений измерений, происходит при изменении уровня яркости от максимального к минимальному (рисунок 4.13);
- 7 блок – определяет количество пикселей, сравнивает и отображает;

8 блок – сравнение измеренного значения в пикселях с установленным пороговым значением (рисунок 4.14);

9 блок – таймер;

10 блок – счетчик;

11 блок – сигнальный элемент;

12 блок – блок, закрывающий видеосессию и очищающий выделенную память.

Количество камер в блоке 1 может варьироваться от 4 до 8. Использование более трех веб-камер позволяет повысить точность мониторинга.

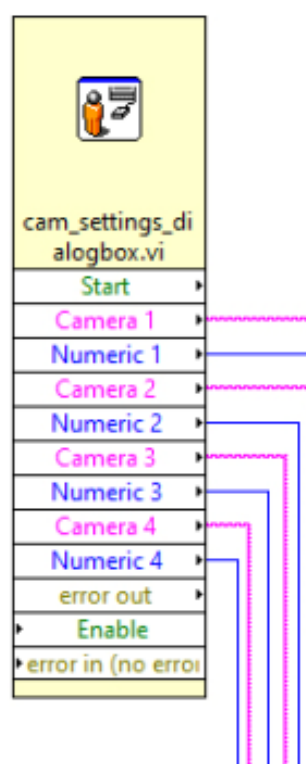


Рисунок 4.11 - Блок, запускающий программу

Предложенная аппаратно-программная схема модульного типа имеет ряд преимуществ:

- эффективное взаимодействие модулей посредством стандартного интерфейса;
- возможность наращивания модулей обработки;
- быстрое изменение вводных параметров.

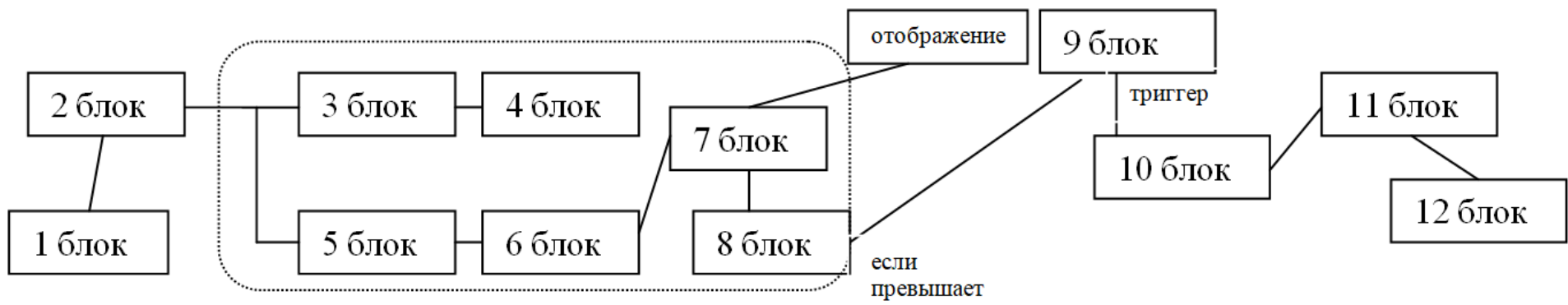


Рисунок 4.10 - Блок-схема программного обеспечения аппаратно-программного комплекса

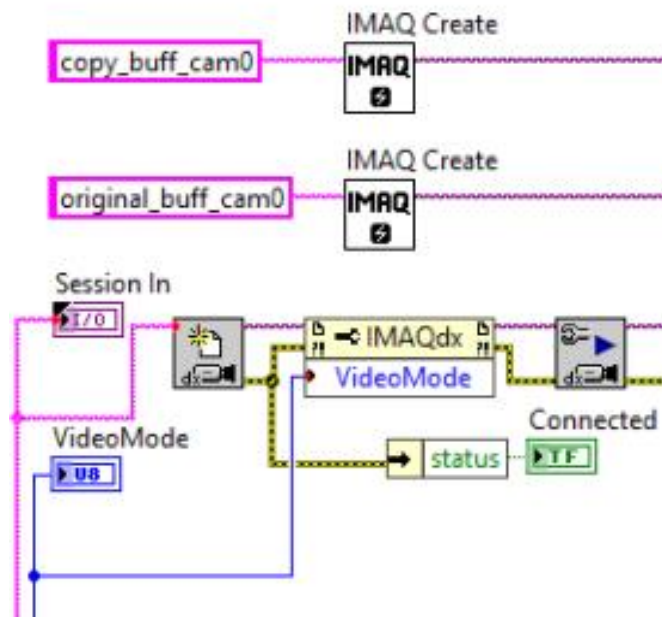


Рисунок 4.12 - Участок блок-схемы, отвечающий за сохранение информации

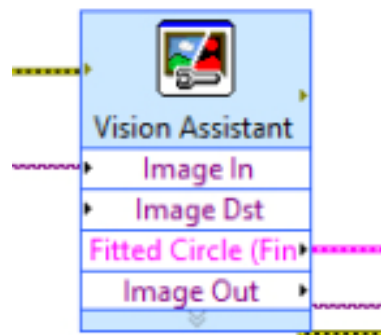


Рисунок 4.13 - Участок блок-схемы, запускающий модуль компьютерного зрения

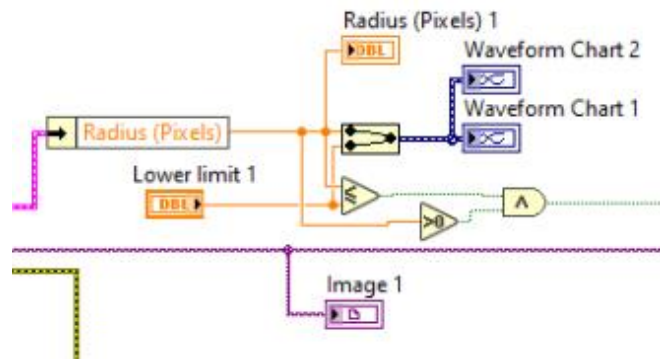


Рисунок 4.14 - Участок блок-схемы, обеспечивающий сравнение дифракционного пятна

Такой подход позволяет эффективно реализовывать алгоритмы анализа изображений, дает возможность проведения тестирования комплекса для обеспечения оптимального режима его работы. Экспериментально определен наиболее оптимальный режим работы камеры, в котором достигаются требуемые условия для проведения исследований процессов деформации и разрушения.

Для распознавания и последующего анализа видеопотока с веб-камер использован модуль машинного зрения Vision Development. Интерфейс аппаратно-программного комплекса показан на рисунке 4.15.

В интерфейсе представлены 2 зоны из четырех, на которые поделен весь контролируемый участок. На данном экране показаны 2 зоны, они подключены к камерам и находятся под наблюдением. Контролируемые параметры, устанавливаемые оператором, показаны внизу окна :

- Event limit - количество событий в течение заданного времени;
- Event time - время срабатывания или период времени, в течение которого измеряемый параметр превышает верхний лимит;
- Lower limit – верхний порог срабатывания.



1 – пороговое значение, 2 – количество срабатываний, 3 – период времени срабатываний, 4 – среднее значение амплитуды, 5 – мгновенное значение амплитуды, 6 – окно фиксации времени срабатывания

Рисунок 4.15 - Интерфейс аппаратно-программного комплекса

Числовая апертура ( $NA$ ) – это синус максимального угла падения луча света на торец волокна, при котором выполняется условие полного внутреннего отражения. Этот параметр определяет количество мод, распространяющихся в оптическом волокне. Также величина числовой апертуры влияет на точность, с которой должна производиться стыковка оптических волокон друг с другом и с другими компонентами линии [74].



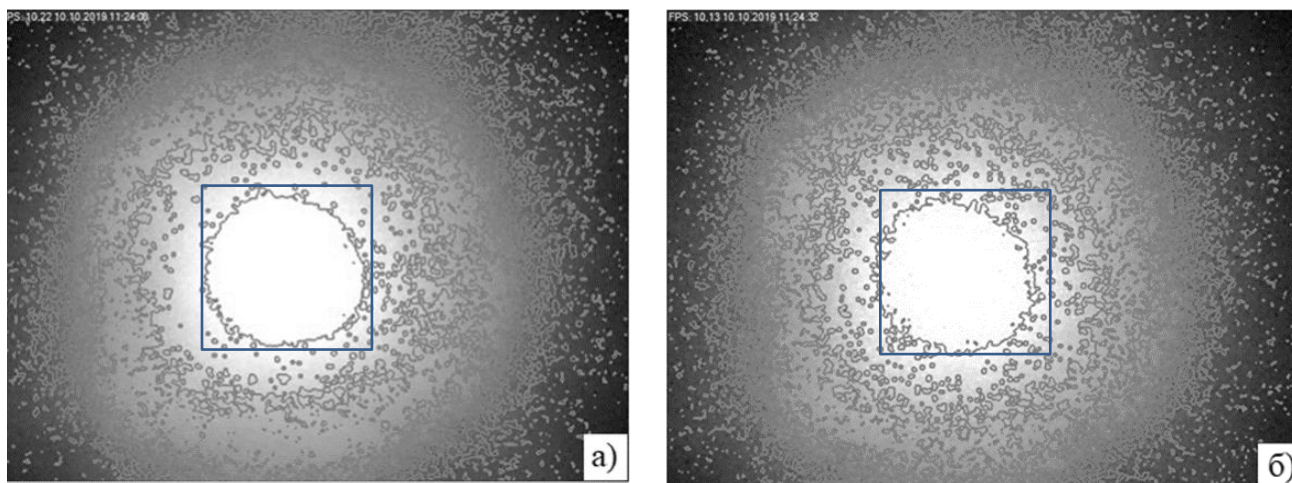
Аппаратно-программный комплекс настраивается путем проведения натуральных экспериментов, при этом устанавливаются параметры: пороговое значение срабатывания 1, количество событий в течение заданного времени 2 и период времени 3, в течение которого измеряемый параметр превышает пороговое значение. Значение смещения ниже установленного считается безопасным для проведения горных работ. В случае возникновения смещения дифракционное пятно изменяется и количество пикселей сокращается, что позволяет получить численные значения измерений величины смещения горных пород. Среднее 4 и мгновенное значение 5 амплитуды (количество пикселей дифракционного пятна) для каждой зоны высчитывается отдельно. В случае изменения геотехнических параметров, аппаратно-программный комплекс после фиксации камерой изменений дифракционного пятна способен оценить ситуацию аварийного обрушения и подать предупреждающий звуковой сигнал 6 с одновременной фиксацией времени срабатывания и сохранением на жестком диске.

Программа-интерфейс пользователя выполняет следующие функции:

- обеспечивает ввод/вывод данных, необходимых для управления процессом, а именно для установки начальных параметров;
- выполняет обработку данных, вводимых пользователем и получаемых от камер со всех подключенных зон в соответствии с задачами управления.

Предложенный способ идентификации геотехнического состояния горных выработок реализуется путем сравнения апертур световых пятен. Дифракционные пятна в состоянии покоя горной выработки и после фиксирования изменения геотехнического состояния представлены на рисунке 4.16. При настройке начальных параметров было установлено пороговое значение 140 пикселей, что соответствует давлению горного массива 15 МПа (измерение проводилось при помощи измерительной системы гидравлической стойки) (рисунок 4.16, а). После срабатывания предупреждающего звукового сигнала количество пикселей составило 165, что соответствует изменению смещения на 7 мм, давление при этом составило 17 МПа (рисунок 4.16, б). Характер пятен позволяет сделать вывод, что зависимости, полученные при лабораторных экспериментах, соответствуют

полученным при натурных. Метод включает в себя регистрацию, обработку и анализ оптических изображений.



а – в момент настройки, соответствует 140 пикселям, б – при смещении на 7 мм, соответствует 165 пикселям

Рисунок 4.16 - Дифракционные пятна

Физические основы создания датчиков давления на основе изменения коэффициента преломления при микроизгибе оптического волокна типа G.652 можно выразить через изменение дифракционного пятна, падающего на поверхность фотоприемника. По апертуре заметно, что при деформации ОВ световое пятно меняет свою форму, что отражается во второй вкладке программы аппаратно-программного комплекса (рисунок 4.17).

В процессе измерений происходит сравнение диаметра дифракционного пятна в пикселях, если количество пикселей уменьшается после изменения моды света, то счетчик срабатывает и происходит фиксация времени, а также звуковое сопровождение.

При исследованиях функционирования комплекса были получены зависимости изменения потерь в оптическом волокне (зависящего от изменения количества пикселей дифракционного пятна) от приложенного давления на волоконно-оптический датчик. График зависимости представлен на рисунке 4.18.

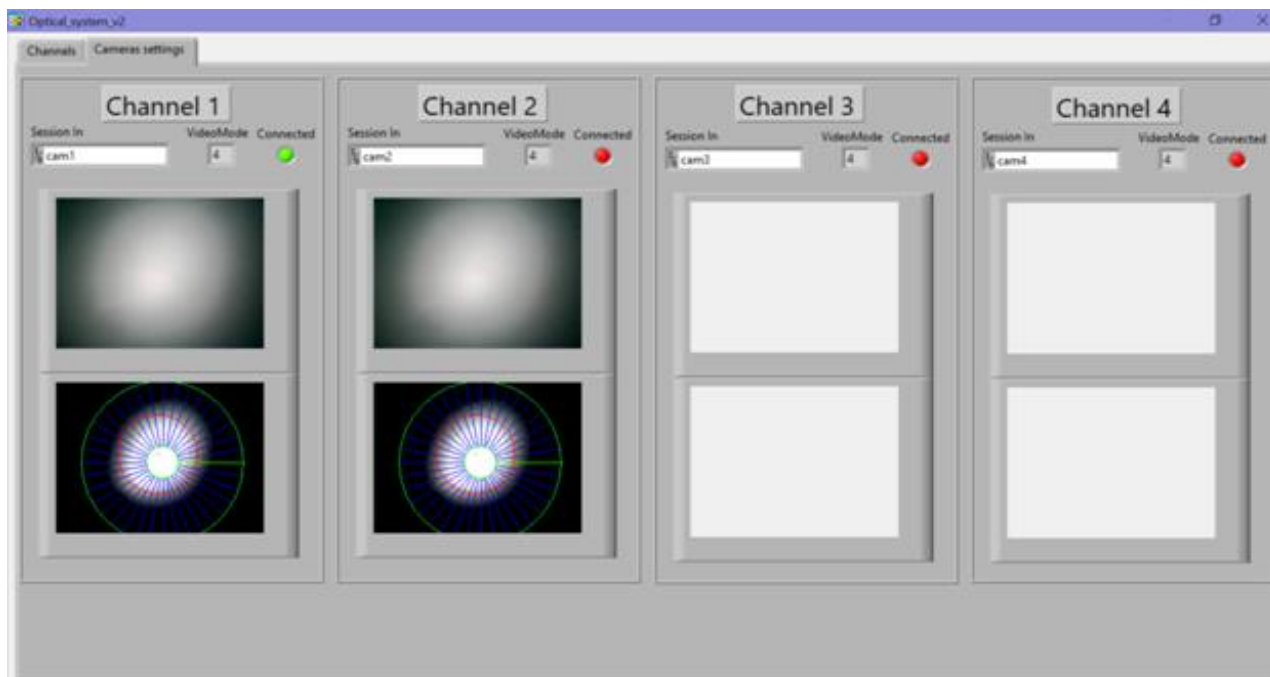


Рисунок 4.17 - Изменение дифракционного пятна в интерфейсе аппаратно-программного комплекса

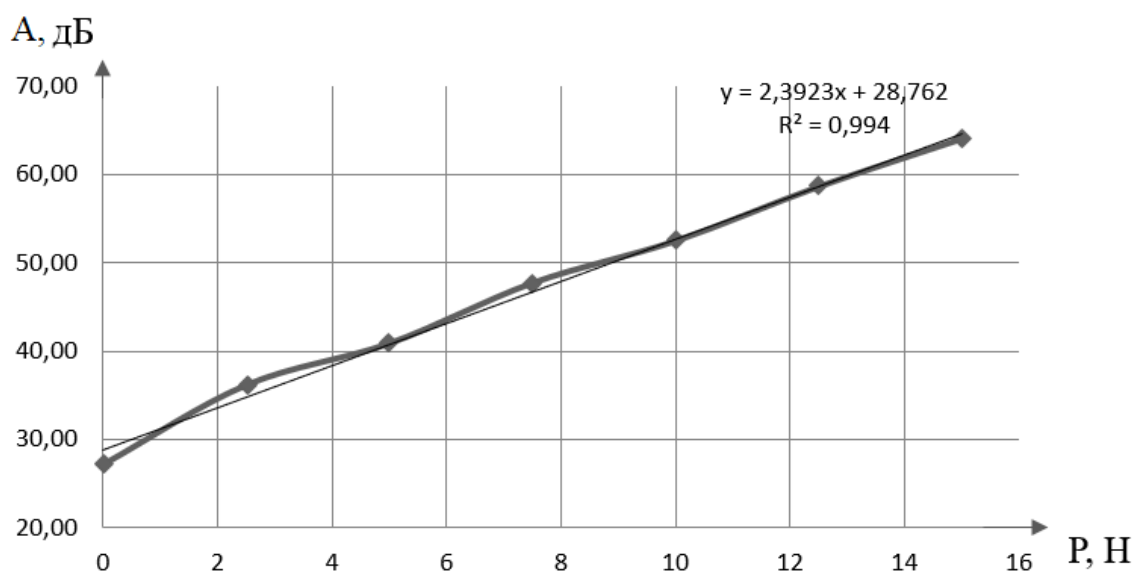


Рисунок 4.18 - График зависимости потерь от приложенного давления

Также была получена зависимость интенсивности света от приложенного давления (рисунок 4.19). В математической форме это выражается следующим образом:

$$I(t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \frac{dP}{ds} dt, \quad (4.1)$$

где  $T$  – период волны,

$dP$  – мощность, переносимая волной через площадку,

$dS$  - площадь поверхности фотоприемника.

Интенсивность волны связана со средней плотностью энергии  $W$  в волне и скоростью распространения волны в выражении (4.2)

$$I = Wv, \text{ Вт/м}^2, \quad (4.2)$$

где  $W$  - плотность энергии в волне,

$v$  - скорость распространения световой волны.

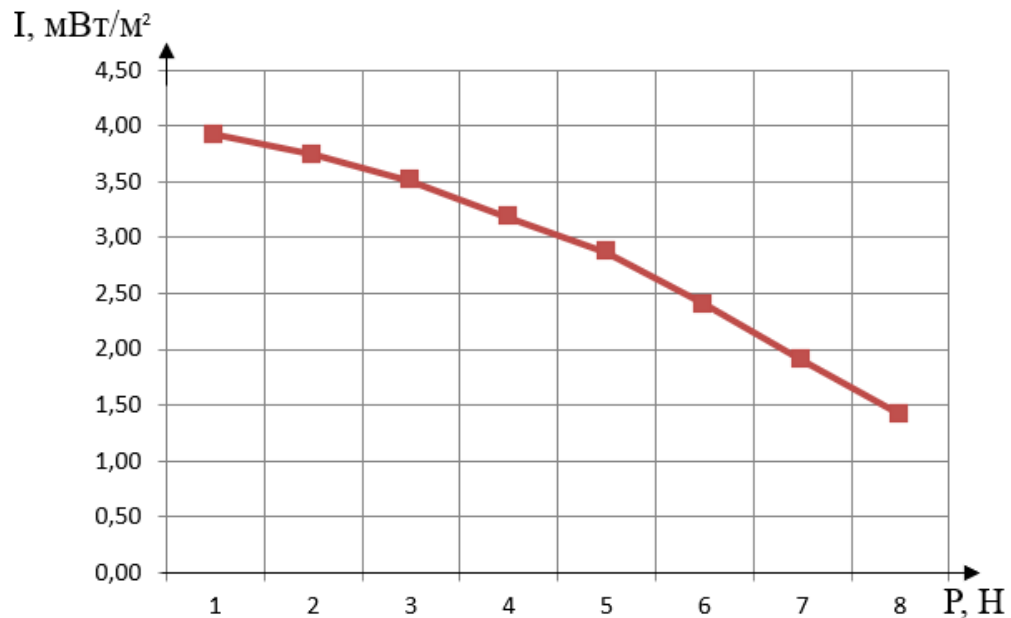


Рисунок 4.19 - График зависимости интенсивности света от приложенного давления

К разработанному устройству предъявлялись следующие требования: оперативность контроля, непрерывность контроля, количественная оценка напряженного состояния, помехозащищенность, искро- и взрывобезопасное исполнение, защищенность от агрессивного влияния окружающей среды в шахте, мониторинг и архивирование изменения напряженного состояния на контролируемом участке массива горных пород, устройство должно быть надежным, устройство должно осуществлять индикацию степени удароопасности,

в устройстве должна быть обеспечена возможность оперативной корректировки. Все требования выполнены.

Данный метод обеспечивает высокую помехозащищённость каналов. Информация обрабатывается в едином программном обеспечении и проанализирована по единой временной шкале.

К преимуществам аппаратно-программного комплекса можно отнести возможность вести разработку конфигурации и вносить изменения в режиме онлайн, (то есть не останавливая процесса управления), возможность менять вышедшее из строя оборудование (например, веб-камеру) без отключения питания.

Аппаратно-программный комплекс разработанной системы способен оценивать изменение интенсивности светового пятна на выходе из волокна при помощи алгоритмов искусственного интеллекта. Формируется библиотека пятен, с помощью которой проводится обучение системы, для реагирования на изменения и оценивания различного рода помех. Встроенная сигнализация имеет разделение по каналам, индикацию от срабатывания и звуковой сигнал. Все тревожные сигналы автоматически записываются и хранятся жёстком диске компьютера до востребования. Аппаратно-программный комплекс способен работать в оптическом диапазоне от 470 до 1625 нм, в эксперименте использовался монохроматический когерентный источник света с длиной волны оптического излучения 650 нм.

Исключение ложного срабатывания обеспечивается за счет обработки сигнала с помощью программного обеспечения с обязательной температурной коррекцией.

Методика проведения контроля идентификации геотехнического состояния основана на численной оценке изменения параметров оптической волны, проходящей через ОВ при механическом воздействии на него с учетом фотоупругого эффекта и температурной коррекции, что позволяет осуществлять одновременный контроль в нескольких десятках точек измерений в автоматическом режиме.

Также была разработана вторая версия программного обеспечения, входящего в состав аппаратно-программного комплекса, написанного на интерпретируемом языке программирования Python с использованием открытой библиотеки компьютерного зрения OpenCV. Интерфейс программы написан Tkinter (от англ. Tk interface) — кросс-платформенная событийно-ориентированная графическая библиотека на основе средств Tk. Окно калибровки камеры показано на рисунке 4.20.

Комплекс осуществляет сбор, обработку и анализ данных с волоконно-оптических датчиков.

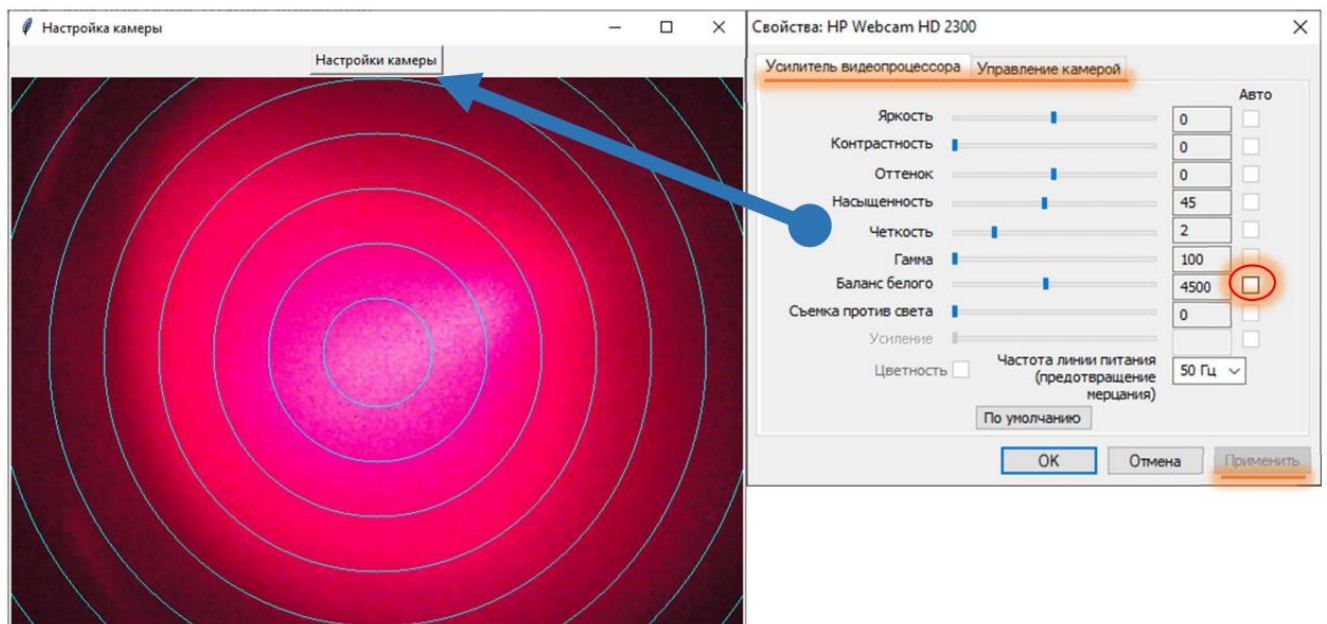


Рисунок 4.20 – Окно калибровки в аппаратно-программном комплексе

Запуск в режиме отладки запускает программу в режиме показа поступающих и обрабатываемых данных (рисунок 4.21).

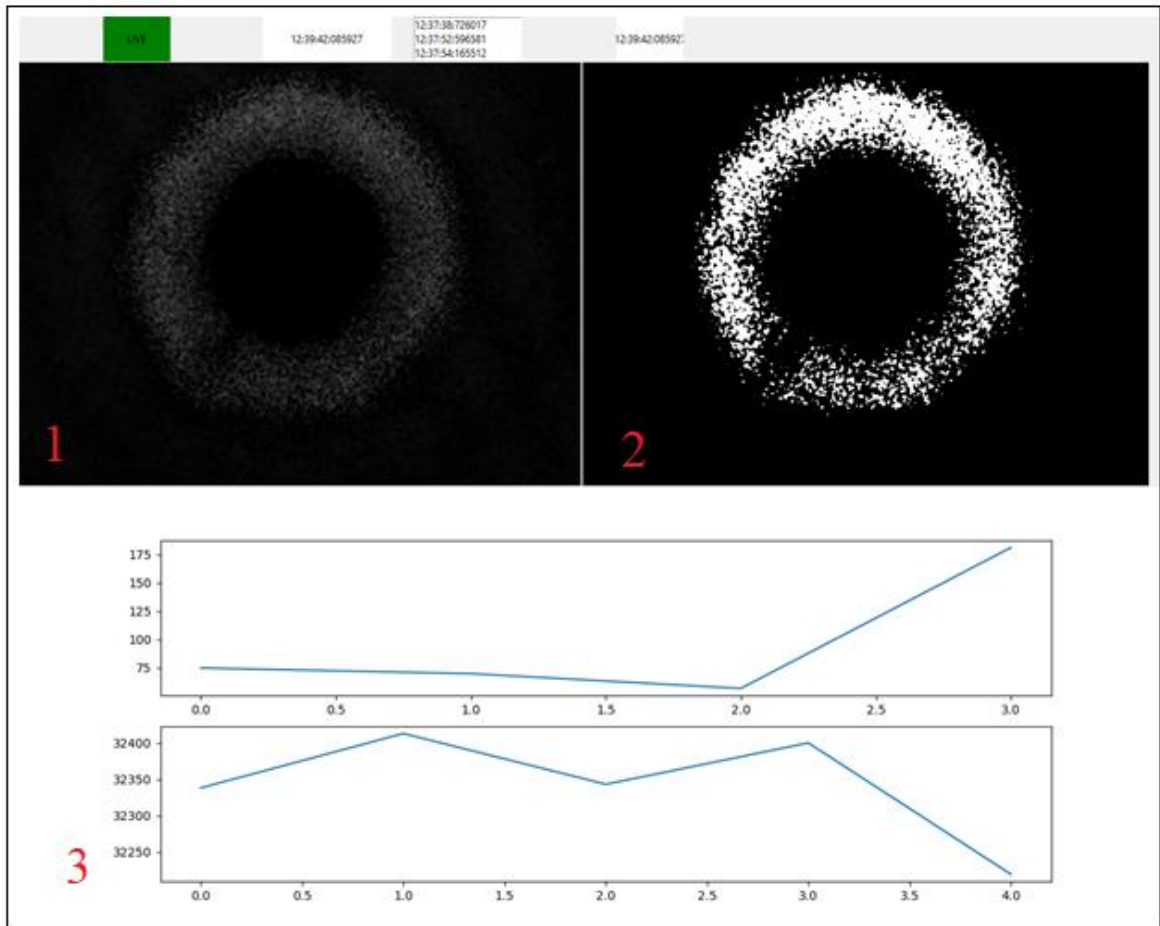


Рисунок 4.21 – Окно аппаратно-программного комплекса в режиме отладки

Окно 1 показывает разницу между эталоном и текущим изображением. Окно 2 показывает количество сработавших пикселей (серых точек), превысивших пороговое значение, перешедшее затем в белые пиксели. В окне 3 представлены графики, верхний показывает разницу (мгновенную скорость изменения количества белых пикселей) между двумя последовательными значениями количества белых пикселей во времени, нижний график показывает общее количество белых пикселей в каждом последовательном изображении. Запуск в фоне запускает программу в реальном времени.

Устанавливается пороговое значение цвета пикселя в градациях серого (от 0 до 255), при котором произойдет срабатывание (превращение его в белый) для подсчета.

В предложенном способе количество кадров с камеры усредняется и после снижения шумов камеры объединяется в одно изображение. В среднем камера

снимает 30 кадров в секунду. Количество изображений (измерений значений) за один период детекции служит для построения графиков скорости изменения.

При превышении количества пикселей происходит изменение, отображаемое в полоске детекции (рисунок 4.22). Полоска детекции отражает количество изменений и разделена на 5 блоков по 20%, при этом максимальное значение задается из значения порога срабатывания. При заполнении происходит срабатывание, при этом подается звуковой сигнал.

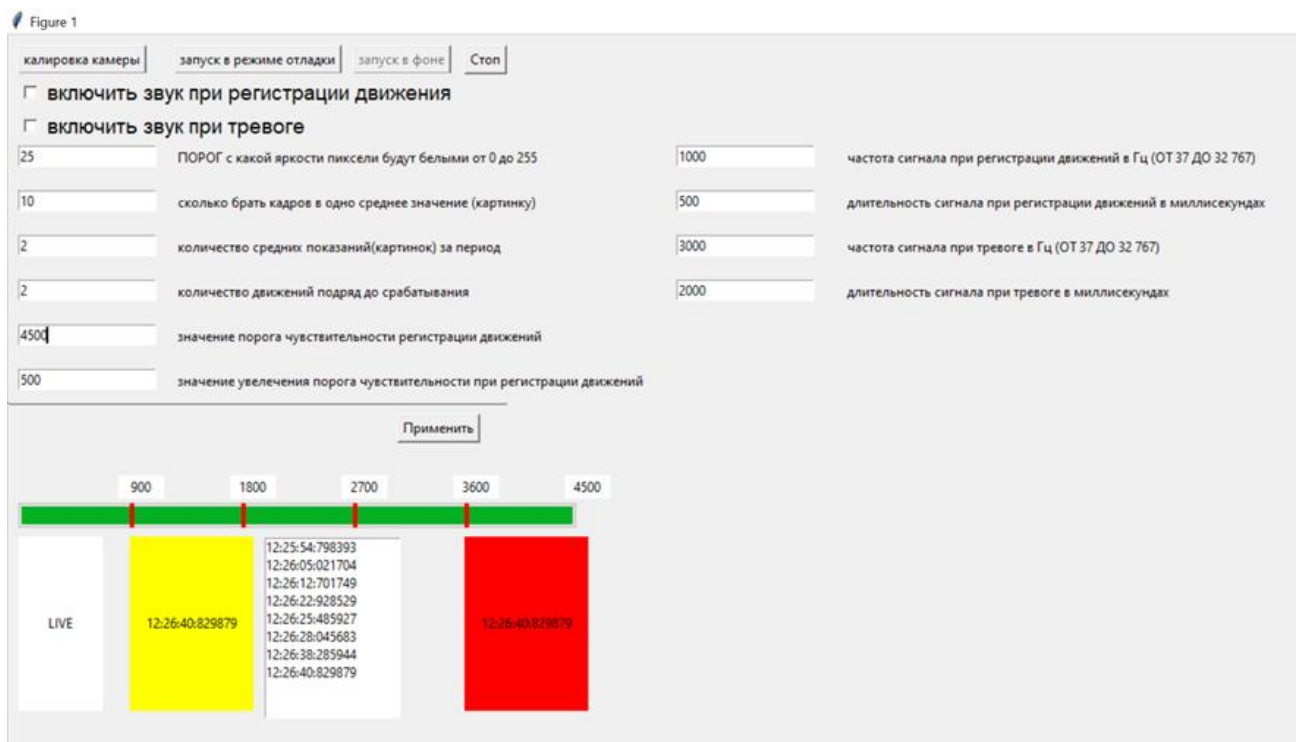


Рисунок 4.22 – Окно программы, показывающее полоску детекции

Реализация данного аппаратно-программного комплекса перспективна для дальнейшего исследования.



### 4.3 ПРАКТИЧЕСКАЯ АПРОБАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Разработанный аппаратно-программный комплекс на основе оптоволоконного датчика был представлен на заседании технологической службы шахты им. Костенко Угольного департамента АО «Арселор Миттал Темиртау», протокол и заключение о возможности использования представлены в приложениях Б.

Шахта им. Костенко расположена в г. Караганде. Состав породы по слоям: пласт К2 сложен 10-ю пачками полуматового и полублестящего трещиноватого угля, мощностью 0,05-0,8 м и разделяющими их прослоями аргиллитов, углистых аргиллитов и песчаников, мощностью 0,03-0,08 м. Мощность межпластья представлена алевролитами.

Угол падения пласта в месте отхода	8-9 град.
Выход летучих	26,4%
Общая мощность пласта	4,7-5,0 м
Влажность угля	4-4,5%
Газоносность угля	14,8 м <sup>3</sup> /т
Крепость угля по шкале Протоdjяконова М.М.	1,5-2,0
Склонность к самовозгоранию	склонный
Опасность по взрывчатости угольной пыли	опасный

При установке датчика в кровле выработке пробуривается шпур на длину 4,2 м как можно ближе к забою выработки, между двумя рядами анкеров. Отслоение кровли в месте установки репера быть не должно. С помощью досыльника равномерно, без рывков распор посылается в шпур, одновременно удерживая тросик в натяжении. Доведя распор в шпуре до отметки, извлекается досыльник. В

устье шпура закрепляется держатель с упругим элементом. Волоконно-оптические датчики устанавливаются через 20 метров при анкерном креплении.

Как показано на рисунке 4.23, лабораторный образец волоконно-оптического датчика состоит из источника лазерного излучения, мощность которого возможно изменять от 10 до 50 мВт с длиной волны 650 нм. Датчик представляет собой металлическую станину с элементами, имитирующими натяжение троса при смещении пород кровли. При натяжении троса происходит перемещение шпильки, тем самым оказывается воздействие на чувствительный элемент, который находится между шайбой и упругим элементом. Для фиксации изменения интенсивности отраженной световой волны телевизионной матрицы использовалась веб-камера с разрешением 1080P.



Рисунок 4.23 - Лабораторный образец волоконно-оптического датчика

Разработанная ВОС позволит контролировать горное давление и смещение пород кровли выработки без необходимости выполнения обхода реперных станций маркшейдером. ВОСК строится по блочно-модульной схеме и может быть легко расширена до требуемого количества каналов. Все оборудование размещается в стандартном телекоммуникационном 19-дюймовом шкафу типа 40U (1U=44.45 мм). Там же расположен оптический кросс и источник питания. Компьютер с программным обеспечением и монитором располагается на отдельном столе в удобном для оператора месте. Измерительная часть ВОСМ находится в атмосфере призабойного пространства и связывается с находящимся на поверхности устройством обработки данных посредством волоконно-оптических кабелей. Волоконно-оптическая направляющая система проходит по горизонтальным выработкам шахты и через вертикальный ствол в скважину, выходит на поверхность, где установлен пульт оператора. Соответственно, нет оборудования, использующего электрические сигналы и находящегося во взрывоопасной атмосфере подземных горных выработок. Это является главным условием безопасности проведения горных работ шахты им. Костенко УД АО «АрселорМиттал Темиртау», что позволит пройти сертификацию оборудования в будущем и делает возможным внедрение ВОС.

Производительность системы контроля идентификации геотехнических параметров была опробована в полевых условиях на руднике «Нұрқазған» филиала ТОО "Корпорация Казахмыс" ПО «Карагандацветмет» (рисунок 4.24). Проводились исследования с использованием системы регистрации данных для непрерывного мониторинга процесса смещения.

Разработанная принципиальная схема и аппаратно-программный комплекс доказали свою работоспособность. В перспективе система идентификации будет способна контролировать ряд параметров одновременно, таких как горное давление, состояние шахтной атмосферы, температуру угольного пласта, давления воды в подземном водоносном горизонте. Данная система является полностью взрывобезопасной и пригодна для использования в сверхкатегоричных шахтах по внезапному выбросу газа и пыли.



4.24 - Проведение предварительных замеров в условиях рудника

## **ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4**

По проведенным теоретическим и натурным исследованиям можно заключить следующее:

1. Смоделированный датчик на основе оптического волокна имеет незначительную нелинейность. При приложенном давлении на стальные стержни от 1 до 10 МПа сохраняется его стабильная линейная характеристика, что создает возможность использования его в качестве измерительного органа со стороны массива горных пород для контроля и горного давления внезапного обрушения свода выработки из-за образовавшихся дефектов.

2. Физические основы создания датчиков давления на основе изменения коэффициента преломления при микроизгибе оптического волокна типа G.652 можно выразить через изменение дифракционного пятна, падающего на поверхность фотоприемника.

3. Результаты практического применения разработанного аппаратно-программного комплекса показали, что при использовании увеличения длины волны от 1310 нм до 1625 нм дополнительные потери возрастают. В этой связи рекомендуется использовать оптическое волокно с длиной волны 1310 нм. Разработанное программное обеспечение обеспечивает многоканальную обработку данных, полученных от волоконно-оптических сенсоров.

4. Разработанный аппаратно-программный комплекс для идентификации геотехнического состояния горных выработок позволяет фиксировать увеличение давления на горную выработку по зонам. По результатам практического применения рекомендуется использовать оптическое волокно с длиной волны 1310 нм.

5. Полученные научные результаты применимы в маркшейдерских и геомеханических службах горнопромышленных предприятий, о чем свидетельствуют акты рассмотрения и внедрения, представленные в Приложении Б.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа содержит новые научно обоснованные результаты, основанные на выполненных теоретических и экспериментальных исследованиях, совокупность которых имеет важное значение для обеспечения безопасности ведения горных работ в условиях повышенной опасности по внезапному взрыву газа и пыли.

Краткие выводы:

1. Произведен обзор существующих гипотез об измерении горного давления и методов контроля напряженного состояния горной выработки. Следует учитывать параметр крепости горной породы для определения направления давления в горной крепи. Давление горной породы может быть только со стороны кровли при коэффициенте крепости породы более 6, при коэффициенте менее 5 необходимо учитывать давление и со стороны боковых стенок. Большинство методов определения напряженно-деформированного состояния породных массивов связано с выполнением работ по бурению измерительных скважин. В ходе проведения обзора характеристик оптического волокна выявлено, что волоконно-оптические датчики могут быть невосприимчивы к электромагнитным помехам и не проводят электричество, что особенно важно в условиях повышенной искро- и взрывоопасности на производствах.

2. Проведен анализ физических основ контроля деформации горных выработок на основе теории оптического интерферометра. Установлено, что при механическом воздействии возникает фотоупругий эффект. Показатель преломления сердцевины ОВ составит  $\delta n = 9,6 \cdot 10^{-4}$  при изменении параметров конструкции на 0,3% и более.

3. Смоделирован процесс воздействия горного давления на элементы крепи и определение параметров данного воздействия с использованием программы,

основанной на методе конечных элементов ANSYS STATIC STRUCTURAL. Моделирование показало, что дополнительные потери импульса световой волны увеличиваются при таком радиусе изгиба, который является критическим, когда волоконный проводник находится на грани механического повреждения.

4. В ходе лабораторных экспериментов разработаны два метода контроля деформации горной выработки с размещением волоконно-оптического датчика в тело балки монолитной бетонной крепи и по внутренней стороне свода.

5. Использование одномодового оптического волокна стандарта ITU-T G.652.D (9/125 мкм) для идентификации геотехнического состояния является весьма перспективным, так как разработанные на его основе волоконно-оптические датчики обладают достаточно высокой точностью, скоростью измерения и имеют хорошую линейность характеристик.

6. Разработан аппаратно-программный комплекс для идентификации геотехнического состояния горных выработок, позволяющий фиксировать увеличение давления на горную выработку по зонам. Результаты практического применения разработанного аппаратно-программного комплекса показали, что при использовании увеличения длины волны от 1310 нм до 1625 нм дополнительные потери возрастают. В этой связи рекомендуется использовать оптическое волокно с длиной волны 1310 нм.

Новизна заключается в получении новых научных результатов в направлении волоконно-оптических систем идентификации механических воздействий с обработкой информации. Данные системы имеют широкий спектр промышленного применения, так как система имеет единый информационный канал, в котором измерительная и передающая часть представлена в виде оптического волокна.

Для достижения поставленных целей выполнены все поставленные задачи:

- проанализированы существующие методы контроля идентификации состояния кровли горных выработок с применением волоконно-оптических технологий и методов контроля горного давления;
- проанализированы физические основы контроля деформации горных выработок на основе теории оптического интерферометра;

- проведено компьютерное моделирование процесса воздействия горного давления на элементы крепи;
- проведен ряд экспериментальных исследований для достижения оптимальных метрологических параметров датчиков, входящих в волоконно-оптическую систему, и внесения изменений для совершенствования конструкции на основе системного подхода;
- разработан аппаратно-программный комплекс, предназначенный для оперативного контроля внезапных изменений параметров, влияющих на прочность горной выработки с перспективой мультиизмерений;
- проведена оценка эффективности разработанного метода после практического применения разработанного датчика.

Полученные научные результаты применимы в маркшейдерских и геомеханических службах горнопромышленных предприятий, о чем свидетельствуют акты рассмотрения и внедрения, представленные в Приложении Б.



**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

AIC - информационный критерий Акаике

OTDR - Optical Time Domain Reflectometer – оптический рефлектометр

ВОД - волоконно-оптический датчик

ИИС - информационно-измерительных системах

МОВ - многомодовое волокно

ОВ - оптическое волокно

ООВ - одномодовое волокно

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Твердов, А.А. Инновации в горном деле / А.А. Твердов, А.В. Жура, С.Б. Никишичев // Горная промышленность. — 2013. — №2 (108). — С.48.

2 Бадеева, Е.А. Классификация амплитудных волоконно-оптических преобразователей / Е. А. Бадеева, В. А. Мещеряков, Т. И. Мурашкина // Датчики и системы. — 2003. — №2. — С. 20-25.

3 Бадеева, Е.А. Теоретические основы проектирования амплитудных волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом: монография / Е.А. Бадеева, А.Г. Пивкин, А.В. Гориш, Т.И. Мурашкина. — М.: МГУЛ, 2004. — 246 с.

4 Бусурин, В. И. Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения / В. И. Бусурин, Ю. Р. Носов. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 256 с.

5 Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси, К. Окамато, М. Оцу и др.; Под ред. Т. Окоси: Пер. с япон. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. — 256 с.

6 Волчихин, В. И. Проблемы создания волоконно-оптических датчиков / В. И. Волчихин, Т. И. Мурашкина // Датчики и системы. Измерения, контроль, автоматизация. — 2001. — № 7. — С.54-58.

7 Зак, Е.А. Волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией / Е.А. Зак. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 128 с.

8 Коробейников, А. Г. Проблемы производства высокопрочного оптического волокна / А.Г. Коробейников, Ю.А. Гатчин, К.В. Дукельский, Е.В. Тер-Нерсесянц // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2013. — №2(84). — С. 18-23.

9 Ермаков, О.Н. Прикладная оптоэлектроника / О.Н. Ермаков. — М.: Техносфера, 2004. — 416с.

- 10 Гроднев, И.И. Оптические кабели: конструкции, характеристики, производство и применение / И.И. Гроднев, Ю.Т. Ларин, И.И. Теумин. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 176 с.
- 11 Liu, T. Advances of optical fiber sensors for coal mine safety monitoring applications / T. Liu, Y. Wei, G. Song, Y. Li, J. Wang, Y. Ning, Y. Lu // Proceedings of the 2013 International Conference on Microwave and Photonics. — 2013. — Pp. 102–111.
- 12 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. — V. 16. — Pp. 112-117.
- 13 Chunde, P. Application of distributed optical fiber sensing technology in the anomaly detection of shaft lining in grouting / P. Chunde, Y. Jun, S. Bin, L. Haijun, W. Guangqing, G. Chunsheng // Journal of Sensor. — 2015. — V.20. — Pp. 163–169.
- 14 Liu, X. Fiber Grating Water pressure sensor and system for mine / X. Liu, C. Wang, T. Liu, Y. Wei, J. Lv // ACTA PhotonicaSinica. — 2009. — V. 38. — Pp. 112–114.
- 15 Kumar, A. Optimizing fibre optics for coal mine automation / A. Kumar, D. Kumar, U.K. Singh, P.S. Gupta, G. Shankar // International Journal of Control and Automation. — 2011. — V.3. — Pp. 63-70.
- 16 Чотчаев, Х. О. Контроль напряженно-деформированного состояния горного массива звукометрическими и геофизическими методами / Х. О. Чотчаев // Геология и геофизика юга России. — 2016. — № 3. — С. 129-140.
- 17 Буймистряк, Г. Я. Принципы построения интеллектуальных волоконно-оптических датчиков / Г. Я. Буймистряк // Фотон-Экспресс. — 2011. — № 6 (43). — С. 38-39.
- 18 Дмитриев, С. А. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и перспективы / С. А. Дмитриев, Н. Н. Слепов. — М.: ООО «Волоконно-оптическая техника», 2005. — 576 с.
- 19 Пат. на полезную модель РК 4220. Волоконно-оптический датчик измерения деформации металлических и не металлических поверхностей / Мехтиев

Р.А., Нешина Е.Г., Мехтиев А.Д., Алькина А.Д., Югай В.В.; заявл. 28.03.19; опубл. 01.08.2019.

20 Соколов, А.Н. Волоконно-оптические датчики и системы: принципы построения, возможности и перспективы / А.Н. Соколов, В.А. Яцеев // Измерительная техника. — 2006. — № 4. — С. 142-153.

21 Kim, S.T. A Sensor-Type PC Strand with an Embedded FBG Sensor for Monitoring Prestress Forces / S.T. Kim, Y.-H. Park, S.Y. Park, K. Cho, J.-R. Cho // Sensors. — 2015. — Vol.15, no.1. — Pp. 1060-1070.

22 Liu, T. Advances Of Optical Fiber Sensors For Coal Mine Safety Monitoring Applications / T. Liu, Y. Wei, G. Song, Y. Li, J. Wang, Y. Ning, Y. Lu // Proceedings of the 2013 International Conference on Microwave and Photonics. — 2013. — Pp. 102-111.

23 Bahaa, E.A. Fundamentals of Photonics / E.A. Bahaa, M.C. Saleh. — John Wiley and Sons Ltd. — 2007. — 947 p.

24 Ho, H. L. A fiber Bragg grating sensor for static and dynamic measurands / H. L. Ho, W. Jin, C. C. Chan, Y. Zhou, X. W. Wang // Sensors and Actuators A. — 2002. — Vol. 96. — Pp. 21-24.

25 Tjin, S. C. Application of quasi-distributed fiber Bragg grating sensors in reinforced concrete structures / S. C. Tjin, Y. Wang, X. Sun, P. Moyo, J. Brownjohn, M. W. Meas // Sci. Technol. — 2002. — Vol. 13. — Pp. 583-589.

26 Naruse, H. Application of a distributed fiber optic strain sensing system to monitoring changes in the state of an underground mine / H. Naruse, H. Uehara, T. Deguchi, K. Fujihashi, M. Onishi, R. Espinoza, M. Pinto / Measurement Science and Technology. — 2007. — V.18, No 10. — Pp. 3202–3210.

27 Смит, А.Л. Прикладная ИК-спектроскопия: Основы, техника, аналит. применение / А. Смит; Пер. с англ. Б. Н. Тарасевича. - М. : Мир, 1982. - 327 с.

28 Мехтиев, А.Д. Краткий сравнительный анализ эффективности использования сенсорной сети в горнодобывающей промышленности для мониторинга персонала и технологического оборудования. А.Д. Мехтиев, Е.Г. Нешина, А. Д. Алькина, С. Е. Алиакпаров, Д. М. Жумабеков, А. А. Оспанов, В.С.

Баландин, П.Ш. Мади // Materials Of The Xii Internati Onal Scientific And Practical Confer Ence Scientific Horizons, Sheffield. — 2016. — P. 27-31.

29 Chaulya, S. K. Sensing and Monitoring Technologies for Mines and Hazardous Areas Monitoring and Prediction Technologies / S. K. Chaulya, G. M. Prasad. — Amsterdam: Elsevier, 2016. — 432 p.

30 <https://i-sensor.ru/>

31 Шишкин, В.В. Отечественный опыт производства и применения волоконно-оптических датчиков / В.В. Шишкин, И.В. Гранёв, И.С. Шелемба // Прикладная фотоника. — 2016. — Т.3, №1. — С. 61-75.

32 Турбин, А. Волоконно-оптическая революция от «ОМЕГи» / А. Турбин // ТЭК России. — 2015. — № 07. — С. 36-38.

33 Пат на изобретение РФ 2421615. Устройство непрерывного контроля напряженного состояния массива горных пород / Гуменный А. С., Дырдин В. В., Янина Т. И.; заявитель и патентообладатель Кузбасский государственный технический университет; заявл. 15.02.2010; опубл. 20.06.2011, Бюл. № 17/2011.

34 Буймистряк, Г. Волоконно-оптические датчики для экстремальных условий / Г. Буймистряк // Control Engineering Россия. — 2013. — №3 (45). —С. 34–40.

35 Kumar, V. Fiber optic methane and strain sensors for mines / V. Kumar // Photonics (ICP) International Conference. — 2010. — Pp.79-84.

36 Ding, M. Basics of Optical Fiber Measurements / M. Ding, D. Fan, W. Wang, Y. Luo, G.-D. Peng // Handbook of Optical Fibers. — 2018. — 39 p.

37 Глушко, В. Т. Механика горных пород и охрана выработок / В.Т. Глушко, А.З. Широков. — Киев: Издательство Академии наук Украинской ССР, 1967. — 154 с.

38 Абдыкапаров, Ч. М. Совершенствование горнопроходческих и очистных работ / Ч.М. Абдыкапаров, А.И. Имаралиев, Ш.А. Мамбетов. — Бишкек: КРСУ, 2007. — 122 с.

39 Бенявски, З. Управление горным давлением / З. Бенявски. — М.: МИР, 1990. — 254 с.

- 40 Багдасаров, Ш.Б. Горноразведочные работы: учебник для вузов / Ш.Б. Багдасаров, Л.Г. Грабчак, С.В. Иляхин.— М.: Высшая Школа, 2003. — 661 с.
- 41 Singh, B. Tunnelling In Weak Rocks / B. Singh, R.K. Goel, J.A. Hudson. — Elsevier Geo-Engineering Book 5, 2006. — 489 p.
- 42 Давление горных пород и рудничное крепление / М. М. Протодяконов. Ч. 1 : Давление горных пород, 1931. - 104 с.
- 43 Зотеев, О.В. Геомеханика: учебное пособие для студентов ВУЗов / О.В. Зотеев. — Екатеринбург: УГГУ, ИГД УРО РАН, 2003. —252 с.
- 44 Шкурятник, В.Л. Методы определения напряжённо-деформированного состояния массива горных пород: научно-образовательный курс / В.Л. Шкурятник, П.В. Николенко. — М.: МГГУ, 2012. — 112 с.
- 45 Гребенкин, С.С. Управление состоянием массива горных пород: учебное пособие / С.С. Гребенкин, В.Н. Павлыш, В.Л. Самойлов, Ю.А. Петренко. – Донецк: "ВИК", 2010. — 193 с.
- 46 Заславский, Ю.З. Крепление подземных сооружений / Ю.З. Заславский, В.М. Мостков. — М.: Недра, 1979. — 325 с.
- 47 Брызгалов, В.И. Контроль напряженно-деформированного состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС / В.И. Брызгалов, В.Д. Барышников, В.А. Булатов, Л.Н. Гахова // Гидротехническое строительство. — 2000. — № 10. — С. 51.
- 48 Мельников, Н.Н. О фундаментальных проблемах освоения месторождений полезных ископаемых России и основных направлениях развития горных наук / Н.Н. Мельников, В.Н. Опарин, М.Д. Новопашин, В.Л. Яковлев, Ю.А. Мамаев, В.П. Потапов // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды: Труды конференции с участием иностранных ученых. — 2007. – Т. I. – С. 5-23.
- 49 Простов, С. М. Геоэлектрический контроль на рудниках: монография / С.М. Простов, Б. Г. Тарасов, В. В. Дырдин, В. А. Хямяляйнен. — Кемерово: КузГТУ, 2003. - 165 с.

50 Yurchenko, A. V. Investigation of additional losses in optical fibers under mechanical action / A.V. Yurchenko, A.D. Mekhtiyev, F.N. Bulatbaev, Y.G. Neshina, A.D. Alkina, P.Sh.Madi // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — 516. — Pp. 1-5.

51 Мехтиев, А.Д., Юрченко, А.В., Нешина, Е.Г., Алькина, А.А., Қожас, А.К., Жолмагамбетов, С.Р. Неразрушающий контроль дефектов и повреждений конструкций железобетонных фундаментов при помощи оптических волокон стандарта G.652 // Дефектоскопия. — 2020. — № 2. — С. 50-6

52 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.

53 Мехтиев, А.Д. Физические основы создания датчиков давления на основе изменения коэффициента преломления света при микроизгибе оптического волокна / А. Д. Мехтиев, А. В. Юрченко, Е. Г. Нешина [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2020. — Т. 63, № 2. — С. 129-136.

54 Свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права 0004. Волоконно-оптические датчики для системы контроля состояния горных выработок и оборудования в условиях взрывоопасности / Юрченко А.В., Мехтиев А.Д., Булатбаев Ф.Н., Югай В.В., Нешина Е.Г., Алькина А.Д.; опубл. 3.01.2018.

55 Юрченко, А.В. Некоторые вопросы использования систем мониторинга на основе волоконно-оптических датчиков в условиях АО "Арселормитал-Темиртау" / А.В. Юрченко, А.Д. Мехтиев, А.Д. Алькина, Е.Г. Нешина // Сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика». — 2017. — С. 325-328.

56 Юрченко, А. В. Информационно-измерительные системы нового поколения для обеспечения безопасности проведения горных работ / А.В. Юрченко, А.Д. Мехтиев, А.Д. Алькина, Е.Г. Нешина // Труды Международной

научно-исследовательской конференции «Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты»: ТТИ НИЯУ МИФИ. — 2017. — С. 36-41.

57 Юрченко, А.В. Вопросы разработки интеллектуальных волоконно-оптических датчиков нового поколения с высокими метрологическими характеристиками / А.В. Юрченко, А.Д. Мехтиев, А.Д. Алькина, Е.Г. Нешина. Материалы Круглого стола «Цифровизация промышленности – основа четвертой промышленной революции». — 2018. — С. 44-50.

58 Юрченко, А.В. Модель волоконно-оптического датчика для мониторинга механического напряжения горных выработок / А.В. Юрченко, А.Д. Мехтиев, Ф.Н. Булатбаев, Е.Г. Нешина, А.Д. Алькина // Дефектоскопия. — 2018. — №7. — С. 61-67.

59 Yurchenko, A.V. The Use of Optical Fiber to Control the Sudden Arch Collapse of the Mine Working / A.V. Yurchenko, A.D. Mekhtiyev, Y.G. Neshina, F.N. Bulatbaev, A.D. Alkina // IOP: Journal of Physics: Conference Series. — 2017. — Pp. 1-5.

60 Yurchenko, A.V. The Model of a Fiber-Optic Sensor for Monitoring Mechanical Stresses in Mine Working. A.V.Yurchenko, A.D. Mekhtiyev, F.N. Bulatbayev, Y.G. Neshina, A.D. Alkina // Russian Journal of Nondestructive Testing. — 2018. — Vol.54, No. 7. — Pp. 528-533.

61 Морозов, К.Е. Математическое моделирование в научном познании / К.Е. Морозов. — М.: Мысль, 1969. — 256 с.

62 Буялич, Г.Д. Взаимодействие Секции механизированной крепи с боковыми породами как давление сползающих призм по гипотезе П.М. Цимбаревича. Развитие гипотезы до концепции / Г.Д. Буялич, В.М. Тарасов, Н.И. Тарасова // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2014. — №2. — С. 114-120.

63 Буялич, Г.Д. Повышение безопасности работ при взаимодействии секций механизированных крепей с кровлей в призабойном пространстве лавы / Г.Д. Буялич, В.М. Тарасов, Н.И. Тарасова // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2013. — №1.2. — С.130-135.



64 Мельников, Н.И. Проведение и крепление горных выработок / Н.И. Мельников. — М.:Недра, 1979. — 336 с.

65 Бербеков, Ж.В. Неразрушающие методы контроля прочности бетона / Ж.В. Бербеков // Молодой ученый. —2012. — №11. — С.20-23.

66 ГОСТ 22690-2015 Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля

67 Mekhtiyev, A. The external mechanical effects on the value of additional losses in the telecommunications fiber optic cables under operating conditions / A. Mekhtiyev, F. Bulatbayev, Y. Neshina, E. Siemens, A. Alkina, T. Shaigarayeva // Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT. —2018. — V.1, Issue 6. — Pp.123-127.

68 Испытание портландцемента и его разновидностей: Методические указания к лабораторным работам по курсу «Материаловедение» для студентов всех специальностей / Сост.: Н.Р. Рахимова. — Казань: КГАСУ, 2008. — 16 с.

69 Yurchenko, A. The Questions of Development of Fiber optic Sensors for Measuring Pressure with Improved Metrological and Operational Characteristics / A. Yurchenko, A. Alkina, A. Mekhtiev, F. Bulatbayev, Y. Neshina // MATEC Web of Conferences. — 2016. — №79. Pp. 1-5.

70 Мехтиев, А.Д. Волоконно-оптические системы идентификации физических величин. Монография / А.Д. Мехтиев, Е.Г. Нешина, В.В. Югай, А.Д. Алькина — Караганда: Изд-во КарГУ, 2020 - 151с.

71 Mekhtiyev, A. D. Research Of Mechanical Stress At Tension Of Quartz Optical Fiber (QOF) / A.D. Mekhtiyev, A.A. Kovtun, V.V. Yugay, E.G. Neshina, R. Zh. Aimagambetova, A.D. Alkina // Metalurgija, 60 (2020) 1-2. Pp. 121-124.

72 Бейли, Д. Волоконная оптика. Теория и практика / Д. Бейли, Э. Райт. — М.: Кудиц-Образ, 2006. — 320 с.

73 Быстров, Ю.А. Оптоэлектронные приборы и устройства: Учебное пособие / Ю.А. Быстров. — Москва: РадиоСофт, 2001. — 256 с.

74 Горлов, Н.И. Основные задачи мониторинга современных волоконно-оптических линий передачи / Н.И. Горлов, В.И. Эйрих // Труды международной научной конференции «Сагиновские чтения №11». — 2012. — №.2. С. 68—70.

75 Салех, Б. Оптика и фотоника. Принципы и применение. Пер. с англ.: Учебное пособие. В 2 т. Т. 1 / Б. Салех, М. Тейх. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2012. —760 с.

## **Приложение А Копии полученных патентов**

1. Патент № 3852
2. Патент № 4220
3. Патент № 5044
4. Патент №. 5045
5. Патент № 5043



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

# ПАТЕНТ PATENT

№ 3852

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL



(21) 2019/0051.2

(22) 23.01.2019

Қазақстан Республикасы пайдалы модельдер мемлекеттік тізілімінде тіркеу күні / Дата регистрации в Государственном реестре полезных моделей Республики Казахстан / Date of the registration in the State Register of Utility Models of the Republic of Kazakhstan: 05.04.2019

(54) Объектіде температуралық үлестіруді өлшеу тәсілі және оны жүзеге асыруға арналған құрылғы  
Способ измерения температурного распределения в объекте и устройство для его осуществления  
Method of measuring a temperature distribution in an object and device for its implementation

(73) Мехтиев Али Джаванширович (KZ)  
Mekhtiyev Ali Dzhavanshirovich (KZ)

(72) Нешина Елена Геннадьевна (KZ)  
Мехтиев Али Джаванширович (KZ)  
Югай Вячеслав Викторович (KZ)  
Алькина Алия Даулетхановна (KZ)  
Шайгараева Татьяна Нажиповна (KZ)

Neshina Yelena Gennadyevna (KZ)  
Mekhtiyev Ali Dzhavanshirovich (KZ)  
Yugay Vyacheslav Viktorovich (KZ)  
Alkina Aliya Daulet Khanovna (KZ)  
Shaigarayeva Tatyana Nazhipovna (KZ)



*E. Orazov*

«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»

  
 ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ      РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН  
 REPUBLIC OF KAZAKHSTAN  
**ПАТЕНТ**  
**PATENT**  
 № 4220  
 ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL


 (21) 2019/0282.2  
 (22) 28.03.2019

Қазақстан Республикасы Пайдалы модельдер мемлекеттік тізілімінде тіркеу күні / Дата регистрации в Государственном реестре полезных моделей Республики Казахстан / Date of the registration in the State Register of Utility Models of the Republic of Kazakhstan: 01.08.2019

(54) Металл және металл емес беттердің деформациясын өлшейтін талшықты-оптикалық сенсор  
 Волоконно-оптический датчик измерения деформации металлических и не металлических поверхностей  
 Fiber-optical sensor for measuring the deformation of metallic and non-metallic surfaces

(73) Мехтиев Руслан Алиевич (KZ)  
 Mekhtiyev Ruslan Aliyevich (KZ)


(72) Мехтиев Али Джаванширович (KZ)      Mekhtiyev Ali Dzhavanshirovich (KZ)  
 Алькина Алия Даулетхановна (KZ)      Alkina Aliya Dauletkhanovna (KZ)  
 Нешина Елена Геннадьевна (KZ)      Neshina Yelena Gennadyevna (KZ)  
 Югай Вячеслав Викторович (KZ)      Yugay Vyacheslav Viktorovich (KZ)



 Е. Оспанов  
 Y. Ospanov

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директоры  
 Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»  
 Director of the «National Institute of Intellectual Property» RSE

  
 ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ      РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН  
 REPUBLIC OF KAZAKHSTAN  
**ПАТЕНТ**  
**PATENT**  
 № 5044  
**ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL**



(21) 2019/1068.2

(22) 05.12.2019

(45) 12.06.2020

(54) Екі сәулелі интерферометр негізіндегі температураны өлшеу датчигі  
 Датчик для измерения температуры на основе двухлучевого интерферометра  
 Sensor for temperature measurement based on double-beam interferometer

(73) Мехтиев Руслан Алиевич (KZ)  
 Mekhtiyev Ruslan Aliyevich (KZ)

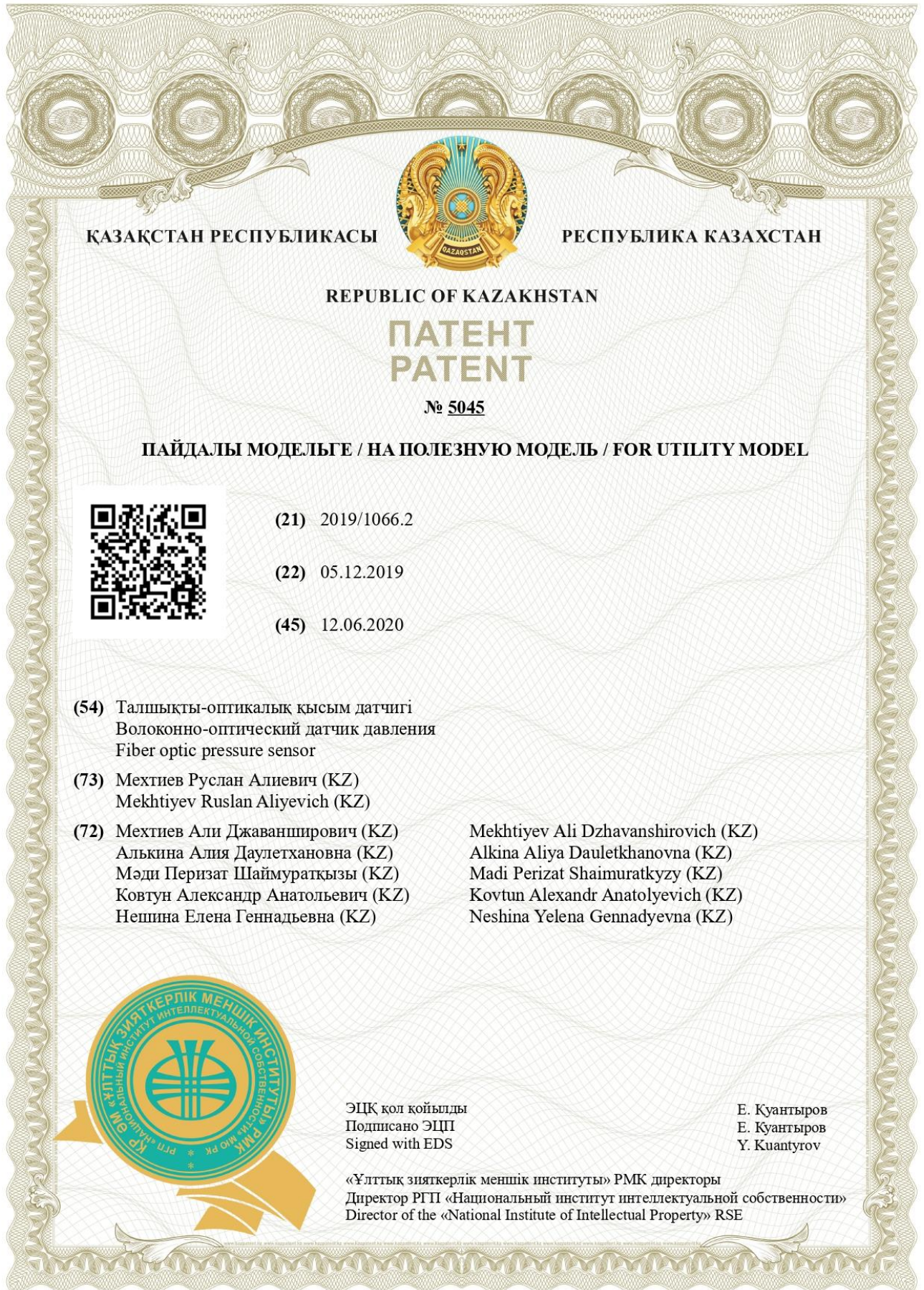
(72) Мехтиев Али Джаванширович (KZ)      Mekhtiyev Ali Dzhavanshirovich (KZ)  
 Алькина Алия Даулетхановна (KZ)      Alkina Aliya Dauletghanovna (KZ)  
 Мәди Перизат Шаймуратқызы (KZ)      Madi Perizat Shaimuratkyzy (KZ)  
 Ковтун Александр Анатольевич (KZ)      Kovtun Alexandr Anatolyevich (KZ)  
 Нешина Елена Геннадьевна (KZ)      Neshina Yelena Gennadyevna (KZ)



ЭЦҚ қол қойылды  
 Подписано ЭЦП  
 Signed with EDS

Е. Куантыров  
 Е. Куантыров  
 Y. Kuantyrov

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директоры  
 Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»  
 Director of the «National Institute of Intellectual Property» RSE



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ  
PATENT

№ 5045

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL



(21) 2019/1066.2

(22) 05.12.2019

(45) 12.06.2020

(54) Талшықты-оптикалық қысым датчигі  
Волоконно-оптический датчик давления  
Fiber optic pressure sensor

(73) Мехтиев Руслан Алиевич (KZ)  
Mekhtiyev Ruslan Aliyevich (KZ)

(72) Мехтиев Али Джаванширович (KZ)  
Алькина Алия Даулетхановна (KZ)  
Мәди Перизат Шаймуратқызы (KZ)  
Ковтун Александр Анатольевич (KZ)  
Нешина Елена Геннадьевна (KZ)


Mekhtiyev Ali Dzhavanshirovich (KZ)  
Alkina Aliya Dauletkanovna (KZ)  
Madi Perizat Shaimuratkyzy (KZ)  
Kovtun Alexandr Anatolyevich (KZ)  
Neshina Yelena Gennadyevna (KZ)




ЭЦҚ қол қойылды  
Подписано ЭЦП  
Signed with EDS

Е. Қуантыров  
Е. Қуантыров  
Y. Kuanturov

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директоры  
Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»  
Director of the «National Institute of Intellectual Property» RSE

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ            РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН  
 REPUBLIC OF KAZAKHSTAN  
**ПАТЕНТ**  
**PATENT**  
 № 5043  
 ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL



(21) 2019/1067.2


(22) 05.12.2019

(45) 12.06.2020

(54) Талшықты-оптикалық дабыл беру жүйесі  
Волоконно-оптическая система охранной сигнализации  
Fiber optic security alarm system

(73) Мехтиев Руслан Алиевич (KZ)  
Mekhtiyev Ruslan Aliyevich (KZ)

(72) Мехтиев Али Джаванширович (KZ)      Mekhtiyev Ali Dzhavanshirovich (KZ)  
 Алькина Алиа Даулетхановна (KZ)      Alkina Aliya Dauletghanovna (KZ)  
 Мәди Перизат Шаймуратқызы (KZ)      Madi Perizat Shaimuratkyzy (KZ)  
 Ковтун Александр Анатольевич (KZ)      Kovtun Alexandr Anatolyevich (KZ)  
 Нешина Елена Геннадьевна (KZ)      Neshina Yelena Gennadyevna (KZ)  
 Югай Вячеслав Викторович (KZ)      Yugay Vyacheslav Viktorovich (KZ)  
 Бердибеков Айдар Токтамысович (KZ)      Berdibekov Aidar Toktamysovich (KZ)



ЭЦҚ қол қойылды  
Подписано ЭЦП  
Signed with EDS

Е. Куантыров  
Е. Куантыров  
Y. Kuantyrov

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директоры  
 Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»  
 Director of the «National Institute of Intellectual Property» RSE



## **Приложение Б Акты внедрения и рассмотрения диссертационной работы**

1. Заключение о возможности использования результатов диссертационной работы от УД АО «Арселор МитталТемиртау»
2. Протокол заседания технологической службы ш.им. Костенко
3. Акт о внедрении в учебный процесс результатов диссертационной работы от НАО «КарТУ»
4. Акт внедрения результатов диссертационной работы на руднике «Нұрқазған» филиала ТОО "Корпорация Казахмыс" ПО «Карагандацветмет»

УТВЕРЖДАЮ  
 Руководитель геофизической службы  
 УД АО «Арселор Миттал Темиртау»,  
 канд. техн. наук



Сон Д.В.

2011г.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

о возможности использования научной разработки Нешиной Е.Г.  
 «Волоконно-оптический датчик контроля деформации горной выработки»

Важнейшей проблемой горнодобывающих предприятий является обеспечение безопасности персонала от внезапного обрушения горного массива, для чего необходимо постоянно контролировать давление горной породы на крепь.

В научной работе Нешиной Е.Г. предлагается решить данную задачу применением новых достижений в области мониторинга и управления, связанных с использованием волоконно-оптических технологий. Актуальность работы обусловлена важностью своевременного предупреждения о внезапных изменениях параметров, влияющих на прочность горной выработки, оперативного сбора и обработки информации, с дальнейшим предоставлением ее лицу, принимающему решения.

Таким образом, разработанная методика имеет практическую значимость. Представляет интерес для специалистов горной отрасли и может применяться для контроля геотехнического состояния горной выработки. Рекомендуются довести научную разработку до получения сертификата безопасности.

Актуальность создания и внедрения информационно-измерительной системы на основе оптоволоконных датчиков, которая позволяет измерять несколько параметров непрерывно и своевременно уведомлять персонал горных предприятий, осуществляющих разработку подземным способом, не вызывает сомнений. Предложенная система мониторинга горного давления на основе волоконно-оптических датчиков пригодна для использования в условиях атмосферы шахт Карагандинского угольного бассейна при условии соблюдения правил промышленной безопасности.

Настоящее заключение не является основанием для предъявления финансовых претензий.

Начальник отдела капитального строительства  
 УД АО «Арселор Миттал Темиртау»,  
 кандидат технических наук

Tonkikh В.И.



«АрселорМиттал Теміртау»  
акционерлік қоғамының  
көмір департаменті

АО «АрселорМиттал Темиртау»  
Угольный департамент

Coal Department of  
ArcelorMittal Temirtau JSC

КОСТЕНКО атындағы шахтасы

шахта имени Костенко

KOSTENKO colliery

100012, Қарағанды қ., Михайлов тас жолы, 1, факс 49-71-07, тел. 49-72-04  
100012, г. Караганда, Михайловское шоссе, 1, факс 49-71-07, тел. 49-72-04  
Mikhailovm highway, 1, Karaganda, 100012, fax 49-71-07, tel. 49-72-04

**ПРОТОКОЛ**  
заседания технологической службы шахты им. Костенко  
УД «Арселор Миттал Темиртау» от 11.08.2020г.

**Повестка дня**

1. Обсуждение научной работы по разработке волоконно-оптического датчика контроля деформации горной выработки

СЛУШАЛИ: Нешину Елену Геннадьевну, старшего преподавателя кафедры «Энергетические системы» Карагандинского технического университета, которая доложила основные положения своей диссертационной работы на тему «Волоконно-оптический датчик контроля деформации горных выработок».

Научный руководитель – Юрченко А.В., доктор технических наук, профессор Томского политехнического университета. Научный консультант – Мехтиев А.Д., кандидат технических наук, ассоциированный профессор Карагандинского технического университета.

Представлена разработанная имитационная модель горной выработки с арочной металлической крепью, оснащенная волоконно-оптической системой мониторинга и датчиками давления. Модель использовалась для практической отработки методов контроля горного давления и измерения геотехнических параметров выработок, а также для проверки выдвинутых ранее идей.

Отмечено, что в перспективе система мониторинга будет способна контролировать ряд параметров одновременно, таких как горное давление, состояние шахтной атмосферы, температуру угольного пласта, давления воды в подземном водоносном горизонте.

Были заданы вопросы, на которые автор диссертации дал подробные и исчерпывающие ответы.

ПОСТАНОВИЛИ: рекомендовать научную работу Нешиной Е.Г. к дальнейшему исследованию и внедрению на угольных шахтах с соблюдением требований промышленной безопасности.

Главный инженер

Главный технолог

Главный маркшейдер



Грознов Н.Н.

Назаров А.В.

Палкина Н.А.

УТВЕРЖДАЮ

И.о. Проректора по научной работе  
 НАО «Карагандинский технический  
 университет», д.т.н., профессор  
 Ожигин С.Г.  
 «08» Карту 2011 г.



АКТ

о внедрении в учебный процесс результатов диссертационного  
 исследования Нешиной Елены Геннадьевны

Основные научные результаты диссертационной работы Нешиной Елены Геннадьевны, и.о. заведующего кафедрой «Энергетические системы» Карагандинского технического университета, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по направлению 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий», внедрены в учебный процесс и используются как методическое обеспечение в лекционном курсе, лабораторном практикуме по дисциплине «Метрология и информационно-измерительная техника» для студентов специальностей 6В07108 «Теплоэнергетика», 6В07109 «Электроэнергетика».

Аппаратно-программный комплекс контроля напряженно-деформированного состояния протяженных объектов и строительных конструкций, разработанный в рамках диссертационной работы, используется для выполнения научно-технических исследований магистрантами специальностей 7М07302 «Строительство», 7М07303 «Производство строительных материалов, изделий и конструкций».

Передача осуществлена на безвозмездной основе.

Настоящий акт не является основанием для предъявления финансовых претензий Карагандинскому техническому университету.

Декан Факультета энергетики, автоматике  
 и телекоммуникаций, канд. техн. наук

Ф.Н. Булатбаев

Председатель научного экспертного  
 совета Факультета энергетики, автоматике  
 и телекоммуникаций, канд. физ.-мат. наук,  
 ассоциированный профессор

А.В. Калытка

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор рудника «Нурказган»  
филиала ТОО «Корпорация Казахмыс»

ПО «Карагандацветмет»



М.Ж. Унгитбаев

2021 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы  
Нешиной Елены Геннадьевны,  
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий»

Настоящим актом подтверждается, что выполненные в рамках диссертационной работы исследования Нешиной Е.Г., а также их практическая реализация в виде разработанной волоконно-оптической системы контроля идентификации геотехнического состояния, используются на руднике «Нурказган» филиала ТОО «Корпорация Казахмыс» ПО «Карагандацветмет» с целью контроля горного давления и измерения геотехнических параметров выработок. Система, включая разработанный аппаратно-программный комплекс, доказала свою работоспособность.

Предложенный метод 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.

Ведущий инженер геотехник  
рудника «Нурказган»  
филиала ТОО «Корпорация Казахмыс»  
ПО «Карагандацветмет»

  
Маханова Н.А.