Федеральное государственное автономное образовательное учреждение

## высшего образования

# «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИ-ЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Мади Перизат

# АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ УСТОЙЧИВО-СТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛОКОННО-ОПТИ-ЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

2.2.8 – «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор А.В. Юрченко

Томск – 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ4
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ
ИССЛЕДОВАНИЯ 12
1.1 Основная терминология открытых способах разработки13
1.2 Краткая характеристика карьеров Казахстана
1.3 Факторы, влияющие на устойчивость бортов карьера
1.4 Методы контроля устойчивости бортов карьеров
1.5 Анализ применения волоконно-оптической технологии на карьерах42
1.6 Датчики на основе оптического волокна 50
1.7 Постановка задач исследования
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ
ИДЕНТИФИКАЦИИ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ 56
2.1 Основы математического моделирования дифракционной решетки для
датчиков
2.2 Математическая модель спектрального анализа светового пятна,
падающего на поверхность фотоматрицы 59
2.3 Процесс моделирования деформации на волокно
2.3 Планирование эксперимента, обработка результатов измерений и
построение математических моделей78
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2
ГЛАВА З ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЛАБОРАТОРНЫХ
УСЛОВИЯХ ПО РАЗРАБОТКЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА89
3.1 Волоконно-оптический датчик перемещения
3.2 Предварительные исследования волоконно-оптического датчика и
отработка его конструкции93
3.3 Датчик с изменениями на основе двухплечевого интерферометра95

3.4 Волоконно-оптический датчик смещения 100
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА
КОНТРОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО
ДАТЧИКА ДЛЯ КОНТРОЛЯ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРА115
4.1 Разработка конструкции датчика и схемы соединения115
4.2 Разработка аппаратно-программного комплекса контроля 119
4.5 Практическая апробация аппаратно-программного комплекса контроля с
использованием волоконно-оптического датчика в условиях предприятий128
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4
ЗАКЛЮЧЕНИЕ137
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ141
ПРИЛОЖЕНИЕ А КОПИИ ПОЛУЧЕННЫХ ПАТЕНТОВ
ПРИЛОЖЕНИЕ Б АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ И РАССМОТРЕНИЯ
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ157

#### введение

Актуальность работы. Карьеры характеризуются высокой производительностью труда, низкими производственными затратами, целостностью добычи полезных ископаемых, оптимальными и относительно безопасными условиями труда. Полная разработка и добыча полезных ископаемых должна сопровождаться минимальным объемом вскрышных работ. И наоборот, достичь минимального покровного слоя в карьере возможно только тогда, когда решена проблема обеспечения устойчивости бортов карьера.

Актуальность работы обосновывается повышением эффективности и безопасностью работ на прибортовых и отвальных массивах, позволяющих его управлять параметрами бортов в процессе эксплуатации.

На основе нового метода контроля за уступами и боковыми откосами организована система геомеханического мониторинга устойчивости бортов карьеров, включающая создание оптоволоконных датчиков, выбор высокоточных методов и методов измерения, математическую обработку результатов наблюдений, а также анализ и прогноз устойчивости бортов карьера.

Преимущества волоконно-оптических датчиков и технологий применительно у устойчивости бортов карьеров: использование данных систем для контроля геотехнических параметров, позволяющих обеспечить необходимый уровень безопасности проведения горных работ с минимальными затратами энергии; нет необходимости в нескольких источниках питания; опасность взрыва, чтобы гарантировать, что оптическое волокно не должно быть причиной искр; высокая коррозионная стойкость; устраняет воздействие электромагнитных помех; датчики оптического волокна более чувствительны и стабильны, их легко В повторно использовать В ЛИНИЯХ связи. отличие OT традицинных инструментальных наблюдений и новых способов (сканирование бортов разреза) волоконно-оптические датчики имеют ряд существенных преимуществ по скорости измерений и нечувствительны по многим внешним воздействиям. При этом энергозатраты десять раз меньше, чем передача информации по эфирам или медному кабелю. Стоимость 1 км волокна на сегодняшний день составляет порядка 10 \$ США, что позволяет создать недорогие системы контроля с протяженностью десятки километров.

Разработка аппаратно-программного комплекса контроля устойчивости бортов карьера с использованием волоконно-оптических датчиков смещения реперного типа обладает низким затуханием сигнала и высоким уровнем помехозащищенности, что позволяет с высокой точностью определять любые механические воздействия на горный массив, и это очень актуально.

**Объектом исследования** в представленной работе является комплекс контроля процесса смещения горных пород, позволяющие управлять параметрами бортов карьера в процессе эксплуатации и обеспечивающие защиту персонала от внезапного обрушения.

**Предметом исследования** являются геотехнические параметры смещения бортов карьера, определяющие определенные виды опасности обрушения, возникающих при работе технологического оборудования, участвующие в процессе добычи полезного ископаемого.

**Целью** работы является создание нового метода на основе аппаратно-программного комплекса контроля устойчивости бортов карьера с использованием волоконно-оптических датчиков смещения горных пород для повышения эффективности добычи полезных ископаемых и безопасности ведения работ на карьере.

Для того, чтобы достичь цели определены следующие задачи:

- изучить процессы нарушения устойчивости карьерных откосов и причины их проявлений;
- проанализировать существующие методы контроля геотехнических параметров бортов карьера и бермы;
- выполнить моделирование механических воздействий на оптическое волокно для разработки волоконно-оптического датчика

идентификации перемещений и деформаций горного массива;

- разработать опытный образец волоконно-оптического датчика смеще ния и деформации горного массива карьера;
- провести лабораторные исследования экспериментального образца волоконно-оптического датчика;
- разработать аппаратно-программный комплекс контроля (АПКК) параметров устойчивости бортов карьеров.

Научная новизна заключается в следующем:

1) предложен новый метод контроля смещений бортов карьера с применением волоконно-оптических датчиков на основе спектрального анализа интенсивности пикселей светового пятна Пуансона с Гауссовским распределением, сформированного на торце оптического волокна, падающего на поверхность фотоматрицы высокого разрешения при изменении его коэффициента преломления.

2) получены новые научно-обоснованные данные исследования опытного образца волоконно-оптического датчика, позволяющего контролировать смещения горных пород прибортового массива открытых разработок с точностью до 0,1 мм, что дает возможность прогнозировать образование и рост трещит на ранней стадии их развития, что повышает эффективность добычи полезных ископаемых и уровень безопасности ведения горных работ.

3) разработан алгоритм управления работой многоканального аппаратнопрограммного комплекса контроля устойчивости бортов карьеров с использованием волоконно-оптических датчиков смещения, выполняющий интеллектуальный анализ изменения свойств световой волны, проходящей по одномодовому оптическому волокну стандарта G652 с обработкой полученных данных и выдачей численного значения смещения горных пород.

Практическая значимость заключается в использовании теоретических основ спектрального анализа изменений интенсивности пикселей при механическом воздействии на оптическое волокно для создания нового метода контроля смещения горных пород. Практическая значимость заключается в разработке опытного образца комплекса контроля смещения с аппаратнопрограмным комплексом для мониторинга геотехнического состояния бортов карьеров. Разработка прошла практическую апробацию на предприятиях Карагандинского бассейна ведущие разработки. угольного открытые Практическая значимось подтверждается протоколом заседания технологической службы ТОО «Акжарык Комир», актом внедрения на ТОО «Научно-технический центр «Альтернатива»», актами внедрения в учебный процесс НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова». Предлагаемый совершенно новый, но в тоже время простейший метод контроля имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с используемыми методами контроля, имеющие периодичность и основанные на использовании ручного труда.

#### Основные положения выносимые на защиту

1. Физико-математическая модель процесса преобразования внешних оптических сигналов, сформированных в одномодовом оптическом волокне, которые трансформируются в визуальные сигналы в формы пятна Пуансона с Гауссовским распределением, что позволяет с помощью оптических методов контролировать смещения горных пород.

2. Методика контроля смещения бортов карьера, обеспечивающая точность измерения 0,1 мм, за счет численной оценки изменения параметров световой волны, падающей на поверхность фотоматрицы, установленной на выходе из оптического волокна при механическом воздействии на него, вызывающем изменения спектральной плотности светового пятна и переходом пикселей от одного состояния интенсивности в другое.

3. Аппаратно-программный комплекс контроля с использованием волоконно-оптических датчиков для прогноза и непрерывного дистанционного контроля устойчивости состояния бортов карьеров, базируется на сравнении изменений параметров светового пятна и процесса перехода пикселей от одного состояния в другое.

Достоверность полученных теоретических и экспериментальных исследований 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. Ценность научной работы соискателя подтверждается публикациями в журналах, входящих в перечень ВАК, а также журналах, индексируемых в международных базах данных WoS, Scopus.

**Личный вклад автора** заключается в постановке целей и задач исследования, в проведении анализа научных достижений по теме научной работы, в проведении экспериментов с последующей обработкой результатов, в статистической обработке данных лабораторных и натурных испытаний бортов карьеров, в определении задач научно-квалификационной работы, формированию выводов и положений, выносимых на защиту, подготовке публикаций.

### Апробация работы и публикации

Приведенные в данной диссертационной работе материалы представлены на следующих конференциях:

1. Международная научно-практическая конференция «Информационноизмерительная техника и технологии» (Томск, 2018);

2. Международная научно-практическая конференция «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Караганда, 2018);

3. 11-ая Международная конференция «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент» (Караганда, 2019);

4. Международная научно-практическая конференция «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Караганда, 2019);

5. V Международная конференция по инновациям в неразрушающем контроле SibTest (Екатеринбург, 2019);

6. Международная научно-практическая конференция «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Караганда, 2020);

7. Республиканская студенческая научная конференция «Вклад молодежной науки в реализацию Стратегии «Казахстан-2050» (Караганда, 2020);

8. Международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Караганда, 2020)

9. Международная научно-практическая конференция «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Кара-ганда, 2021);

10. Международная научно-теоретическая конференция «Сейфуллинские чтения – 17: «Современная аграрная наука: цифровая трансформация», посвященная 30-летию независимости Республики Казахстан (Нур-Султан 2021);

11. II Международная научно-техническая конференция «Smart Energy Systems 2021» (Казань, 2021);

12. Х Международная конференция школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» (Томск, 2021);

13. Международная научно-практическая конференция «Электрические сети: Надежность, Безопасность, Энергосбережение и Экономические аспекты» (Казань, 2022);

14. Международная научно-практическая конференция «Сейфуллинские чтения 18 (2) на тему «Наука XXI века - эпоха трансформации", посвященной 65летию КАТУ имени Сакена Сейфуллина»» (Астана, 2022).

Результаты исследования были доложены на заседании геотехнической службы карьера ТОО «Акжарык Комир» и внедрены на объектах исследования

ТОО «Научно-технический центр «Альтернатива»»».

Публикации. Основные результаты исследования по теме диссертации представлены в форме докладов на 19 международных конференциях, из них 7 докладов были оформлены в виде статей, индексируемых в международных базах данных WoS, Scopus. По теме диссертации опубликованы 8 статей в рецензируемых журналах, входящих в наукометрические базы данных WoS, Scopus, рекомендованные ВАК РФ. Новизна разработок подтверждается 2 полученными патентами РК и 1 свидетельством интеллектуальной собственности.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложена на 162 страницах машинописного текста, содержит 59 рисунков и 8 таблиц, список цитируемой литературы представлен 110 наименованиями. Имеются 2 приложения.

Во введении приведено обоснование актуальности работы, поставлены цели диссертационной работы, показывается практическая ценность работы, излагаются научные результаты.

В первой главе приведены основные краткие горно-геологические характеристики месторождений полезных ископаемых Казахстана, проведен анализ факторов, влияющих на развитие геомеханических процессов бортов карьеров, сделан сравнительный анализ каждого метода контроля устойчивости бортов карьера и примеры их применения. Выполнен обзор волоконно-оптических датчиков и их применение, выявлены преимущества по сравнению с традиционными датчиками.

Во второй главе представлена основа физико-математической модели процесса преобразования внешних оптических сигналов в визуальные сигналы, позволяющие с помощью оптических методов объяснить возникновения смещения в горных породах. Построены выражения, позволяющие выполнить расчет смещения величины интенсивности светового сигнала с помощью анализа зависимости показатей преломления света от геометрических характеристик пород и условия деформации. В третьей главе проведены экспериментальные исследования теоретических положений, описанных во второй главе. Обработаны результаты экспериментальных исследований при использовании оптического волокна для построения комплекса контроля смещений бортов карьеров. Проанализированы существующие методы контроля устойчивости бортов карьеров и предложен метод контроля с использованием Single Mode оптического волокна стандарта G.652 в качестве волоконно-оптического датчика. Показано, что управляемый аппаратно-программный комплекс контроля с использованием волоконно-оптических датчиков смещения с низким коэффициентом затухания сигнала и высокой помехозащищённостью формируют возможность с высокой точностью до 0,1 мм контролировать подвижку бортов карьера и прогнозировать внезапные обрушения прибортового массива.

**В четвертой главе** проведена разработка аппаратно-программного комплекса контроля с использованием волоконно-оптических датчиков смещения и схемы соединения. Реализована практическая апробация аппаратно-программного комплекса контроля с использованием волоконно-оптического датчика в условиях предприятий. Развитие и внедрение аппаратно-программного комплекса контроля с использованием волоконно-оптических датчиков смещения позволяет своевременно контролировать и уведомлять персонал о возникающих опасностях, что не вызывает сомнений в актуальности и использовании предложенного научно-технического решения.

В конце каждой главы представлены выводы.

**В заключении** приведены основные научные знания, представленные в виде результатов диссертационной работы.

## ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время в Казахстане современное состояние устойчивости бортов карьеров является одним из проблемных вопросов в горнодобывающей промышленности, где разработка месторождений полезных ископаемых осуществляется открытым способом [1]. Основными из них являются, следующие месторождения: угольные, меднорудные, железорудные, полиметаллические, золоторудные, бокситовые, марганцевые и другие. Добыча полезных ископаемых открытым способом ведется на более чем 50 крупных и средних месторождениях.

В зависимости от глубины, открытая разработка отдельных месторождений в Казахстане достигла от 400 м и до 600 м, а в большинстве других карьеров составляет от 100 м до 300 м. С увеличением глубины открытой разработки также увеличится срок службы бортов карьеров. Существующая открытая разработка характеризуется наличием карьеров со сроком службы более 50-60 лет (рисунок 1), когда средний расчетный срок службы карьеров составляет от 20 до 30 лет. В связи с этим, по мере увеличения глубины разработки ухудшаются горно-геологические условия месторождений.

В настоящее время развитие угольных разрезов и карьеров характеризуются модернизацией, приобретением новых технологий добычи полезных ископаемых, использованием новых технологических решений, что приводят к улучшению ведения горных работ. В этом случае при открытой разработке будут играть особую роль в надежном объяснении, предоставлении и контроле состояния устойчивости бортов карьеров.

Современные масштабы добычи полезных ископаемых требуют углубленных исследований и постоянного контроля геомеханических процессов, происходящих на бортах карьера во время эксплуатации карьера. Желательно, чтобы каждый карьер был оснащен автоматизированным комплексом контроля



состояния устойчивости бортов.

Рисунок 1 - Общий вид карьера «Соколовский» [1]

В Казахстане, следующие организации, как как НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», НАО «КазНИТУ им. К. И. Сатпаева», ТОО «Казгипроцветмет», ИГД им. Д.А.Кунаева изучают вопросы геомеханических исследований открытых способов разработок добычи полезных ископаемых. В России маркшейдерский факультет Санкт-Петербургского, Московского и Екатеринбургского государственных горно-технологических университетов. За рубежом Австралия, Канада, Соединенные Штаты Америки, Германия, Африка и другие страны уделяют этому вопросу большое внимание.

### 1.1 Основная терминология открытых способов разработок

Основные термины и определения метода разработки для контроля устойчивости бортов карьера даны достаточно подробно в [2]. Горные предприятия, разрабатывающие полезные ископаемые открытым путем, называются карьерами. На практике открытый способ угольного месторождения еще называют разрезом.

В случае открытой добычи полезных ископаемых горные работы делят на добычные и вскрышные. Добычные – это выемка, перемещение и хранение или выгрузка руд с полезными ископаемыми. Вскрышные – это выемка, перемещение и размещение вскрышных пород, не содержащих полезных ископаемых.

Месторождение или его часть, разрабатываемая карьером, называется карьерным полем. Карьерное поле – это геометрическая фигура, характеризующаяся частями в плане и глубине; это часть земельного участка карьера, в котором также расположены промышленные зоны, производственные объекты и вскрышные породы карьера [3].

Уступ – это отдельно развитая часть слоя породы в виде ступеней (рисунок 2).



Рисунок 2 - Часть слоя породы в виде ступеней

Различают нерабочие и рабочие уступы. Вскрышные или добычные работы производятся на рабочих уступах. Необходимое для разработки уступа участок с оборудованием, называется рабочей платформой. Ограничивающие по высоте горизонтальную или наклонную поверхность уступа называют нижней и верхней платформой. Наклонную поверхность, которая ограничивает уступ со стороны пространства разработки называют откосом уступа. Угол между откосом уступа — это угол между горизонтальной плоскостью и поверхностью откоса уступа.

Линия, которая пересекает откос с верхней и нижней платформ называют верхней и нижней бровкой (рисунок 3).



Рисунок 3 – Нижние и верхние бровки

Когда определяется угол наклона бортов, уровень детализации повышается. Обычно угол наклона откоса определяется вместе с конфигурацией уступа в геомеханической области (рисунок 4).

Часть уступа, подготовленная для разработки по его длине, называется рабочим фронтом уступа, который измеряется его длиной. Ступенчатая боковая поверхность, образованная площадкой уступа, откосом и ограничивающая пространство разработки, называется бортами карьера.

Одним из основных параметров для определения геометрии уступа является эффективный угол откоса уступа, т.е. угол на который предположительно сдвинется поверхность уступа вглубь массива (рисунок 5).

Угол откоса зависит от комплекса факторов, включающих:

- структурное строение (ориентация, сплошность расстояния между

разрывными нарушениями);

- состояния разрывных нарушений (сдвиговая прочность, степень неровности);

- компетентность (качество) пород, слагающих массив;

- метод выемки (бурение, взрывание, порядок отработки и тип оборудования);

- вид и интенсивнось отборочных работ;

- факторы окружающей среды (замерзание, оттаивание и осадки);



- срок службы уступа.

Рисунок 4 -Конфигурация уступов и откосов между съездами

Существуют несколько подходов к документированию данных по фактическим углам откоса бортов уступов. Основной метод – получение величины угла обратным пересчетом с использованием данных маркшейдерской съемки или плана горных работ, показывающих положение подошв верхних бровок уступов. Но при этом получают значительно пологие угля (2-100С), чем на самом деле, из-за опасений маркшейдеров (или отсутствия у них разрешения) проводить съемку ближе к бровке или подошве уступа. Также могут использоваться топографические планы на основе результатов аэрофотосъемки, но их точность ограничена разрешающей сопособностью и контурными интервалами.



Рисунок 5 – Определение величины сработки верхней бровки уступа и эффективности угла откоса

Прямое измерение фактических углов откосов бортов уступов с помощью компаса Брантона или косвенное измерение с помощью инклинометра (рисунок 6), как правило дает более точное значение (±2-50С). Для использования обоих методов необходим доступ к уступу [3].



Рисунок 6 – Измерение угла откосов с помощью инклинометра

Борт, представленный рабочим уступом, называется рабочим бортом. Линия границы карьера на поверхности земли — это верхний контур карьера, а линия в нижней части границы — это его нижний контур. Во время горных работ положение рабочего борта, верхнего и нижнего контуров карьера пространственно изменяются. Постепенно уступ, начинающийся сверху, достигает проектной границы очертания карьера. К моменту завершения проекта вскрытия они соответствуют окончательной глубине и окончательному размеру планируемого карьера. Откос уступа нерабочего борта карьера, на котором не ведутся горные работы, отделен бермой транспортировки и безопасности.

Угол между обрушением борта и линией, соединяющей верхний и нижний контуры, называется углом откоса бортов карьера. Его величина зависит от ширины платформы и высоты уступа.

Для расположения, через которое горная масса нового уступа будет транспортироваться к транспортной коммуникации вышележащего или поверхностного уступа, необходимо вскрыть уступ и выполнить специальные (вскрывающие) горные работы с поверхности или вышележащего уступа. В большинстве случаев эти выработки соединяют точки, расположенные на разных высотах (если вскрыт уступ, то разница в высоте равна высоте уступа), поэтому он имеет определенный наклон. В процессе строительства вскрытие обычно имеет поперечное сечение, близкое к трапеции или треугольнику, которые называются капитальными траншеями и полутраншеями соответственно.

Для того, чтобы создать начальный фронт работ на обнаженном уступе, необходимо выполнить значительную длину горизонтальной разработки от вскрытия в зависимости от размеров поперечного сечения котлована или разрезной траншеи.

Возможную производительность карьера, размер его поверхности и общий объем добычи полезных ископаемых определяет конечная глубина разработки наклонных и крутых залежей. Конечная глубина разработки наклонных и крутых залежей определяется природными условиями и незначительно меняющимися в течение всего периода разработки. Конечная глубина карьера определяется в начальных условиях проектирования месторождения, предусматривающие возможность открытой добычи полезных ископаемых на глубине 700-900 метров [3]. Размеры карьера определяются размерами месторождения, дном карьера и соответственно глубиной, углом боковых откосов прибортового массива, задающиеся аналитически или графически. Дно карьера по форме обычно похожа на овал. Его размер определяется с помощью чертежа разрабатываемой части проекта месторождения на отметке глубины карьеров. Минимальный его размер определяется загрузками пород на нижний уступ, где ширина должна быть не менее 20 м и длина не менее 50-100 м и условиями безопасной выемки. Длина карьера может колебаться от 100 м до 8 км, соответственно ширина может достигать до 4 км.

Угол наклона откосов бортов карьера определяется условиями устойчивости породы и размещением транспортной коммуникации, предпринимающие шаги по сокращению объема работ по вскрытию.

Важный показатель, определяющий производственную мощность и срок

службы существования карьера – это общий объем горной массы.

Площадь, форма контура и окружность дна карьера в основном зависят от размера и конфигурации месторождения. По возможности дну карьера придают круглую форму, чтобы повысить устойчивость бортов и уменьшить объем извлекаемой вышележащей породы.

Запасы полезных ископаемых в профиле карьера являются наиболее важными показателями, которые определяют возможные масштабы добычи, срок службы карьера и экономические результаты разработки. Запасы каждой скальной стенки (горизонта) и всего карьера устанавливаются в процессе разведки месторождения, а затем в процессе проектирования и эксплуатации карьера, в соответствии с установленными и периодически меняющимися минеральными условиями, контур карьера уточняется и пересчитывается.

### 1.2 Краткая характеристика карьеров Казахстана

Казахстан после России занимает второе место по объемам добычи полезных ископаемых среди стран СНГ. Имеет огромный запас полезных ископаемых, включающий в себя все химические элементы периодической таблицы Менделеева [1]. Казахстан можно отнести к крупной сырьевой стране, и его экономика зависит от развития сырьевого сектора. В связи с этим Казахстан принял ряд законодательных актов в поддержку усиления добычи и переработки природных ресурсов [1].

Основные месторождения полезных ископаемых в Казахстане, которые первоначально классифицируются в соответствии с основными извлекаемыми компонентами: уголь, медная руда, железная руда, золотая руда, полиметаллы, марганцевая, бокситы.

Угольные месторождения. Большая часть оцененных запасов (63%) представлена каменным углем Карагандинского, Экибастузского, Темиз-Коржинкольского бассейнов, Куучекинского, Борлинского, Шубаркольского, Каражиринского и некоторых других месторождений. Остальная часть (37%) представлена бурым углем, в основном сосредоточенным в Тургайском, Нижнеилийском, Майкубенском бассейнах и других месторождениях. Казахстанский уголь характеризуется широким спектром стадий разложения - от газификации до тонкого спекания. В настоящее время разработаны и эксплуатируются Карагандинский, Экибастузский и Майкубенский бассейны, Куучекинское, Борлинское, Шубаркольское, Каражиринское месторождения и несколько небольших месторождений в различных регионах Республики Казахстан. Угледобывающие предприятия в Карагандинской области разрез «Куу-Чекинский», разрез «Молодежный» (рисунок 7), разрез «Акжарык Комир» (рисунок 8) являются каменноугольными. Количество этих месторождений незначительно, и для местного района требуется добыча угля. Разработкой этих месторождений занимаются ТОО «Экибастуз Комир», АО «АрселорМиттал Темиртау», АО «Шубарколь Комир», ТОО «Каражыра», ТОО «Акжарык Комир» и ТОО «Корпорация Казахмыс».



Рисунок 7 - Разрез «Молодежный»

Отличительной особенностью горных пород является то, что прочность на растяжение значительно ниже нежели прочность при сжатии и сдвиге прибортового массива. По утверждению Г.Л.Фисенко горные породы как слоистые среды разрушения применяют к себе закон «сыпучих сред». Теория предельного равновесия «сыпучих сред» является частным случаем определения угла и предельного контура откоса.



Рисунок 8 - Разрез ТОО «Акжарык Комир»

В прибортовом массиве бортов карьера предельные условия равновесия любого участка имеют следующий вид выражения  $\tau = F(\sigma_n)$ , где  $\tau$  и  $\sigma_n$  – касательные и нормальные напряжения по заданной площадке. Это отношения для любой породы определяется кривой АБВ (рисунок 9) и при предельном напряжении  $\tau = C + f\sigma_n$  может быть заменен прямой линией, где C – сцепление в единицах, соответствующих  $\tau$  и  $\sigma_n$ ; f – средняя величина коэффициента внутреннего трения на заданном интервале напряжений. В расчетах эта величина обычно заменяется тангенсом угла внутреннего трения:  $f = tg\varphi$ . Таким образом, основным

условием для окончательного баланса горных пород в любом месте является то, что сила сдвига T равна сумме трения и сцепления T = fN + CS, где N - действующие силы на заданной площадке площадью*s*. Разделив силу на его площадь, $была получена конечная форма равновесия <math>\tau = f\sigma_n + C$ .



Рисунок 9 – Общая диаграмма графика сопротивления горных пород сдвигу

В решении данной проблемы огромный вклад внесли отечественные и зарубежные ученые. Однако, в силу разнообразия и сложности горнодобывающей промышленности вопросы обеспечения устойчивости бортов карьера требуют дальнейшего совершенствования.

#### 1.3 Факторы, влияющие на устойчивость бортов карьера

В условиях открытых горных работ под геомеханическими процессами [4] понимаются различного рода деформации на карьере. Исследованиями деформаций карьерных бортов и их классификацией занимались ученые Г. Л. Фисенко, Ф.П. Саваренский, Н.Н. Маслов, П.Н. Панюков, В.Д Ломтадзе, Е.П. Емельянова, А.М. Демина, Э.Л. Галустьян [4].

Устойчивость бортов карьера определяется силовым состоянием горных

пород. Условия деформации и напряженное состояние прибортового массива складываются из комбинации различных факторов, которые делятся на две категории: природные и горнотехнические. К природным факторам относятся: климат (температура воздуха, осадки, потенциал ветра, температурные условия горных пород); геология (состав, структура, состояние и природа горных пород); гидрогеология (наличие поверхностных вод и водоносных горизонтов, контакт с наводнениями и структурные нарушения). Горнотехническими являются способ разработки участка, комплекс разработки, способ дробления горной массы карьера, способ сброса пластов и геометрические параметры.

Наиболее значимыми факторами, влияющими на устойчивость бортов карьера, являются: физико-механические свойства горных пород и контактов с породами; структура и конструктивные характеристики массива приборов; геометрические параметры склона; напряженно-деформированное состояние массива приборов; первые два фактора технологии добычи являются естественными и неотъемлемыми факторами этого конкретного месторождения. Они не могут быть изменены и должны быть изучены и учтены при расчете устойчивости борта. Третий и четвертый факторы связаны с используемой технологией добычи полезных ископаемых и должны быть определены в процессе решения проблемы обеспечения устойчивости борта карьера.

По выводам Р.П. Окатова [5], обрушение большинства рудных карьеров, борта которых сложены горными породами и полукамнями, чаще всего происходит на ослабленной поверхности естественного происхождения и попадает в выработанное пространство. Породы, из которых состоит край угольной шахты, имеют осадочное происхождение. В условиях осадочных пород почти все оползни происходят на поверхности или почве угольного пласта, вдоль поверхности контакта горных пород, геологического нарушения и редко в направлении трещин и растрескивания. Эти утверждения были получены подтверждением А. И. Ильина и Е. Л. Галустяна [4].

Осадочные карьеры имеют пластовый или слоистый состав из

горизонтальных, плоских, наклонных, крутых или мульдообразных залегающих пластов (слоев). Угол падения слоя является определяющим условием устойчивости борта, работающего в осадочной породе. Процесс выветривания и осыпания каждого слоя породы может происходить с разной интенсивностью. Осадочные отложения характеризуются значительной неоднородностью пород в отдельных слоях (от слабых рыхлых глинистых и песчано-глинистых пород до полускальных пород - песчаника, сланца, известняка) и низкой устойчивостью к атмосферным воздействиям. Разновидности глинистых пород также склонны к набуханию и размоканию, что оказывает значительное влияние на устойчивость склона. Типичной деформацией склонов осадочных пород являются гравий и оползни. Глинистые породы наиболее подвержены выветриванию и осыпанию. В одних и тех же породах оползни обычно происходят при контакте этих пород с их более сильными разновидностями или в более слабых прослоях.

Среди факторов, влияющих на устойчивость борта карьера, Р. П. Окатов, Е. Л. Галустян и другие ученые особое внимание уделяют методам буровзрывных работ на контурных участках и методам вырезания уступов. В результате взрыва раскрываются существующие трещины и пояляются новые, а процесс осыпания породы усиливается. Исходя из вышеизложенного, отталкиваясь от различных факторов, влияющих на устойчивость борта угольного разреза, следует различать:

- 1. Физико-механические свойства горных пород;
- 2. Структура и тектонические характеристики горного хребта;
- 3. Технология буровзрывных работ;
- 4. Процесс выветривания горных пород, из которого состоит приборная панель.

Первые два и четвертый факторы имеют естественное происхождение и присущи конкретному горному массиву. Они не могут быть изменены и должны быть изучены и учтены при расчете устойчивости борта карьера. Третий фактор - это результат производственной деятельности человека, который должен быть

управляемым при решении проблемы обеспечения устойчивости бортов карьера. Далее проанализированы состояние изученности проблемы о вышеперечисленных факторах.

Методы определения физико-механических свойств горных пород. Некоторые специализированные организации такие как ВНИМИ, ВИОГЕМ, УкрНИИпроект, ВНИИцветмет, КарТУ имени Абылкаса Сагинова (КарПТИ) и др. занимаются исследованием физико-механических свойств горных пород. Такие ученые как, М.М. Протодьяконов, К.В. Руппенейт, Л.И. Барон, Г.Л. Фисенко, Г.Н. Кузнецов, Н.Н. Куваев, Ю.Н. Малюшицкий, С.И. Попов, Н.Н. Маслов, И.И. Попов, В.Д. Ломтадзе, Е.И. Ильницкая, Тедер, Л.С. Бурштейн, Г.К. Бондарик, М.Ю. Карташов, М.А. Цытович, Р.И. и др. внесли значительный вклад в изучение физико-механических свойств горных пород.

Способы определения физико-механических свойств горных пород: лабораторные методы испытания образцов горных пород; методы испытания горных пород в условиях на месте; методы обратного расчета оползней и обвалов; косвенные методы.

Анализ литературы по исследованию физико-прочностных свойств горных пород показывает, что эта проблема не может быть решена односторонне, и различные методы и их разумные комбинации должны использоваться комплексно.

При изучении физико-механических свойств горных пород в лабораторных (натурных) условиях необходимо создавать условия, максимально приближенные к природным, и для решения этой проблемы следует дополнительно изучить надежность коэффициента структурного ослабления с учетом реологических факторов. Для решения этой проблемы необходимо провести дальнейшие исследования.

Методы исследования структурно-тектонических особенностей откосов. Структура и тектонические характеристики горного массива характеризуют разобщенность и пластическую нарушенность породы, степень и характер ее трещиноватости, расслоения и сланцеватости. В разработке методов и исследованиях структуры и тектонических характеристик особенностей откосов занимались такие ученые, как А.Е. Михайлов, И.И. Ермаков, А.Ж. Машанов, Н.Н. Куваев, В.Г. Зотеев, М.В. Рац, С.Н. Чернышев, И.И. Попов, Р.П. Окатов, Ф.К. Низаметдинов, С.Г. Ожигин, С.Б. Ожигина и другие.

Существующие методы измерения трещиноватости горных хребтов в основном сводятся к пяти группам: прямое измерение; исследование керна разведочных скважин; наблюдение за потоком горного хребта или сжатого воздуха через трещины во время специальных исследований; геофизические методы; использование ультразвука.

При разработке карьеров, начиная с 2000 года, наиболее распространенным методом является прямое измерение элементов, в которых возникают трещины, с помощью измерительной станции компаса, а также размера конструктивного блока с помощью традиционной рулетки. В связи со структурными особенностями месторождения, И. И. Поповым, Р. П. Окатовым, Ф. К. Низаметдиновым рекомендуется оценивать плотность точки измерения путем определения наилучшего шага измерения на основе математических и статистических методов. Результаты измерения качества горных трещин обрабатываются с использованием прямоугольных, круговых диаграмм и трехмерных сеток, и соответственно строятся структурный профиль и диаграмма трещин.

Позже, с появлением компьютерных технологий (2004), М. Б. Искаков предложил выполнять задачу идентификации систем трещин с помощью интерактивного метода самоорганизующегося анализа, основанного на нахождении наибольшей площади конденсации точки наблюдения. Этот метод используется с появлением первых лазерных геодезических приборов, С.К. Абельсеитова рекомендует использовать лазерную рулетку (DISTO) для определения геометрических параметров ослабленной поверхности горной местности, чтобы определить расстояние наклона, и использовать теодолит Т-30

для измерения угла наклона.

В работе [6] авторы предлагают геофизический метод, основанный на цифровой радиотомографии с использованием георадара (географическое сканирование) для изучения трещиноватости горных пород в части структуры суши.

В настоящее время существуют методы [7] дистанционного изучения трещиноватости горных пород по фотографиям. Период появления этих методов можно отнести ко второй половине XIX века. Движущей силой его разработки является необходимость решения горной задачи - определения объема взрывоопасной горной массы при разработке месторождения открытым способом. Для решения этой проблемы Л. И. Бароном в 1960 году было предложено предварительно сфотографировать обрушившуюся поверхность горного массива, чтобы определить размер по фотографии. Этот метод называется фотопланиметрическим.

Авторы [8-10] описывают методы дистанционного исследования, но они не полностью отвечают современным требованиям. Очевидно значительное отставание метода изучения строения гор от научно-технического прогресса цифровой и компьютерной техники и технологического производства.

В настоящее время существуют следующие основные методы оценки горной массы уступа карьера и массы взрывной горной массы: полномасштабные исследования трещиноватости горных пород; полномасштабные методы статистической оценки и фотопланиметрический метод [11].

Основным недостатком этих методов является то, что площадь исследуемой поверхности уступа склона невелика. Благодаря соотношению роста человека к высоте склона уступа можно проводить исследования (в среднем 10%). Кроме того, методы, связанные с полноразмерным измерением средней плотности (трещиноватости) в массиве, которые сопровождаются неблагоприятными условиями труда и в некоторых случаях опасны для здоровья и жизни специалистов, работающих на объекте. Поэтому использование этих методов существенно ограничивает область наблюдения и иногда не разрешается иметь необходимый объем информации для исследования. Полученные результаты измерений очень субъективны, поскольку определение является выборочным, и многие значения не включаются в расчет. Невозможно определить фактический размер блоков и глыб на вершине уступа или в отдельных точках обрушенной поверхности.

Фотопланиметрический метод, основанный на использовании штампов для съемки горных массивов для масштабирования изображений и простой привязки. Этот метод является одним из наиболее осуществимых методов изучения структуры, но у него есть много недостатков: при съемке наклонной стенки уступа возникают нерешенные проблемы, связанные с искажениями на фотографии; в некоторых случаях небезопасные условия добычи и много времени, затрачиваемого на измерение и обработку полученных данных [12]. В настоящее время уделяется внимание автоматизации обработки изображений горного массива для получения оперативной информации о его состоянии [13]. Авторы [12] предложили использовать наземную технологию лазерного сканирования вместо нацеливания на разрыв горных массивов, которые используются для взрывного дробления горных массивов при открытой добыче полезных ископаемых взамен на фотопланиметрические исследования.

Этот метод является одним из прогрессивных методов. В результате работы сканирования горного массива может быть получена модель наклона уступа, детали которой позволяют определить блочность, кусковатость, трещинную систему и ее направление в пространстве. В настоящее время некоторые горнодобывающие компании Казахстана внедряют технологию наземного лазерного сканирования [14] для изучения структуры и структурно-тектонических характеристик массивов бортов карьера. Однако, учитывая принцип работы лазерного сканера на огромном количестве точек (миллионы), становится невозможным определить все следы трещин, выходящих на поверхность бортов карьера.

Анализ литературы о методах изучения структуры склонов и

тектонических характеристик карьеров показывает, что современные методы (фотопланиметрический, лазерное сканирование) имеют свои преимущества и недостатки. Поэтому для решения этой проблемы необходимо разработать новый метод изучения трещиноватости горных пород на основе комплексного использования.

Исследовать влияние буровзрывных работ на устойчивое состояние бортов карьера. Сейсмический эффект взрыва обусловлен его силой, которая зависит от массы взрывчатого вещества, детонирующего одновременно, и расстояния от места взрыва до защищаемого объекта. В результате взрыва крупных взрывчатых веществ в приконтурной зоне карьера твердость и прочность породы снижаются. Как показали многие исследования, последствия взрыва начинают влиять на устойчивость бортов карьеров на расстоянии 30-50 м [4].

Ряд казахстанских и зарубежных ученых занимаются исследованиями влияния буровзрывных работ на устойчивость склонов карьеров, сложенных из скальных и полускальных пород. Решению этих вопросов посвящены труды Г.Л. Фисенко, С.И. Попова, М.А. Микулинского, В.К. Рубцова, Ю.И. Малющицкого, И.И. Попова и Р.П. Окатова, Л.И. Барона, М.М. Протодьяконова, Ю.И. Туринцева, Б.П. Юматова, Ф.К. Низаметдинова, С.Г. Ожигина, С.Б. Ожигиной, Х.М. Касымкановой и др. Однако из-за разнообразия горно-геологических особенностей месторождения и условий добычи, разработанных карьером, решения, предложенные в этих работах, не всегда могут быть использованы в других карьерах. Кроме того, все работы по этому вопросу направлены на изучение влияния крупномасштабных взрывов на состояние устойчивости нерабочих (стационарных) бортов карьера, а также влияния бортов карьера на профиль предела добычи.

При использовании мощного горного оборудования с увеличенными линейными параметрами для разработки угольных пластов, сложенных неоднородными осадочными трещинами и слоистыми породами, высота рабочего уступа достигает 40 м и более. В этих условиях, принимая во внимание влияние буровзрывных работ на целостность массива инструментов, особенно важно стабилизировать рациональность параметров откоса карьера (рабочий уступ, группа рабочих уступов, борт разреза). Следовательно, продолжение дальнейших исследований на карьерах будет оптимальным для повышения эффективности и безопасности открытой добычи полезных ископаемых.

Исследование процесса выветривания горных пород, составляющих прибортовой массив. Природные климатические условия влияют на температуру горных пород. Температура и влажность окружающего воздуха в сочетании с различными атмосферными воздействиями (ветер, дождь, снег) определяют интенсивность процесса выветривания (растрескивания) и осыпания горных пород на участке. Повторяющийся цикл замерзания и оттаивания воды из трещин в породе снижает ее прочностные характеристики.

Угольные залежи имеют осадочное происхождение, и они характеризуются образованием или слоистым составом вмещающей породы. В зависимости от типа породы, из которой состоит порода, процесс выветривания и осыпания каждого слоя породы может происходить с разной интенсивностью. Характерным явлением осадочных пород является значительная неоднородность пород в разных слоях. В то же время здесь могут быть от слабых рыхлых глинистых и песчано-глинистых пород до полуподвальных пород - песчаника, сланца, известняка. Породы пластов угольных карьеров в основном представлены аргиллитами, углеродистыми сланцами, глинистыми и песчано-глинистыми породами, алевролитами и в меньшей степени песчаниками. Разнообразие глинистых пород склонно к набуханию и размоканию, что оказывает значительное влияние на устойчивость бортов. Аргиллит, углеродистый сланец и алевролит подвержены сильному выветриванию и осыпанию после воздействия из-за потери влаги. Типичная деформация бортов осадочных пород — это гравий и оползни. Глинистые породы наиболее подвержены выветриванию и осыпанию. Поэтому залежи угля на открытых склонах во время естественного процесса выветривания отрицательно влияют на их устойчивое состояние.

Методика мониторинга выветривания горных пород и организация

наблюдений описаны в [15]. Как указано в источнике [15], прочность осыпания в значительной степени зависит от способа резки выступа, когда выступ находится в предельном положении. Ученые доказывают взаимосвязь между прочностью породы, параметрами уступа и временем его существования в устойчивом состоянии бортов карьера. Следовательно, при влиянии структурных характеристик участка и других факторов очевидно, что на устойчивость борта карьера влияют временные факторы.

Анализ литературных источников методов изучения процесса выветривания горных пород, составляющих приборный массив, показывает, что существует значительное отставание существующих методов от современных возможностей цифровой и компьютерной техники и технологий.

Анализируя существующие методы расчета устойчивости склонов карьеров, следует отметить, что разработаны достаточно надежные расчетные схемы, которые соответствуют различным горно-геологическим и горнотехническим условиям, сложившимся на месторождении.

Различные геологические характеристики разрабатываемых месторождений исключают существование универсального решения этой проблемы. Необходимо тщательно проанализировать конкретные условия и выбрать одну или несколько схем расчета. Для определенных условий залегания горных пород, составляющих приборную решетку, каждый метод имеет свою собственную область применения.

В настоящее время большинство разработанных методов являются статическими (мгновенными) или квазистатическими, а методы расчета устойчивости по динамическим формулам, учитывающие реологические свойства деформации, еще не разработаны.

При решении проблемы устойчивости бортов на карьерах в условиях угольных пластов, подверженных сильным процессам выветривания, следует уделять внимание совершенствованию метода оценки устойчивости бортов, созданию новых методов и использованию современных цифровых технологий и технологий для изучения реологических процессов, происходящих в массиве приборов. Дальнейшие исследования в этом направлении должны быть продолжены.

#### 1.4 Методы контроля устойчивости бортов карьеров

Существующие разработки мероприятий по контролю устойчивости бортов карьеров в основном зависят от точности условий и причин возникновения деформации. Прогнозирование и контроль устойчивости бортов карьера являются главными задачами при ведении открытых горных работ. Учитывая факторы, влияющие на устойчивость бортов карьера, необходимо знать виды нарушений, его характер и конфигурацию, виды деформации и его длительность, параметры прибортовых массивов, характеристику и залегание пород. Такую информацию очень сложно получить без систематических наблюдений. В инструкции [16] и в методических указаниях [17] представлены вопросы наблюдения за деформациями бортов на карьерах и разработки мероприятий по обеспечению их устойчивости.

В горнодобывающей промышленности существуют основные традиционные методы контроля за смещениями, как (геометрические, тригонометрические, нивелирование, геодезические) полигонометрия, триангуляция, (трилатерация), стереофотограмметрия), которые приведены в работе А.Г. Григоренко, их можно отнести к традиционным.

Анализ научной литературы показывает, что существуют методы контроля устойчивости бортов карьера, которые можно разделить на традиционные и с использованием современных геодезических оборудований и технологий. Существующие методы представлены в работе [18], дополнены и представлены традиционные методы контроля устойчивости бортов карьера сведены на рисунке 10, а нетрадиционные методы контроля устойчивости бортов карьера с использованием современного геодезического оборудования и технологий представлены на рисунке 11.



Рисунок 10 – Традиционные методы контроля устойчивости бортов карьера

К достоинствам традиционных методов можно отнести недорогое и доступное геодезическое оборудование, высокую точность, а к недостаткам неполный охват наблюдений недоступных и опасных мест деформаций на карьере, трудоемкость полевых и камеральных работ. Ученые А.И. Ильин, А.М.Гальперин, В.И.Стрельцов для решения этого вопроса предлагали геометризацию оползневых тел выполнять с помощью аэрофотограмметрии. Но аэрофотограмметрия имеет ограниченное применение как по точности, так и по техническим причинам.

Среди существующих 12 методов измерения и контроля состояния бортов карьера по мнению ученых Ю.И.Туринцева, Б.Д.Половцова, В.А.Гордеева наиболее предпочтительными методами являются: геометрическое выравнивание и гидравлическое выравнивание, планировка и пространственное трехслойное измерение, измерение расстояния до линии профиля с помощью светомеров, измерение наклона линии профиля, измерение специального грунтового светлого камня, и автоматическая система для определения относительного перемещения контрольной точки посредством дистанционной передачи информации.

Приоритетный метод, указанный в конце, является наиболее многообещающим.



Рисунок 11 - Нетрадиционные методы контроля устойчивости бортов карьера с использованием современного геодезического оборудований и технологий

В разные годы была проведена большая работа по совершенствованию и внедрению различных методов инструментального наблюдения за условиями бортов карьеров в Казахстане учеными И.И. Поповым, Р.П. Окатовым, М.Б. Нурпеисовой, А. Курманкожаевым, Ф.К. Низаметдиновым, С.Г. Ожигиным, Х.М. Касымкановой.

Опыт создания системы контроля состояния устойчивости бортов карьера на месторождениях Казахстана отражается в ряде статей [19-22] и докладов на Международных конференциях [23-26] казахстанских ученых. Где заложены научные основы геолого-маркшейдерского обеспечения контроля состояния устойчивости бортов карьера, которые позволили разработать и внедрить методики наблюдений с использованием современного геодезического оборудования и технологий, как высокоточные наблюдения с использованием электронных тахеометров; инструментальные наблюдения с применением глобальных навигационных спутниковых систем; автоматизированная система «GEOMOS»; наземное лазерное сканирование; наблюдения за сдвижением горных пород и земной поверхности с использованием радарной интерферометрии.

Высокоточные наблюдения с использованием электронных тахеометров получило наиболее широкое применение (рисунок 12). Система геомеханического контроля создана на более 30 карьерах Казахстана [27]. Достоинства метода: значительное сокращение времени на производстве полевых работ и камеральную обработку результатов измерений. Недостатки метода: невозможность полностью охватить наблюдениями недоступные и опасные места деформаций на карьерах; присутствие наблюдателя на опасных участках; локальный систематический контроль состояния устойчивости бортов карьера.

Инструментальные наблюдения с применением глобальных навигационных спутниковых систем получило также широкое применение на карьерах. Этот метод имеет существенные преимущества по сравнению с традиционными методами. Достоинства метода: независимость от погодных условий, времени суток и года; независимость от взаимной видимости между реперами; высокая автоматизация; широкий диапазон точности; возможность работы в движении и непрерывно. Недостатки метода: зависимость от препятствий; уязвимость от радиопомех; необходимость использования дорогостоящего оборудования [28]. В работе [29] рассмотрена технология GPS-наблюдения за стабильным состоянием бортов карьера. С учетом достоинств и недостатков электронной тахеометрии и GPS измерений, разработан метод производства инструментальных наблюдений с комбинированным использованием электронного тахеометра и GPS систем, которая апробирована на глубоких карьерах АО «Соколовско-Сарбайское горно-обогатительное производственное объединение». Данный метод представлен в статье [30] на примере ее внедрения на Соколовском карьере АО «Соколовско-Сарбайское горно-обогатительное производственное объединение».


Рисунок 12 - Электронный тахеометр Leica TS16

Автоматизированная система «GEOMOS» — это автоматизированная система для контроля состояния устойчивости бортов карьера, включая непрерывный автоматизированный контроль и мониторинг объектов исследования на основе использования глобальных навигационных спутниковых систем. Сведения о системе «GEOMOS» приведены в [31]. По литературным данным система была внедрена на Васильковском карьере ТОО «Алтынтау Кокшетау» в Казахстане [32], но из-за высокой стоимости эта технология пока не получила широкого применения в странах СНГ.

Наземное лазерное сканирование является самым быстрым и высокопроизводительным средством получения точной и наиболее полной информации о пространственных объектах, особенно информации на карьерах [33]. Поэтому технология лазерного сканирования в настоящее время активно внедряется в горнодобывающее производство. Авторы В. А. Середович, А. В. Комиссаров и др. в работе [34] подробно представили технологию лазерного сканирования. В статьях [35-37] приведен зарубежный опыт использования технологии лазерного сканирования для мониторинга и контроля исследуемых объектов, и сделаны выводы, основанные на преимуществах технологии трехмерного лазерного сканирования: высокая эффективность и высокая точность экспериментальных результатов данных процесса деформации. Опыт казахстанских ученых по организации использования технологии лазерного сканирования для мониторинга и контроля состояния устойчивости бортов карьеров был представлен в некоторых научных работах [23,25,28,38 и др]. Внедрение технологии лазерного сканирования в карьере АО «Соколовско-Сарбайское горно-обогатительное производственное объединение» позволяет быстро отслеживать состояние бортов карьеров и расположение горного транспортного оборудования, планировать горные работы и иметь цифровую объемную модель карьера в течение всего периода разработки участка, что является важной частью бортов карьера в системе контроля и мониторинга [39]. Достоинства: высокая точность, высокая скорость и плотность измерения. Недостатки: зависит от отражающей поверхности (способности) наблюдаемого объекта; ограниченный диапазон измерений.

Наблюдения за сдвижением горных пород и земной поверхности с использованием радарной интерферометрии (радиолокационный мониторинг) успешно проводится за рубежом с середины 1990-х годов. Существуют два метода радарной интерферометрии: спутниковый и наземный. Целью использования радиолокационных данных для мониторинга и контроля является своевременное обнаружение смещения и деформации земной поверхности и структуры на основе регулярного получения информации об исследуемом объекте дистанционными методами. В последние годы использование радиолокационной интерферометрии стало более актуальным и эффективным во всем мире. В Казахстане с 2012 года специалисты некоммерческого акционерного общества «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова» используют технологию спутниковой радиолокационной интерферометрии для проведения научных

38

исследований состояния угольных шахт в Карагандинской области [32]. В 2014 году на вновь разрабатываемой территории Карагандинского угольного бассейна был реализован проект по контролю и мониторингу деформации земной поверхности. В проекте использовались изображения, полученные итальянским спутником COSMO-SkyMed, для мониторинга и контроля деформации земной поверхности с помощью спутниковой радиолокационной интерферометрии. Результаты, полученные с помощью интерферограммы, демонстрируют высокую сходимость с результатами традиционного метода вычисления смещения земной поверхности [40]. В то же время спутниковая радиолокационная интерферометрия имеет недостатки и преимущества по сравнению с традиционными методами. Недостатки: это зависит от состояния подстилающей поверхности и погодных условий; частота повторных посещений спутника (от 3 дней и более); пространственное разрешение 50 см; необходимость обращения к цифровой модели местности и опорным точкам известных координат и высот, определенных на радиолокационном изображении, для того, чтобы для получения правильных результатов при построении цифровой модели местности. Преимущества: Он может проводить наблюдения в режиме реального времени, обеспечивая при этом визуализацию результатов наблюдений на большой площади. Наземная радиолокационная интерферометрия менее распространена, чем спутниковая интерферометрия, и имеет следующие недостатки: высокая стоимость используемого для нее оборудования и программного обеспечения; отсутствие унифицированных методов измерений и процедур обработки данных.

Анализируя работу [41] и дополнив данными все методы контроля в таблице 1 сведены все достоинства и недостатки каждого из существующих методов контроля устойчивости бортов карьера с использованием современного геодезического оборудования и технологий.

На основе анализа современной технологии контроля и мониторинга устойчивости бортов карьера можно сделать следующий вывод о том, что в настоящее время развитие карьеров характеризуется усовершенствованием

новых процессов и приобретением новых средств, новейших технологических решений при добыче месторождений полезных ископаемых для безопасной и бесперебойной работы в горнодобывающей промышленности.

Масштабы горных предприятий требуют постоянного контроля за происходящими геотехническими, геомеханическими процессами устойчивости бортов карьеров в период эксплуатации. В связи с этим карьеры должны быть снабжены автоматизированным комплексом контроля дистанционного управления устойчивости бортов карьеров для обеспечения безопасной работы на горнодобывающих предприятиях, а именно:

- Поддерживать безопасные условия труда персонала и оборудования;

- Предварительное предупреждение о существовании потенциально нестабильных участков с целью изменения возможных планов добычи полезных ископаемых для минимизации воздействия смещения горных пород на борту;

- Предоставление геомеханической информации для анализа механизма барьеров устойчивости развития, формулирования планов корректирующих действий и разработки последующих советов;

- Оценка и контроль устойчивости бортов.

Методы контроля	Достоинства	Недостатки	
1	2	3	
с использованием	значительное сокращение вре-	невозможность полно-	
электронных тахео-	мени на производство полевых	стью охватить наблюде-	
метров	работ и камеральную обра-	ниями недоступные и	
	ботку результатов измерений	опасные места	

Таблица 1 - Достоинства и недостатки каждого из существующих методов

		деформаций на карьерах;
		присутствие наблюда-
		теля на опасных участ-
		ках; локальный система-
		тический контроль со-
		стояния устойчивости
		бортов карьера
с использованием	независимость от погодных	зависимость от препят-
глобальных навига-	условий, времени суток и года;	ствий; уязвимость от ра-
ционных систем	независимость от взаимной ви-	диопомех; необходи-
	димости между реперами; вы-	мость использования до-
	сокая автоматизация; широкий	рогостоящего оборудова-
	диапазон точности; возмож-	ния
	ность работы в движении и	
	непрерывно	
с использованием	высокая точность, погреш-	высокая стоимость; за-
радиолокационного	ность не выше 1 мм; высокая	труднения применения
мониторинга	дальность измерений	для долгосрочного кон-
		троля

## Продолжение таблицы 1

1	2	3
с использованием	простота использования; охват	погрешность до 20 мм;
цифровой фото-	широкого участка	низкая информативность
грамметрии		данных
с использованием	высокая эффективность и вы-	зависит от отражающей
лазерного назем-	сокая точность эксперимен-	поверхности (способно-
ного сканирования	тальных результатов данных	сти) наблюдаемого

	процесса деформации	объекта; ограниченный
		диапазон измерений
		высокая стоимость обо-
		рудования и программ-
		ного обеспечения к нему;
		отсутствие единой мето-
		дики измерения и про-
		граммы обработки дан-
		ных
с использованием	возможность проведения	зависимость от состоя-
лазерного спутни-	наблюдений в реальном мас-	ния подстилающей по-
кового сканирова-	штабе времени при одновре-	верхности и погодных
ния	менном охвате больших терри-	условий; периодичность
	торий с визуализацией резуль-	повторного посещения
	татов наблюдений	спутника (от 3 и более су-
		ток); пространственное
		разрешение 50 см

### 1.5 Анализ применения волоконно-оптической технологии на карьерах

С 2006 года в горнодобывающей промышленности была внедрена технология оптического волокна для обнаружения деформации [42]. Мировыми производителями волоконно-оптических датчиков являются Siemens, ABB, Rockettes, Waterford, Bedhess, Halliburton, Schlumberger, а также российские компании «Интел-Системы», «Омега», «Оптолинк». Анализ мирового опыта разработки волоконно-оптических датчиков в странах Западной Европы и США, а также разработки ученых стран СНГ, 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 другие показывает, что все работы направлены на совершенствование и создание различных волоконно-оптических технологий управления, мониторинга и измерения [43-48]. В источниках [49-51] рассматриваются вопросы, связанные с производством оптического волокна. Ведется научная работа в направлении использования волоконно-оптических датчиков для создания внутренней оптоволоконной сети с целью сбора информации в условиях повышенного риска искро- и взрывоопасности. В частности, много работы [52-56] посвящены использованию волоконнооптических датчиков в качестве перспективного средства мониторинга, измерения и контроля параметров в национальной обороне, аэрокосмической, авиационной, транспортной, нефтегазовой отраслях, а также в строительстве и медицине.

Создание аппаратно-программного комплекса контроля безопасности, основанной на использовании оптического волокна, позволит отказаться от использования оборудования для измерения технических параметров и перейти к использованию оптоволоконных датчиков.

Карьеры должны быть оснащены полным комплексом контроля и инструментов для обеспечения решения задач организации и внедрения безопасного производства, а также информационной поддержки контроля и управления технологическими и производственными процессами в нормальных и аварийных ситуациях [57-61]. Одним из способов решения этой проблемы является разработка аппаратно-программного комплекса контроля с использованием волоконно-оптических датчиков и технологий. С середины 1970-х годов эта технология используется в различных отраслях промышленности, но в основном она используется в телекоммуникационных системах.

Целесообразно использовать оптоволоконную технологию в условиях предприятий угольной промышленности, поскольку оптоволоконные датчики

являются наиболее чувствительными, не подверженными к воздействию электромагнитных полей, взрывозащищенными и устойчивыми к коррозии.

Волоконно-оптические датчики широко используются в различных отраслях промышленности по всему миру. Например, датчик оптического волокна использовался для измерения тока (Werthen и др.,1996), мониторинга зданий и сооружений (Jackson,1995), обнаружения утечек жидкости (Vogeletal.,2001), (Hurtig, etal.,1994). В биомедицине (Passia и др.,2002), а также в зданиях и сооружениях (HurtigandGrobwig,1998). Технология оптического волокна также была внедрена в горнодобывающей промышленности для обнаружения деформации (Naruse etal.,2007), обнаружения подземных газов, таких как метан (Li и др.,2005 и 2006) и мониторинг подземной среды (Senand Datta) [62-68].

В 2010 году в сотрудничестве с Департаментом горного дела и Лабораторией квантовой оптики Университета Квинсленда, Австралия, и СRC Mining была создана исследовательская группа для разработки волоконно-оптических датчиков для горнодобывающей промышленности. Объем исследований включает изучение возможных применений существующей технологии оптоволоконных датчиков в различных областях горнодобывающей промышленности, таких как вентиляция, мониторинг скважин, охрана труда и техника безопасности, геотехнический мониторинг и мониторинг состояния. Также изучается разработка новых волоконно-оптических датчиков в области газового зондирования. Исследовательский проект направлен на проведение экспериментальных исследований того, подходит ли распределенная система измерения температуры (DTS), основанная на волоконно-оптической технологии, для мониторинга подземных горных работ. В случае большого количества точек измерения эта система является экономичным решением.

В то же время австралийские ученые пытаются разработать и протестировать систему обнаружения метана на основе оптоволоконной системы в подземной угольной шахте с использованием одной головки датчика газа с разомкнутым контуром. Целью этого проекта является экспериментальное изучение работы непрерывной многоточечной волоконно-оптической сенсорной системы, которая использует газовую камеру с открытой траекторией для измерения концентрации метана. Потенциальное преимущество использования многоточечной волоконно-оптической сенсорной системы заключается в том, что можно использовать лазер и волоконно-оптический кабель для измерения из разных мест [69].

Учеными из Китая Т. Ли, Ч. Ванг, Ю. Чао и Ю. Нинг разработана комплексная система обнаружения опасности, состоящую из датчиков метана, датчиков давления и датчиков температуры, установленных в подземных шахтах. Также была разработана интегрированная система объединения данных для обеспечения самодиагностики и статистического анализа состояния датчиков, визуальной, звуковой и мобильной текстовой информации. Экспериментальные исследования прошли очень успешно, а затем авторы приступили к разработке метода определения сейсмической энергии.

Также ученые Х.-Н. Лю, К.Ван, Т.-Ю. Лю, Ю.В. Вэй в своей работе [70] представили новый датчик давления воды на основе волоконной брэгговской решетки, где были подтверждены применимость датчика для мониторинга давления воды.

Учеными из Японии Ли Чэ-Сиэнь, Кисида Кинзо, Нисигути Кенити, Гузик Артур, Макита Ацуси, Ямаути Йосиаки был разработан распределенный оптоволоконный датчик. Эти датчики основаны на использовании оптических волокон и довольно точно измеряют температуру и деформацию, а также на брэгговских решетках с возможностью увеличения количества датчиков.

В 2011 году учеными Atul Kumar, Dheeraj Kumar, U. K. Singh, P. S. Gupta and Gauri Shankar представлена разработка системы непрерывного контроля давления в кровле и закрытой крепи во время лавовых работ. Пример работы в забое проиллюстрирован для оценки эффективности системы мониторинга при оценке эксплуатационных характеристик крепи для обеспечения более безопасной и бесперебойной работы крепи на этих работах в различных геологических и горных условиях [71].

Работа ученых Мадждабади, Б, Долина Б, Дюссо М.Б., Каiser Р.К. привлекло внимание в области измерения деформаций подземной инфраструктуры, включая горнодобывающую промышленность [72], где измерение деформации на почти бесконечной длине позволяет зафиксировать поле деформации, вызванное подземными работами, в поле деформации выемки. Потенциальным преимуществом такого мониторинга является деформация сплошного слоя при растяжении, сжатии или сдвиге, или в результате локального сдвига или расширения, вызванного неравномерностью деформации разрушения.

В 2016 году ученые Имин Чжао, Нонг Чжан и Гунъяо Си в своей работе [73] они продемонстрировали разработку и эксперименты по новой системе мониторинга безопасности для карьеров на основе волокнистых материалов брэгговской решетки. По сравнению с традиционным оборудованием для мониторинга, разработанная новая система мониторинга имеет то преимущество, что обеспечивает точный, надежный и непрерывный онлайн-мониторинг деятельности карьера.

Ученые Тао Ху, Гунюй Хоу, Цзысян Ли в своей работе они поделились результатами испытаний, в которых высокопрочное оптическое волокно из нержавеющей стали обладает высокими характеристиками пропускания деформации, что позволяет соединять его с бетонным анкером с равномерной деформацией. Это показывает возможность использования волокон для теоретического и экспериментального мониторинга движения пласта [74].

В последствии, другие ученые Кьяра Ланчано и Риккардо Сальвини в своей работе [75] они рассматривали вопросы безопасности на производстве, проверяли и контролировали условия стабильности горного хребта, что показало использование беспилотных летательных аппаратов на основе распределенных оптоволоконных датчиков для цифровых фотографических измерений.

Ученые из Индии, исследования Центрального института горного дела и топлива (Дханбад, Индия) включают проектирование и разработку систем

мониторинга, управления и автоматизации для шахт и опасных зон; геотехнические и экологические исследования; а также применение технологии беспроводной связи в подземных шахтах. Проекты этих ученых включают системы отслеживания и мониторинга для борьбы со стихийными бедствиями, разработку моделей для оценки целесообразности подземной газификации угля и систем контроля за незаконной добычей и транспортировкой угля. В настоящее время они работают в области беспроводных датчиков, проектов экологического мониторинга и наблюдения, спонсируемых правительством Индии.

В России лидером в производстве и внедрении решений на основе оптоволоконных датчиков и технологий является компания «Инверсия-Сенсор» и в работе [76] рассмотрен ее опыт. В современном мире среди множества существующих и успешно применяемых технологий, используемых для мониторинга и измерения физических параметров, датчики на основе волоконной брэгговской решетки (ВБР) и распределенные датчики на основе комбинационного рассеяния (эффект Рамана). По сравнению с электрическими датчиками волоконно-оптические датчики имеют много преимуществ. Эти преимущества делают их очень привлекательными во всех основных отраслях промышленности, в частности в горнодобывающей промышленности.

Московская компания «ОМЕГА» занимается производством мониторинга протяженных объектов (СМПО). Одна из крупнейших в мире нефтегазовых компаний концерн Shell представила действия СМПО. На этом пути люди заметили много важных достижений в области безопасности объектов. Способность лазера испускать луч света, чутко реагировать на изменения вибрационных и температурных полей произвела настоящую революцию в науке и технике, которая определила огромный прорыв в защите практически от чего угодно: от техногенного и антропогенного воздействия [77].

Кузбасский национальный технический университет с представителями Гуменным А. С., Бердин В. В., Янина Т. И. разработали устройство для контроля идентификации состояния горной выработки. «Изобретение относится к горному

47

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» [78].

Волоконно-оптические линии передачи данных стали достижением в конце XX века благодаря своей пропускной способности и использовались в информационно-измерительных системах [57-58]. В то же время оптические волокна могут использоваться в качестве датчиков для измерения электрических и неэлектрических величин [59-60].

В дополнение к высоким измерительным характеристикам датчик также должен обладать высокой надежностью, долговечностью, стабильностью и совместимостью с микроэлектронным оборудованием для обработки информации при низкой сложности изготовления и низкой стоимости [61,79]. Современные волоконно-оптические датчики максимально отвечают этим требованиям [79-81]. Отличительной особенностью информационно-измерительной системы с использованием волоконно-оптических датчиков, является использование в качестве датчиков оптических волокон, источников оптического излучения и оптических приемных устройств. Вместо управляющего кабеля с электрическим сигналом используется световод, по которому передается свет. Световод является не только измерительным органом, но и транспортным каналом для передачи информации на устройства мониторинга и сравнения данных.

Обзор предыдущих научных исследований в мире, связанных с изучаемой темой, показывает, что среди большого количества работ наиболее близка работа авторов Паоло Маццанти, М. Дж. Литтл, Ашкан Вазири, Каввадас М., Адам Хшановски, П. Фарина, Брайан Клаппштейн. Среди постсоветских ученых этим вопросом занимаются: Д. С. Ахмедов, А. И. Косолапов, А. В. Токаренко, Е. А. Несмачный, А. В. Болотников и др.

Хотя темпы развития этой области очень высоки, все еще существует много проблем, которые необходимо решить. По многим различным причинам современные методы, используемые в шахтах, позволяют мониторингу иметь определенные ограничения: дорогостоящие исследования, устаревшие комплексы измерений, непредвиденные события. Использование волоконно-оптических датчиков для создания аппаратно-программного комплекса контроля безопасности может решить существующие проблемы.

К сожалению, Республика Казахстан не имеет собственной разработки, и разработка ограничивается теоретическими исследованиями и предварительной работой по созданию лабораторных образцов. Направление диссертационной работы сводится к разработке нового метода, основанной на волоконно-оптической технологии, усовершенствуя процессы контроля устойчивости бортов карьеров.

В настоящее время развитие карьеров характеризуется усовершенствованием новых процессов и приобретением новых средств, новейших технологических решений при добыче месторождений полезных ископаемых для бесперебойной и безопасной работы в горных предприятиях. В связи с этим особая роль отведена надежному обоснованию и обеспечению безопасности при контроле устойчивости бортов карьера.

#### 1.6 Датчики на основе оптического волокна

Оптические волокна представляют собой тонкие стеклянные нити (диаметром менее 1 мм), которые могут передавать цифровую информацию в виде оптических импульсов [58]. Такая передача возможна благодаря тому, что свет, попадающий в стекловолокно, отражается от одного конца волокна к другому без потери энергии. Изображения могут быть увеличены, искажены или зашифрованы, физико-техническая основа оптоволоконного датчика физических величин, который является основным чувствительным элементом нового поколения интеллектуальных информационно-измерительных, и история волоконно-оптических технологий представлена в [79].

Все существующие волоконно-оптические датчики, разработанные на сегодняшнее время, можно разделить по категориям. К первой категории относятся волоконно-оптические датчики, где имеется наружный чувствительный элемент, кроме того их еще называют гибридными. Вторая категория датчиков, это те датчики в которых оптическое волокно применяется в качестве элемента чувствительного [82]. Все преимущества таких датчиков по сравнению с традиционными датчиками, которые изображены на рисунке 13.

Волоконно-оптические датчики на основе решеток Брэгга нашли применение в строительной, геотехнической, аэрокосмической, энергетической, нефтегазовой промышленности [82]. Подобные датчики активно применяются при работе с агрессивными средами, где датчики находятся в экстремальных условиях.

Для передачи информации используются волоконно-оптические технологии, а также локально распределенные измерительные датчики. При воздействии на оптическое волокно влияние давления, температуры, натяжения и других параметров изменяют его характеристики.

Преимущества, представленные в таблице 2, волоконно-оптических датчиков позволяют использовать их во взрывоопасных средах, принимая во внимание их безопасность, долговременную стабильность и долговечность, а также компактность. Другой особенностью является то, что информация, полученная в процессе многократных измерений, собирается и передается в единую информационную сеть посредством оптического излучения. Волоконно-оптические датчики обладают многими существенными преимуществами в измерении скорости и нечувствительны ко многим внешним воздействиям любых проводных и наземных систем, связанных с передачей информации, полученной во время измерения. В то же время энергопотребление его передачи в десять раз ниже. Оптическое волокно может быть использовано в качестве датчика или в качестве комплекса контроля для передачи информации на расстояние 100 километров и более.

Таблица 2 – Перечень преимуществ волоконно-оптических датчиков

Пассивность (датчики полностью диэлектрические)			
Легкость	Высокая чувствительность		
Малогабаритность	Широкая полоса пропускания		
Не восприимчивость к электромагнитной интерференции			
Способность работать при высоких температурах			
Возможность уплотнения электрических и оптических сигналов			

Считается, что самый простой датчик основан на изменении интенсивности света. Особенностью волоконно-оптических датчиков является то, что при необходимости они могут передавать аудиосигналы на большие расстояния. С точки зрения применения оптического волокна датчики оптического волокна делятся на два типа: датчики, которые чаще всего используют Multi-Mode оптическое волокно в качестве линии передачи сигнала, и датчики, которые используют Single-Mode оптическое волокно в качестве чувствительного элемента. Базовая структура волоконно-оптического датчика основана на следующих характеристиках:

1. В соответствии с влиянием Фарадея и Керра изменяются свойства

механически действующих волокон. Эти принципы используются для создания датчиков смещения. Используются флуоресцентные волокна.

2. В соответствии с принципом «физическая величина-свет» изменяются параметры излучения через оптическое волокно. Чувствительным элементом является сам измеряемый объект.

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 оптических компонентов под воздействием внешних факторов.

#### 1.7 Постановка задач исследования

В связи с разнообразием условий и характеристик разработки угольных месторождений проблема обеспечения устойчивости бортов карьеров нуждаются в улучшении и решении.

Из анализа литературных источников следует, что открытые месторождения являются одной из самых сложных и опасных сред для работы людей. Разнообразие и сложность условий добычи определяют необходимость использования новых научных решений для мониторинга и контроля устойчивости бортов карьера и условий эксплуатации горных работ.

В процессе анализа было обнаружено, что комплекс контроля устойчивости бортов карьеров с использованием волоконно-оптических датчиков может использоваться для передачи информации и служить локальным распределенным измерительным датчиком, поскольку природа световода изменяется под воздействием температуры, давления, смещения и других параметров.

Проанализировав материалы по обеспечению устойчивости бортов карьера (факторы, влияющие на развитие геомеханического процесса прибортовых массивах карьеров и метод его определения; методы контроля устойчивости бортов карьера; мониторинг состояния устойчивости бортов карьера), позволено изучить текущие проблемы и на этой основе определить цели и задачи будущих исследований.

Целью работы является разработка аппаратно-программного комплекса контроля устойчивости бортов карьера с использованием волоконно-оптического датчика смещения горных пород для повышения эффективности добычи полезных ископаемых и безопасности проведения работ на карьере.

Идея работы заключается в проведении геомеханических исследований и контроля с использованием современных программных комплексов, основанных на волоконно-оптических технологиях усовершенствуя процессы контроля устойчивости бортов карьеров.

Значимость выбранного направления исследования подтверждается некоторыми противоречиями, выявленными в результате теоретического анализа источника темы исследования. Ведутся исследования в направлении создания датчиков, но они не интегрированы в единую систему. Решением этой прикладной проблемы является проведение дополнительных исследований в этой области и создание аппаратно-программного комплекса контроля, предназначенного для предупреждения о внезапных изменениях параметров, влияющих на устойчивость бортов карьера. В связи с этим исследования, направленные на повышение безопасности горных работ, соответствуют одному из приоритетных направлений научного развития в любой стране - обеспечению безопасности труда.

Пути решения данной задачи - необходимо провести теоретические, экспериментальные и научные исследования, включая использование компьютерных технологий для разработки аппаратно-программного комплекса контроля, создания имитационного стенда карьера с использованием волоконно-оптических датчиков смещения реперного типа, а также в результате планирования экспериментов и обработки полученных данных.

#### ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1 Проведен анализ краткой горно-геологической характеристики месторождений полезных ископаемых, который показал, что открытые разработки по глубине карьеров на некоторых месторождениях достигают до 400-600 м, а некоторые в пределах от 100-300 м. С ростом глубины карьера растет и срок службы бортов карьера. Все открытые разработки характеризуются наличием карьеров с огромным сроком службы, которые превышают 60-летний рубеж и более, когда в среднем расчетный проектный срок колеблется в пределах от 20 до 30 лет. В связи с ростом глубины карьера, как правило ухудшаются геотехнические и геомеханические параметры устойчивости бортов карьеров.

2 Проведен анализ факторов, влияющих на развитие геомеханических процессов бортов карьеров, который показывает, что эта проблема не может быть решена односторонне, и различные методы и их разумные комбинации должны использоваться комплексно. Следует уделять внимание совершенствованию метода контроля устойчивости бортов, созданию новых методов и использованию современных цифровых технологий и технологий для изучения реологических процессов, происходящих в прибортовых массивах.

3 Анализ существующих методов контроля устойчивости бортов карьера выявил достоинства и недостатки каждого метода и определил, что в настоящее время развитие карьеров характеризуется усовершенствованием новых процессов и приобретением новых средств, новейших технологических решений при добыче месторождений полезных ископаемых для безопасной и бесперебойной работы в горнодобывающей промышленности. Масштабы горных предприятий требуют постоянного контроля за происходящими геотехническими, геомеханическими процессами устойчивости бортов карьеров в период эксплуатации. В связи с этим карьеры должны быть снабжены автоматизированным комплексом контроля дистанционного управления устойчивости бортов карьеров для обеспечения безопасной работы на горнодобывающих предприятиях.

4 Выполнен обзор волоконно-оптических датчиков, их применение, а также выявлены преимущества по сравнению с традиционными датчиками.

54

Анализ показал, 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.

5 Осуществлена постановка задач по исследованиям в области создания аппаратно-программного комплекса контроля устойчивости бортов карьера с использованием волоконно-оптических датчиков.

## ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ИДЕНТИ-ФИКАЦИИ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

2.1 Основы математического моделирования дифракционной решетки для датчиков

В рамках диссертационной работы описаны основы математического моделирования дифракционной решетки (рисунок 13) для датчиков, где показана модуляция интенсивности решетки (рисунок 14) и физико-математическая модель параметров системы контроля оптическим сигналом с использованием датчика, которые подробно приведены в [83-84].



Рисунок 13 – Основная структура решетки

100% изменение интенсивности будет тогда, когда решетки сдвинуты друг от друга на величину a(ξ). А при этом чувствительность к смещению и динамический диапазон регулируются вместе. Сверхвысокая чувствительность получается за счет динамического диапазона. Волоконно-оптические датчики с подвижными решетками могут применяться для измерения любого параметра,



изменения которых проявляются через движение и перемещение двух решеток.

Рисунок 14 – Модуляция интенсивности решеток, находящихся напротив друг к другу

В камеральных условиях исследованы и рассмотрены датчики на основе измеренной интенсивности оптического сигнала, определяемые в соответствии с параметрами решетки  $I(\xi) = I_0 k(\xi)$ , где  $k(\xi) = \frac{a(\xi)}{s(\xi)}$  коэффициент ослабления полной интенсивности интерферирующей волны в решетке, выраженный через отношение ширины  $s = (\xi)$  и периода  $s = (\xi)$  решетки, которые являются функциями на множестве  $\xi = \{\xi_j\}$  варьируемых параметров системы [85-86]. Этот вид параметра в разработанной нелинейной математической модели включает геометрические параметры, оптические характеристики волны (волновой вектор, длина волны) и температуру Т.

В датчиках, использующих дифракционные решетки, расположенные близко друг к другу, имеются сверхчувствительные элементы, один из них движется, а другой нет соответственно модуляция интенсивности решеток (рисунок 14), находящихся напротив друг к другу. Когда решетки расположены близко друг к другу, они выглядят в виде одной решетки, периоды решетки остаются постоянными, а доля передаваемой площади будет варьироваться от 0,5 до 0 в зависимости от положения подвижной решетки. Когда решетки смещены на некоторую величину друг от друга, интенсивность изменится на 100%. И в то же время чувствительность к смещению и динамический диапазон регулируются вместе. Благодаря динамическому диапазону достигается сверхвысокая чувствительность. Волоконно-оптический датчик с подвижной решеткой может использоваться для измерения любого параметра, и его изменения проявляются перемещением и движением двух решеток.

Амплитуду суммарного сигнала от интерферированных в решетке волн, с полным числом штрихов в решетке N, вычисляем, с использованием условии максимума интерференции от двух волн, дифрагированных на одной щели  $\Delta_{1,2} = s \cdot \sin \phi$ , где  $\Delta$ - разность хода, а  $\phi$ - угол наблюдения интерференции от двух волн, в виде

$$\Xi = \Xi_1 \frac{\sin\left(\frac{N\phi_{1,2}}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\phi_{1,2}}{2}\right)}.$$
 (1)

Здесь  $\phi_{1,2} = \mathbf{k} \cdot \Delta = \frac{2\pi \mathbf{s} \cdot \sin \phi}{\lambda}$  и соответственно,  $\frac{\phi_{1,2}}{2} = \pi \mathbf{s} \varsigma$ - половина разность хода фаз двух когерентных волн, где  $\varsigma = \frac{\sin \phi}{\lambda}$ ;  $\Xi_1 = \Xi_0 \sin\left(\frac{\phi_{1,2}}{2}\right)$ - суммарная интенсивность волны, полученной в результате интерференции от двух когерентных волн, в модели одной щели;  $\Xi_0 = 2L$ - удвоенный радиус окружности описанной вокруг многоугольника характеристических векторов фазовой диаграммы интерференционной картины.

Величину интенсивности полного светового потока, полученного в результате интерференции когерентных волн, от всех N щелей решетки, под угол наблюдения интерференции *ø*, вычисляем в виде

$$I = I_1 \frac{\sin^2(\pi s \varsigma N)}{\sin^2(\pi s \varsigma)},$$
(2)

где  $I_1 = I_0 \frac{\sin^2(\pi a \varsigma)}{(\pi a \varsigma)^2}$ ;  $I_0$  – интенсивность светового потока, полученного в результате

интерференции когерентных волн, от одной щели, под угол наблюдения интерференции  $\phi = 0$ .

При выборе круглых отверстий, в результате дифракции Фраунгофера на одном круглом отверстии диаметром d, имеем

$$I = I_1 \frac{J_N(\pi d\varsigma N)}{J_1(\pi d\varsigma)},$$
(3)

где  $I_1 = 2I_0 \frac{J_1(\pi d\varsigma)}{\pi d\varsigma}$ ;  $J_1(\pi d\varsigma) - функция Бесселя 1 – го порядка, вычисляемая от аргу$  $мента <math>\frac{\phi_{1,2}}{2} = \pi d\varsigma$ ;  $J_N(\pi d\varsigma N) - функция Бесселя N – го порядка, вычисляемая от аргу$  $мента <math>\frac{\phi_{1,2}N}{2} = \pi d\varsigma$ .

При разработке теоретических основ этой технологии были использованы специальные функции, такие как функции Бесселя, Ханкеля, Неймана и гипергеометрические функции, ранее опробованные при построении физико-математической модели нелинейных электрофизических процессов, происходящих в гетерогенных электрических, радиоэлектронных и оптоэлектронных системах на основе протонных полупроводников и диэлектриков [87-90].

# 2.2 Математическая модель спектрального анализа светового пятна, падающего на поверхность фотоматрицы

В рамках диссертационной работы приняты ограничения методами классической геометрической и волновой оптики, не вдаваясь, на данном этапе исследований, в микроскопические механизмы, связанные с взаимодействием световой волны (оптического сигнала) с веществом оптоволоконного элемента (одного из основных рабочих органов датчика деформаций и в квантовую природу оптико-механических явлений в материале исследуемого экспериментального образца [91].

Все теоретические рассуждения, в данной работе, ограничены положениями электродинамики сплошной среды и классической волновой теории света [91].

Вектор напряженности электрического поля электромагнитной волны, распространяющейся в пространстве с круговой частотой  $\omega = \frac{2\pi \upsilon}{\lambda}$  и волновым вектором  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ , может быть записываться, в произвольной точке пространства  $\vec{r}$  в момент времени t, согласно обобщенному решению классического волнового уравнения Даламбера  $\vec{\nabla}^2 \vec{E} - \frac{1}{\upsilon^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$ , в виде

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot \exp\left(i\omega t - \vec{k}\vec{r}\right). \tag{4}$$

Вектор напряженности магнитного поля электромагнитной волны, согласно решению уравнения Даламбера  $\vec{\nabla}^2 \vec{H} - \frac{1}{\upsilon^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0$ , в виде

$$\vec{H} = \vec{H}_0 \cdot \exp\left(i\omega t - \vec{k}\vec{r}\right). \tag{5}$$

Вектор фазовой скорости волны направлен по волновому вектору таким образом, что

$$\omega = \left(\vec{k}\vec{\upsilon}\right) \equiv k\upsilon. \tag{6}$$

Тогда, электромагнитное поле волны, распространяющейся в вакууме (воздухе), характеризуется значениями  $k_0 = \frac{\omega}{c}$ ,  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ ,  $\omega = (\vec{k}_0 \vec{c}) = k_0 c$  и описывается уравнением  $\vec{u}_g = \vec{u}_{0g} \cdot \exp(i\omega t - \vec{k}_0 \vec{r})$ , а в веществе (оптоволокне), при значениях волновых параметров  $k = \frac{\omega}{\upsilon}$ ,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\omega = (\vec{k} \vec{\upsilon}) = k\upsilon$ , с показателем преломления оптоволокна  $n = \frac{c}{\upsilon} = \frac{k}{k_0} \ge 1$ ,  $n = \sqrt{\varepsilon \mu}$ ,  $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$ , соответственно  $\vec{u} = \vec{u}_0 \cdot \exp(i\omega t - \vec{k} \vec{r})$ . В волновом уравнении Даламбера  $\vec{\nabla}^2 \vec{u} - \frac{1}{\upsilon^2} \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = 0$ , где  $\frac{1}{\upsilon} = \frac{k}{k_0 c} = \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon \mu}$ ,  $\upsilon = \frac{k_0 c}{k} = \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon \mu}$ . Функции отклика системы (материала оптического волокна) на воздействие электрического и магнитного полей, называемые комплексной диэлектрической (КДП)  $\hat{\varepsilon} = \operatorname{Re}\hat{\varepsilon} - i\operatorname{Im}\hat{\varepsilon}$  и магнитной (КМП)  $\hat{\mu} = \operatorname{Re}\hat{\mu} - i\operatorname{Im}\hat{\mu}$  проницаемостью, формируют аналитический вид комплексного показателя преломления (КПП) среды  $\hat{n} = \sqrt{\hat{\varepsilon}\hat{\mu}}$  в нелинейных функциях от параметров силовых полей (амплитуд и частот  $\{\vec{E}_{0,ext};\Omega_{el}\}, \{\vec{H}_{0,ext};\Omega_m\}$  внешних гармонически изменяющихся электрических  $\vec{E}_{ext}(t) = \vec{E}_{0,ext} \cdot \exp(i\omega_{el}t)$  и магнитных полей  $\vec{H}_{ext}(t) = \vec{H}_{0,ext} \cdot \exp(i\omega_m t)$ ; амплитуд и частот  $\{\vec{E}_0;\Omega\}$  электромагнитной волны  $\vec{\varepsilon} = \vec{\varepsilon}_0 \cdot \exp(i\omega t - \vec{k}_0 \vec{\tau})$ ; параметров тензора механических напряжений и деформаций  $\hat{\sigma}$ ; параметров структуры  $\vec{\xi}$  и температуры T). В общем случае, имеют место нелинейные дисперсионные соотношения

$$\operatorname{Re}\left(\hat{\varepsilon}^{\left(\Omega;\Omega_{el}\right)}\left(\vec{E}_{0,ext};\Omega_{el};\vec{E}_{0};\Omega;\mathrm{T};\hat{\sigma};\vec{\xi}\right)\right), \operatorname{Im}\left(\hat{\varepsilon}^{\left(\Omega;\Omega_{el}\right)}\left(\vec{E}_{0,ext};\Omega_{el};\vec{E}_{0};\Omega;\mathrm{T};\hat{\sigma};\vec{\xi}\right)\right), \\\operatorname{Re}\left(\hat{\mu}^{\left(\Omega;\Omega_{m}\right)}\left(\vec{H}_{0,ext};\Omega_{m};\vec{E}_{0};\Omega;\mathrm{T};\hat{\sigma};\vec{\xi}\right)\right), \operatorname{Im}\left(\hat{\mu}^{\left(\Omega;\Omega_{m}\right)}\left(\vec{H}_{0,ext};\Omega_{m};\vec{E}_{0};\Omega;\mathrm{T};\hat{\sigma};\vec{\xi}\right)\right),$$

При этом, вещественную и мнимую компоненты комплексного показателя преломления (КПП) среды  $\hat{n}^{(\Omega;\Omega_{el};\Omega_m)} = \sqrt{\hat{\epsilon}^{(\Omega;\Omega_{el})}\hat{\mu}^{(\Omega;\Omega_m)}}$ , моделируемого функцией  $\hat{n}^{(\Omega;\Omega_{el};\Omega_m)} = \operatorname{Re}\left(\hat{n}^{(\Omega;\Omega_{el};\Omega_m)}\right) - i\operatorname{Im}\left(\hat{n}^{(\Omega;\Omega_{el};\Omega_m)}\right)$ , строим с учетом ранее записанных

нелинейных дисперсионных соотношений 
$$\hat{\varepsilon}^{(\Omega;\Omega_{el})} = \operatorname{Re}\left(\hat{\varepsilon}^{(\Omega;\Omega_{el})}\right) - i\operatorname{Im}\left(\hat{\varepsilon}^{(\Omega;\Omega_{el})}\right), \quad \hat{\mu}^{(\Omega;\Omega_m)} = \operatorname{Re}\hat{\mu}^{(\Omega;\Omega_m)} - i\operatorname{Im}\hat{\mu}^{(\Omega;\Omega_m)}_{B}$$

виде

$$\operatorname{Re}^{2}\left(\hat{n}^{\left(\Omega;\Omega_{el};\Omega_{m}\right)}\right) - \operatorname{Im}^{2}\left(\hat{n}^{\left(\Omega;\Omega_{el};\Omega_{m}\right)}\right) =$$

$$= \operatorname{Re}\left(\hat{\epsilon}^{\left(\Omega;\Omega_{el}\right)}\right) \operatorname{Re}\left(\hat{\mu}^{\left(\Omega;\Omega_{m}\right)}\right) - \operatorname{Im}\left(\hat{\epsilon}^{\left(\Omega;\Omega_{el}\right)}\right) \operatorname{Im}\left(\hat{\mu}^{\left(\Omega;\Omega_{m}\right)}\right).$$
(7)
$$\operatorname{Re}^{2}\left(\hat{n}^{\left(\Omega;\Omega_{el};\Omega_{m}\right)}\right) - \operatorname{Im}^{2}\left(\hat{n}^{\left(\Omega;\Omega_{el};\Omega_{m}\right)}\right) =$$

$$= \operatorname{Re}\left(\hat{\varepsilon}^{(\Omega;\Omega_{el})}\right)\operatorname{Re}\left(\hat{\mu}^{(\Omega;\Omega_{m})}\right) - \operatorname{Im}\left(\hat{\varepsilon}^{(\Omega;\Omega_{el})}\right)\operatorname{Im}\left(\hat{\mu}^{(\Omega;\Omega_{m})}\right).$$
(8)  
$$\operatorname{Re}\left(\hat{n}^{(\Omega;\Omega_{el};\Omega_{m})}\right)\operatorname{Im}\left(\hat{n}^{(\Omega;\Omega_{el};\Omega_{m})}\right) =$$
  
$$= \frac{1}{2}\left(\operatorname{Re}\left(\hat{\varepsilon}^{(\Omega;\Omega_{el})}\right)\operatorname{Im}\left(\hat{\mu}^{(\Omega;\Omega_{m})}\right) + \operatorname{Im}\left(\hat{\varepsilon}^{(\Omega;\Omega_{el})}\right)\operatorname{Re}\left(\hat{\mu}^{(\Omega;\Omega_{m})}\right)\right)$$
(9)

Фазу волны, падающей под углом  $\theta$  на поверхность оптоволоконного элемента принимаем равной  $\phi_0 = (\vec{k}_0 \vec{r}) = \frac{\omega}{c^2} (\vec{c} \vec{r})$ , а преломленной внутри оптоволокна

волны  $\phi = (\vec{k}\vec{r}) = \frac{\omega}{\upsilon^2} (\vec{\upsilon}\vec{r})$ . Тогда, разность фаз этих волн

$$\phi - \phi_0 = \left(\vec{k}\vec{r}\right) - \left(\vec{k}_0\vec{r}\right) = \frac{\omega}{c^2} \left(n^2\left(\vec{\upsilon}\vec{r}\right) - \left(\vec{c}\vec{r}\right)\right) = \frac{\omega}{c^2} \left(\left(n^2\vec{\upsilon} - \vec{c}\right)\vec{r}\right) = \frac{\omega}{c^2} \left(\left(\frac{n^2\vec{\upsilon}}{\vec{c}} - 1\right)(\vec{c}\vec{r})\right)$$

принимает вид

$$\phi - \phi_0 = \frac{\omega}{c^2} \left( \left( \frac{n^2 \left( \vec{\upsilon} \vec{c} \right)}{c^2} - 1 \right) \left( \vec{c} \vec{r} \right) \right).$$
(10)

Вводя угол отклонения преломленной волны от первоначального направления (соответствующего волне, падающей на поверхность оптоволокна) ψ = θ-γ, получаем

$$\phi - \phi_0 = \frac{\omega}{c^2} (\operatorname{ncos} \psi - 1) (\vec{c}\vec{r}).$$
(11)

Далее, выбирая направление единичного вектора  $\vec{\tau}_0$  по направлению вектора скорости  $\vec{c}$  и, соответственно, волнового вектора  $k_0 = \frac{\omega}{c}$  волны, падающей на поверхность оптоволокна, когда  $\vec{c} = c\vec{\tau}_0$  и выполняется равенство  $\phi - \phi_0 = \frac{\omega}{c} (n\cos\psi - 1)(\vec{\tau}_0\vec{r})$ , и, используя тождество  $\cos\psi = \frac{\cos\theta\sqrt{n^2 - \sin^2\theta} + \sin^2\theta}{n}$ , окончательно имеется

$$\phi - \phi_0 = \frac{\omega}{c} \left( \cos\theta \sqrt{n^2 - \sin^2\theta} + \sin^2\theta - 1 \right) \left( \vec{\tau}_0 \vec{r} \right).$$
(12)

При численных расчетах скалярного произведения  $(\vec{\tau}_0 \vec{r}) = r \cos \alpha$  угол  $\alpha$ 

изменяется в пределах от  $-\pi$  до  $\pi$ , а г есть расстояние от источника первичного светового сигнала (волны падающей на поверхность оптоволокна), помещенного, в данной модели, в начало координат, до фиксированной точки пространства.

Согласно принимаемой геометрической модели, записывается

$$\Delta = \sqrt{d^2 + (\delta x)^2} = d\sqrt{1 + \left(\frac{\delta x}{d}\right)^2}, \quad \Delta = d\sqrt{1 + tg^2\gamma} = \frac{d}{\cos\gamma}, \quad \delta x = \sqrt{\Delta^2 - d^2} = \Delta\sqrt{1 - \cos^2\gamma} = \Delta\sin\gamma,$$

где d – толщина (диаметр) оптоволоконного образца (фрагмент кабеля оптоволоконной линии), найдена величина горизонтального смещения преломленной волны относительно падающей волны

$$\delta x = \Delta \sin \gamma = dtg\gamma = d \frac{\sin \gamma}{\sqrt{1 - \sin^2 \gamma}} = \frac{d}{\sqrt{\frac{1}{\sin^2 \gamma} - 1}},$$

и, с учетом  $n = \frac{\sin\theta}{\sin\gamma}$ , имеется

$$\delta x = \frac{\mathrm{dsin}\theta}{\sqrt{\mathrm{n}^2 - \mathrm{sin}^2\theta}} \,. \tag{13}$$

В случае  $\gamma \rightarrow 0$ , когда  $n \rightarrow \infty$ , в пределе  $\delta x \rightarrow (\delta x)_{\min} = 0$ .

В случае  $\gamma \rightarrow 0$ , когда  $n \rightarrow \sin\theta$ , в пределе  $\delta x \rightarrow (\delta x)_{\text{max}} = \infty$ .

В случае  $\gamma = \theta$ , когда  $n \rightarrow 1$ , имеем  $\delta x = dtg\theta$ .

Представляя разность фаз падающей и преломленной волн, при незначительных изменениях длины волны при ее прохождении через оптоволокно, приближенно, в виде  $\phi - \phi_0 \cong k_0 \Delta = \frac{\omega}{c} \Delta$ , с учетом равенств  $\delta x = \Delta \sin \gamma$ ,  $n = \frac{\sin \theta}{\sin \gamma}$ , когда  $\phi - \phi_0 = \frac{\omega}{c} \Delta = \frac{\omega}{c} \frac{n \delta x}{\sin \theta}$ , согласно (12), разность фаз между падающей и преломленной волной принимает вид

$$\phi - \phi_0 = \frac{\omega}{c} \frac{n \mathrm{d}}{\sqrt{\mathrm{n}^2 - \mathrm{sin}^2 \theta}} \,. \tag{14}$$

Комбинируя (12), (13), строится иррациональное уравнение для расчета показателя преломления оптоволокна, в зависимости от входных параметров модели (угол падения световой волны (оптического сигнала) θ; толщина образца d; расстояние от начала координат (в месте расположения точечного источника выходного оптического сигнала) до точки выхода преломленной в образце световой волны (выходного оптического сигнала); угол выхода сигнала α)

$$\left(\cos\theta\sqrt{n^2-\sin^2\theta}+\sin^2\theta-1\right)\left(\vec{\tau}_0\vec{r}\right) = \frac{nd}{\sqrt{n^2-\sin^2\theta}}.$$
(15)

После ввода в безразмерную переменную  $u = \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}$ , имеется переход к уравнению

$$\cos^{2}\theta \left(u^{2} - u\cos\theta\right)^{2} (\vec{\tau}_{0}\vec{r})^{2} - d^{2}u^{2} = d^{2}\sin^{2}\theta, \qquad (16)$$

которое после определенных преобразований, принимает вид, удобный для дальнейшего анализа модели

$$u^{4} - 2u^{3}\cos\theta + u^{2}\left(\cos^{2}\theta - \left(\frac{\mathrm{d}}{(\vec{\tau}_{0}\vec{r})\cos\theta}\right)^{2}\right) - \left(\frac{\mathrm{d}tg\,\theta}{(\vec{\tau}_{0}\vec{r})}\right)^{2} = 0\,.$$
(17)

Уравнение (17), решаемое, в общем случае численно, позволяет рассчитать искомый показатель преломления световой волны (оптического сигнала) в оптоволокне  $n = \sqrt{u^2 - \sin^2 \theta}$ . Очевидно, что из физических соображений, в зависимости от результатов детализированного анализа полученных числовых значений вещественных корней уравнения (17), окончательное значение n будет определяться только одним из значений переменной u.

Из исследования частного случая падения световой волны (оптического сигнала) перпендикулярно к поверхности образца θ=0, когда cosα=0, из (17)

$$u^{4} - 2u^{3} + u^{2} \left( 1 - \left( \frac{\mathrm{d}}{(\vec{\tau}_{0}\vec{r})} \right)^{2} \right) = 0,$$
 (18)

один из корней уравнения u = 0 и, соответственно, при  $\sin\theta = 0$ , получаем значение n=0 (не имеет физического смысла), а из уравнения  $u^2 - 2u + \left(1 - \left(\frac{d}{(\vec{\tau}_0 \vec{r})}\right)^2\right) = 0$ , полу-

чаем корни  $u_{1,2} = 1 \mp \frac{d}{\left(\vec{\tau}_0 \vec{r}\right)}$ , отвечающие при  $\frac{d}{\left(\vec{\tau}_0 \vec{r}\right)} = \frac{d}{r} \rightarrow 0$  (далеко за пределами

волновой зоны точечного источника выходного оптического сигнала), значениям показателя преломления световой волны (оптического сигнала) n=1. Полученный результат может рассматриваться в качестве одного (и достаточно весомого) из критериев достоверности уравнения (17).

Выражение (17), являющееся, по физическому содержанию и по структуре, феноменологическим, устанавливает соотношение между геометрическими и оптическими параметрами модели и, может быть подтверждено и исследовано на более высоком теоретическом уровне, с использованием методов кинетической теории и электродинамики сплошных сред путем построения квазиклассического кинетического уравнения оптико-механического типа, описывающего механизм взаимодействия электромагнитной волны (оптического сигнала) с веществом оптоволоконного образца, представляющего собой диэлектрик со сложным типом кристаллической структуры, а следствием этих микроскопических процессов являются явления релаксационной объемно-зарядовой поляризации оптоволокна, сводящейся к формированию обусловленного полем внешней волны неоднородного пространственно-распределенного индуцированного электрического поля, конфигурация которого существенно зависит от ряда электромагнитных и упруго-механических явлений, во многих случаях нелинейных, связанных, в частности с внутренним фотоэлектрическим эффектом (при больших энергиях фотонов), фотовольтаическим эффектом и эффектами фото-упругости (обусловленными пьезометрическими явлениями). Математическое описание нелинейных оптических процессов в оптоволоконном материале в поле электромагнитной волны, должно строиться на исследовании явлений генерации гармоник поляризации кратных частоте внешней электромагнитной волны порядка r=3,5,7, и т.д., с учетом взаимодействий гармоник разных порядков, в рамках заданного приближения теории возмущений по безразмерному малому параметру возмущения, имеющему смысл соотношения различного типа физических параметров (измеряемых в эксперименте величин) одинаковой размерности, выступающих в качестве характеристических параметров модели, что существенно в

области аномально высоких поляризационных нелинейностей [91].

Решение этой достаточно сложной аналитической задачи, по методологии и уровню научности исследований будет рассмотрено в перспективе, методами физической кинетики, статистической теории и электродинамики сплошных сред.

В диссертационной работе, согласно разработанной экспериментальной схеме измерений, чувствительность фотоприемника определяется динамическим диапазоном измерений (мощность источника излучения (лазера), количество измерительных каналов, потери оптической мощности импульса света распространяющегося по сердцевине оптического волокна, вносимые каждым соединителем потери (конвекторы, места сварки оптического волокна), оптическая длина канала, уровень отраженной мощности, микроизгибы оптического волокна и его параметры), методология теоретических исследований ограничивается феноменологической волновой теорией света (геометрической и волновой оптикой) и опирается на моделирование и исследование свойств уравнения (17), с целью сравнения расчетных результатов с экспериментом при определении влияний малых деформаций образца на основе оптического волокна на показания датчика деформаций [91].

Поэтому, для расчета поправок к показателю преломления оптического сигнала (световой волны) в образце, обусловленных его деформациями, принимаемыми малыми (в сравнении с линейными размерами системы), будем опираться также, на уравнение (17), откуда очевидно, что эти поправки определяются, в самом уравнении, квадратичными степенями безразмерного параметра  $\frac{d}{(\vec{\tau}_0\vec{r})}$ , в котором, с учетом поперечных (в плоскости поперечного сечения образца) деформаций  $d = d_0 \pm \delta d$  и продольных (горизонтальных, т. е. по направлению оси оптоволоконного образца)) деформаций, при малых значениях величины горизонтального отклонения световой волны  $\delta \alpha \rightarrow 0$ , когда, приближенно

$$\cos \alpha = \cos(\alpha_0 \pm \delta \alpha) \approx \cos(\alpha_0) \times \left(1 + \frac{(\delta \alpha)^2}{2}\right),$$
 где учтено  $\sin(\delta \alpha) \to 0,$  согласно

 $(\vec{\tau}_0 \vec{r}) = r \cos \alpha \approx r \cos (\alpha_0) \times \left(1 + \frac{(\delta \alpha)^2}{2}\right) = (\vec{\tau}_0 \vec{r})_0 + \delta(\vec{\tau}_0 \vec{r}), \text{ имеет место полученное в ре-$ 

зультате численной аппроксимации, приближенное выражение  $\frac{1}{(\vec{\tau}_0\vec{r})} \approx \frac{1}{r\cos(\alpha_0) \times \left(1 + \frac{(\delta \alpha)^2}{2}\right)} \rightarrow \frac{1}{r\cos(\alpha_0)} \left(1 - \frac{(\delta \alpha)^2}{2}\right),$ и, на его основании

 $\frac{1}{(\vec{\tau}_0\vec{r})} \approx \frac{1}{(\vec{\tau}_0\vec{r})_0} - \delta \left(\frac{1}{(\vec{\tau}_0\vec{r})}\right),$ где приняты обозначения  $(\vec{\tau}_0\vec{r})_0 = r\cos(\alpha_0) -$  невозмущенная полем деформации продольная компонента параметра  $(\vec{\tau}_0\vec{r}),$  а  $\delta(\vec{\tau}_0\vec{r}) = (\vec{\tau}_0\vec{r})_0 \frac{(\delta\alpha)^2}{2} -$  обусловленная полем продольной деформации возмущаю-

щая поправка к параметру  $(\vec{\tau}_0 \vec{r})$ ;  $\frac{1}{(\vec{\tau}_0 \vec{r})_0}$ ,  $\delta \left(\frac{1}{(\vec{\tau}_0 \vec{r})}\right) = \frac{1}{(\vec{\tau}_0 \vec{r})_0} \frac{(\delta \alpha)^2}{2}$  компоненты, опре-

деленные аналогичным образом по отношению к величине  $\frac{1}{(\vec{\tau}_0 \vec{r})}$ .

Таким образом, представляя безразмерный характеристический параметр,  $\frac{d}{(\vec{\tau}_0\vec{r})}, \text{ согласно описанной выше схеме } \frac{d}{(\vec{\tau}_0\vec{r})} \approx (d_0 \pm \delta d) \cdot \left(\frac{1}{(\vec{\tau}_0\vec{r})_0} - \delta\left(\frac{1}{(\vec{\tau}_0\vec{r})}\right)\right), \text{ в виде}$ 

$$\frac{\mathrm{d}}{\left(\vec{\tau}_{0}\vec{r}\right)} \approx d_{0} \times \frac{1}{\left(\vec{\tau}_{0}\vec{r}\right)_{0}} \pm \delta \,\mathrm{d} \times \frac{1}{\left(\vec{\tau}_{0}\vec{r}\right)_{0}} - d_{0} \times \delta \left(\frac{1}{\left(\vec{\tau}_{0}\vec{r}\right)}\right) \mp \delta \,\mathrm{d} \times \delta \left(\frac{1}{\left(\vec{\tau}_{0}\vec{r}\right)}\right),\tag{19}$$

и, ограничиваясь в (12) линейным приближением теории возмущений

$$\frac{\mathrm{d}}{\left(\vec{\tau}_{0}\vec{r}\right)} \approx \left(\frac{\mathrm{d}}{\left(\vec{\tau}_{0}\vec{r}\right)}\right)_{0} \pm \delta \,\mathrm{d} \times \frac{1}{\left(\vec{\tau}_{0}\vec{r}\right)_{0}} - d_{0} \times \delta\left(\frac{1}{\left(\vec{\tau}_{0}\vec{r}\right)}\right),\tag{20}$$

где  $\left(\frac{\mathrm{d}}{(\vec{\tau}_0\vec{r})}\right)_0 = d_0 \times \frac{1}{(\vec{\tau}_0\vec{r})_0}$  – невозмущенная полем деформации компонента параметра

 $\frac{\mathrm{d}}{\left(\vec{\tau}_{0}\vec{r}\right)}$ .

В общем случае, переписывая третье и четвертое слагаемые в левой части

$$(17) \left(\frac{\mathrm{d}}{\left(\vec{\tau}_{0}\vec{r}\right)\cos\theta}\right)^{2}, \left(\frac{\mathrm{d}tg\,\theta}{\left(\vec{\tau}_{0}\vec{r}\right)}\right)^{2}, \text{ с учетом (19)}$$
$$\left(\frac{\mathrm{d}}{\left(\vec{\tau}_{0}\vec{r}\right)}\right)^{2} \approx \left(\left(\frac{\mathrm{d}^{2}}{\left(\vec{\tau}_{0}\vec{r}\right)}\right)_{0} \pm \delta \,\mathrm{d} \times \frac{1}{\left(\vec{\tau}_{0}\vec{r}\right)_{0}} - d_{0} \times \delta\left(\frac{1}{\left(\vec{\tau}_{0}\vec{r}\right)}\right)\right)^{2}, \tag{20, a}$$

$$\left(\frac{\mathrm{d}tg\,\theta}{\left(\vec{\tau}_{0}\vec{r}\right)}\right)^{2} \approx tg^{2}\,\theta \times \left(\left(\frac{\mathrm{d}^{2}}{\left(\vec{\tau}_{0}\vec{r}\right)}\right)_{0} \pm \delta\,\mathrm{d}\times\frac{1}{\left(\vec{\tau}_{0}\vec{r}\right)_{0}} - d_{0}\times\delta\left(\frac{1}{\left(\vec{\tau}_{0}\vec{r}\right)}\right)\right)^{2},\tag{20, 6}$$

а общее решение уравнения моделируя в четвертом приближении по параметру деформации

$$u \approx u^{(0)} + u^{(1)} + u^{(2)} + u^{(3)} + u^{(4)}, \tag{21}$$

и, подставляя (20а), (20б) и (21) в (17), строится разложение показателя преломления световой волны (оптического сигнала) в ряд по параметру деформации

$$n \approx n^{(0)} + n^{(1)} + n^{(2)} + n^{(3)} + n^{(4)}.$$
 (22)

В (22) искомая величина показателя преломления световой волны и его компоненты рассчитываются в функциях параметров модели, в зависимости от угла падения световой волны (оптического сигнала) θ, толщины образца d, расстояния от начала координат (в месте расположения точечного источника выходного оптического сигнала) до точки выхода преломленной в образце световой волны (выходного оптического сигнала), от угла выхода сигнала α<sub>0</sub> и от малых

величин поправок по деформациям  $\delta d$ ,  $\frac{(\delta \alpha)^2}{2}$ .

В рамках развиваемой в данной работе методологии [91], ввиду малых интенсивностей оптического детектирующего сигнала (как входного, так и выходного), нелинейные оптические процессы при взаимодействии световой волны с материалом оптоволокна проявляются слабо, влияния параметров (амплитуда  $|\vec{E}_0|$  и интенсивность I) световой волны  $\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot \exp(i\omega t - \vec{k}\vec{r})$  на комплексный показатель преломления (КПП)  $\hat{n}^{(\Omega)} = \operatorname{Re}(\hat{n}^{(\Omega)}) - i\operatorname{Im}(\hat{n}^{(\Omega)})$  не рассматриваются и,

ввиду линейности самой физической модели, механизм оптико-механических эффектов, связанных с влияниями деформаций экспериментального образца (оптоволокна) на функции  $\operatorname{Re}\left(\hat{n}^{(\varOmega)}\right)$ ,  $\operatorname{Im}\left(\hat{n}^{(\varOmega)}\right)$  ограничивается упругим приближением и, влиянием температуры образца на его комплексный показатель преломления также можно пренебречь. В этом случае, процессы поляризации материала оптоволокна в поле электромагнитной волны не являются релаксационными (когда времена релаксации порядка  $\tau_{rp} \approx (10^{-10} \div 10^{-6})$  с), а описываются индукционным механизмом (с временами релаксации порядка  $\tau_{ind} \approx (10^{-12} \div 10^{-10})$  с) и потери (рассеяния) энергии электромагнитной волны в оптоволокне являются резонансными (высокочастотными) и, по сути, изотермическими, когда компреобразуется к вещественному виду плексный показатель преломления  $\hat{n}(T_0;\omega;\xi_0) = \operatorname{Re}\left(\hat{n}(T_0;\omega;\xi_0)\right) - i\operatorname{Im}\left(\hat{n}(T_0;\omega;\xi_0)\right) \rightarrow n_{\infty}(T_0;\omega;\xi_0) \equiv n_{\infty}, \quad \Gamma \exists e = T_0, \xi_0 - \Pi p u \text{ нимае-}$ мые в модели константами температура и параметры структуры (определяемые типом и молекулярными характеристиками химических связей и геометрическими характеристиками кристаллической решетки) образца;  $n_{\infty} = \sqrt{\epsilon_{\infty} \mu_{\infty}} - высо$ кочастотный показатель преломления оптоволокна,  $\epsilon_{\infty}$ ,  $\mu_{\infty}$ - соответственно принимаемые в модели константами высокочастотные диэлектрическая и магнитная проницаемости оптоволокна.

В общем случае, для произвольного диэлектрика или полупроводника, принимаем обусловленный электромагнитной волной ток смещения в виде  $\vec{j}(t) = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ , где вектор электростатической индукции электрического поля волны  $\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot \exp(i\omega t - \vec{k}\vec{r})$  вычисляется с учетом как индукционной  $\vec{D}_{ind}(t) = \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \vec{E}(t)$ , так и релаксационной  $\vec{D}_{rp}(t) = \vec{P}_{rp}(t)$  поляризации материала  $\vec{D}(t) = \varepsilon_0 \hat{\epsilon} \vec{E}(t)$ , где  $\hat{\epsilon} = \operatorname{Re}(\hat{\epsilon}) - i\operatorname{Im}(\hat{\epsilon})$ . В случае однородности решений уравнения Даламбера, в пределах величины постоянной решетки, когда  $(\vec{k}\vec{r}) = \frac{2\pi(\vec{v}\vec{r})}{\lambda v} = \frac{2\pi r}{\lambda} \cos\alpha <<1$ , принимая

$$\vec{j}(t) = i \, \omega \varepsilon_0 \hat{\varepsilon} \, \vec{E}(t). \tag{23}$$

Компоненты плотности тока

$$\operatorname{Re}(\vec{j}(t)) = \omega \varepsilon_0 \vec{E}_0 (\operatorname{Im}(\hat{\varepsilon}) \times \cos(\omega t) - \operatorname{Re}(\hat{\varepsilon}) \times \sin(\omega t)),$$
$$\operatorname{Im}(\vec{j}(t)) = \omega \varepsilon_0 \vec{E}_0 (\operatorname{Re}(\hat{\varepsilon}) \times \cos(\omega t) + \operatorname{Im}(\hat{\varepsilon}) \times \sin(\omega t)),$$

после некоторых усреднений по периоду колебаний волны

$$\langle \operatorname{Re}(\vec{E}(t)) \times \operatorname{Re}(\vec{j}(t)) \rangle = \langle \operatorname{Im}(\vec{E}(t)) \times \operatorname{Im}(\vec{j}(t)) \rangle = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \vec{E}_0^2 \times \operatorname{Im}(\hat{\varepsilon}),$$
 (24, a)

$$\langle \operatorname{Re}(\vec{E}(t)) \times \operatorname{Im}(\vec{j}(t)) \rangle = -\langle \operatorname{Im}(\vec{E}(t)) \times \operatorname{Re}(\vec{j}(t)) \rangle = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \vec{E}_0^2 \times \operatorname{Re}(\hat{\varepsilon}),$$
 (24,

б)

позволяют рассчитать компоненты комплексной диэлектрической проницаемости материала оптоволокна

$$\operatorname{Im}(\hat{\varepsilon}) = \frac{2}{\omega\varepsilon_0 \,\vec{E}_0^2} \left\langle \operatorname{Re}\left(\vec{E}(t)\right) \times \operatorname{Re}\left(\vec{j}(t)\right) \right\rangle = \frac{2}{\omega\varepsilon_0 \,\vec{E}_0^2} \left\langle \operatorname{Im}\left(\vec{E}(t)\right) \times \operatorname{Im}\left(\vec{j}(t)\right) \right\rangle, \quad (25, a)$$

$$\operatorname{Re}(\hat{\varepsilon}) = \frac{2}{\omega\varepsilon_0 \,\vec{E}_0^2} \left\langle \operatorname{Re}\left(\vec{E}(t)\right) \times \operatorname{Im}\left(\vec{j}(t)\right) \right\rangle = -\frac{2}{\omega\varepsilon_0 \,\vec{E}_0^2} \left\langle \operatorname{Im}\left(\vec{E}(t)\right) \times \operatorname{Re}\left(\vec{j}(t)\right) \right\rangle.$$
(25, 6)

С другой стороны, принимая плотность тока в виде

$$\vec{j}(t) = i \omega \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \vec{E}(t) + \frac{\partial \vec{P}_{rp}(t)}{\partial t}, \qquad (26)$$

где ɛ<sub>∞</sub>- индукционная (высокочастотная) составляющая комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) материала оптоволокна, имеем

$$\operatorname{Re}(\vec{j}(t)) = -\omega\varepsilon_{0}\varepsilon_{\infty}\vec{E}_{0}\sin(\omega t) + \operatorname{Re}\left(\frac{\partial\vec{P}_{rp}(t)}{\partial t}\right), \quad \operatorname{Im}(\vec{j}(t)) = \omega\varepsilon_{0}\varepsilon_{\infty}\vec{E}_{0}\cos(\omega t) + \operatorname{Im}\left(\frac{\partial\vec{P}_{rp}(t)}{\partial t}\right),$$

откуда

$$\left\langle \operatorname{Re}\left(\vec{E}(t)\right) \times \operatorname{Re}\left(\vec{j}(t)\right) \right\rangle = \left\langle \operatorname{Re}\left(\vec{E}(t)\right) \times \operatorname{Re}\left(\frac{\partial \vec{P}_{rp}(t)}{\partial t}\right) \right\rangle,$$
 (27, a)

$$\left\langle \operatorname{Im}\left(\vec{E}(t)\right) \times \operatorname{Im}\left(\vec{j}(t)\right) \right\rangle = \left\langle \operatorname{Im}\left(\vec{E}(t)\right) \times \operatorname{Im}\left(\frac{\partial \vec{P}_{rp}(t)}{\partial t}\right) \right\rangle,$$
 (27, б)

$$\left\langle \operatorname{Re}\left(\vec{E}(t)\right) \times \operatorname{Im}\left(\vec{j}(t)\right) \right\rangle = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon_{\infty} \vec{E}_0^2 + \left\langle \operatorname{Re}\left(\vec{E}(t)\right) \times \operatorname{Im}\left(\frac{\partial \vec{P}_{rp}(t)}{\partial t}\right) \right\rangle,$$
 (27, B)

$$\left\langle \operatorname{Im}(\vec{E}(t)) \times \operatorname{Re}(\vec{j}(t)) \right\rangle = -\frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \vec{E}_0^2 + \left\langle \operatorname{Im}(\vec{E}(t)) \times \operatorname{Re}\left(\frac{\partial \vec{P}_{rp}(t)}{\partial t}\right) \right\rangle.$$
 (27,  $\Gamma$ )

Из равенств (25, а), (25, б) и (27, а) - (27, г) вытекают обобщенные выражения для компонент КДП оптоволокна

$$\operatorname{Im}(\hat{\varepsilon}) = \frac{2}{\omega\varepsilon_0 \vec{E}_0^2} \left\langle \operatorname{Re}(\vec{E}(t)) \times \operatorname{Re}\left(\frac{\partial \vec{P}_{rp}(t)}{\partial t}\right) \right\rangle, \quad \operatorname{Im}(\hat{\varepsilon}) = \frac{2}{\omega\varepsilon_0 \vec{E}_0^2} = \left\langle \operatorname{Im}(\vec{E}(t)) \times \operatorname{Im}\left(\frac{\partial \vec{P}_{rp}(t)}{\partial t}\right) \right\rangle, \quad (28, a)$$

$$\operatorname{Re}(\hat{\varepsilon}) = \varepsilon_{\infty} + \frac{2}{\omega\varepsilon_{0} \vec{E}_{0}^{2}} \left\langle \operatorname{Re}(\vec{E}(t)) \times \operatorname{Im}\left(\frac{\partial \vec{P}_{rp}(t)}{\partial t}\right) \right\rangle, \qquad (28, 6)$$

$$\operatorname{Re}(\hat{\varepsilon}) = \varepsilon_{\infty} - \frac{2}{\omega\varepsilon_{0}\vec{E}_{0}^{2}} \left\langle \operatorname{Im}(\vec{E}(t)) \times \operatorname{Re}\left(\frac{\partial \vec{P}_{rp}(t)}{\partial t}\right) \right\rangle.$$
(28, B)

Энергии электромагнитной волны, передаваемой в единице объема вещества оптоволокна, в единицу времени

$$w_{\partial Vt} = \vec{j}(t)\vec{E}(t) = i\omega\varepsilon_0\hat{\varepsilon}\vec{E}^2(t), \qquad (29)$$

$$w_{\partial Vt} = \operatorname{Re}\left[\vec{j}(t)\right]\operatorname{Re}\left[\vec{E}(t)\right] - \operatorname{Im}\left[\vec{j}(t)\right]\operatorname{Im}\left[\vec{E}(t)\right] + i\left(\operatorname{Re}\left[\vec{j}(t)\right]\operatorname{Im}\left[\vec{E}(t)\right] + \operatorname{Im}\left[\vec{j}(t)\right]\operatorname{Re}\left[\vec{E}(t)\right]\right),$$

после усреднения за период колебаний волны дает

$$\langle w_{\partial Vt} \rangle = 0,$$

откуда получены равенства

$$\left\langle \operatorname{Re}\left[\vec{j}(t)\right]\operatorname{Re}\left[\vec{E}(t)\right]\right\rangle = \left\langle \operatorname{Im}\left[\vec{j}(t)\right]\operatorname{Im}\left[\vec{E}(t)\right]\right\rangle, \quad \left\langle \operatorname{Re}\left[\vec{j}(t)\right]\operatorname{Im}\left[\vec{E}(t)\right]\right\rangle = -\left\langle \operatorname{Im}\left[\vec{j}(t)\right]\operatorname{Re}\left[\vec{E}(t)\right]\right\rangle,$$

согласующиеся с (24, а), (24, б) и, соответственно, с (27, а) - (27, г).

При этом, объемная плотность мощности электромагнитного поля волны, рассеянной в оптоволокне  $Q_{\partial Vt} = \langle \operatorname{Re}[\vec{j}(t)]\operatorname{Re}[\vec{E}(t)] \rangle$ , согласно выражениям (28, а), (28, б), определяется релаксационными процессами, связанными с неупругой или релаксационной (в оптоволокне, в основном, ионно-релаксационной) поляризацией вещества в электрическом поле волны и сводится к формированию объемно-зарядового распределения, обусловленного движением основных

носителей заряда или релаксаторов (в оптоволокне, в основном, ионов различных знаков заряда) в поле ионной подрешетки, возмущенной электрическим полем волны в течении времени сравнимого с временем релаксации, зависящим, в существенной степени, от параметров структуры ионной подрешетки и от температуры образца. Поскольку, в рамках данной работы, исследуются процессы взаимодействия образца с полем электромагнитной волны оптического (видимого) диапазона (первичный сигнал генерируется источником лазерного излучения), то, как отмечалось выше, при исследовании поляризационных процессов в материале оптоволокна (основного рабочего органа установки), необходимо ограничиваться высокочастотными (индукционными) поляризационными эффектами, связанными с упругой поляризацией (упруго-ионной, упруго-дипольной и электронной поляризацией), сводящейся в общем случае, на микроскопическом уровне, к соответствующим неравновесным процессам (кинетическим явлениям), характеризуемым сложными аналитическими выражениями для времен релаксации, вычисляемым в оптическом диапазоне частот внешнего поляризующего поля и частотными гармониками поляризации (с учетом нелинейных оптических эффектов второго порядка и выше), но, сводящиеся, на макроскопическом уровне, в рамках развиваемой нами физической модели, с целью упрощения процедуры математического описания процессов такого типа, к измерению индукционной (высокочастотной) диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{\pmb{\infty}}$  материала оптоволокна, связанной, в случае слабого проявления магнитных свойств образца, с высокочастотным показателем преломления оптоволокна простым соотношением  $n_{\infty} = \sqrt{\epsilon_{\infty}}$ . В области линейных оптических эффектов, влияние температуры образца и параметров электромагнитного поля волны на показатель ее преломления в веществе пренебрежимо малы и, значения вычисленного с помощью феноменологического уравнения (17) показателя преломления оптоволокна определяются геометрическими параметрами модели только  $n_{\infty} = \sqrt{u(d;\theta;\alpha_0)^2 - \sin^2\theta}.$ 

72
Таким образом, в данной модели, пренебрегая релаксационной (низкочастотной) поляризацией образца  $\frac{\partial \vec{P}_{rp}(t)}{\partial t} \rightarrow 0$  и, ограничиваясь, на основании уравнений (27, а) – (27, г), предельным выражением  $P_{\partial Vt} \rightarrow 0$ , вычсилена объемная плотность мощности электрического поля электромагнитной волны в оптоволокне в виде

$$P_{\partial Vt} = \left\langle \operatorname{Re}\left(\vec{E}(t)\right) \times \operatorname{Im}\left(\vec{j}(t)\right) \right\rangle \approx \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon_{\infty} \vec{E}_0^2.$$
(30)

Объемная плотность мощности магнитного поля электромагнитной волны в немагнитном оптоволокне, вычисляется на основании приближенных равенств  $\vec{H} = \vec{H}_0 \cdot \exp(i\omega t - \vec{k}\vec{r}) \approx \vec{H}_0 \cdot \exp(i\omega t), \ \vec{B}(t) \approx \mu_0 \vec{H}$  и приводим к виду

$$P_{mVt} = \left\langle \operatorname{Re}\left[\vec{H}(t)\right] \operatorname{Im}\left[\frac{\partial \vec{B}(t)}{\partial t}\right] \right\rangle \approx \frac{1}{2} \omega \mu_0 \vec{H}_0^2.$$
(31)

Объемная плотность мощности электромагнитного поля волны вычислены с учетом тождества  $\mu_0 \vec{H}_0^2 = \varepsilon_0 \varepsilon_{\infty} \vec{E}_0^2$ , из выражения

$$P_{Vt} = P_{\partial Vt} + P_{mVt} \approx \omega \varepsilon_0 \varepsilon_{\infty} \vec{E}_0^2.$$
(32)

Далее, модуль вектора плотности потока энергии электромагнитной волны равный  $s = |\vec{E} \times \vec{H}| \approx |\vec{E}_0| |\vec{H}_0| \exp(2i\omega t)$ ,, позволяет рассчитать интенсивность электромагнитной волны  $I = \langle \operatorname{Re}[|\vec{E}(t)|] \operatorname{Im}[|\vec{H}(t)|] \rangle \approx \frac{1}{2} |\vec{E}_0| |\vec{H}_0|$ , в виде  $I \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty}{\mu_0}} \vec{E}_0^2$ , откуда, на основании (32), получаем распределение объемной плотности мощности электромагнитного поля волны по углам  $\alpha_0$  (между направлением волнового вектора волны и нормалью к поверхности чувствительной световоспринимающей пластины)

$$P_{Vt}(d;\theta;\alpha_0) = 2\omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon_\infty} I \approx 2\omega \frac{n_\infty(d;\theta;\alpha_0)}{c} I.$$
(33)

Расчетная величина  $n_{\infty}(d;\theta;\alpha_0)$  вычисляется из численного решения феноменологического уравнения (17).

Нулевое приближение по безразмерным малым параметрам деформаций

образца  $\frac{\delta d}{d}$  (продольной),  $\frac{\delta(\vec{r}_0\vec{r})}{(\vec{r}_0\vec{r})_0} = \frac{(\delta \alpha)^2}{2}$  (поперечной) при решении уравнения (17) дает значения искомой функции  $n_{\infty}^{(0)}(d;\theta;\alpha_0)$  для недеформированного образца.

Все последующие более высокого порядка теории возмущений приближения дают поправки к основному невозмущенному состоянию.

Измеряемой в эксперименте величиной является усредненная по углам *а*<sub>0</sub> функция (33)

$$\langle P_{Vt}(\mathbf{d};\theta;\alpha_0)\rangle = \frac{2\omega}{c\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I(\alpha_0) \mathbf{n}_{\infty}(\mathbf{d};\theta;\alpha_0) d\alpha_0.$$
 (34)

Нулевое приближение теории возмущений по безразмерным малым параметрам деформаций  $\frac{\delta d}{d}$ ,  $\frac{\delta(\bar{\tau}_0\bar{r})}{(\bar{\tau}_0\bar{r})_0} = \frac{(\delta \alpha)^2}{2}$  в выражении (34), дает расчетное (теоретическое) значение измеряемой в эксперименте объемной плотности мощности электромагнитного поля волны, детектируемой чувствительной мембраной (фотопластинкой) после преломления исходящего (первичного оптического сигнала) в недеформированном оптоволоконном образце. В этом случае

$$\left\langle P_{Vt}\left(d;\theta;\alpha_{0}\right)\right\rangle = \frac{2\omega}{c\pi}\int_{0}^{\frac{\pi}{2}}I(\alpha_{0})n_{\infty}^{(0)}(d;\theta;\alpha_{0})d\alpha_{0}.$$
(35)

В произвольном k-ом приближение теории возмущений, сравнение с экспериментом и установление степени влияний величин деформаций  $\frac{\delta d}{d}$ ,  $\frac{\delta(\vec{\tau}_0\vec{r})}{(\vec{\tau}_0\vec{r})_0} = \frac{(\delta \alpha)^2}{2}$  на измеренную в эксперименте объемную плотность мощности электромагнитного поля волны (светового потока), выходящего из оптоволоконного материала (элемента) и распределенного по поверхности световоспринимающей мембраны (детектирующего экрана), проводится путем суммирования членов степенного ряда

$$\langle P_{Vt}(\mathbf{d};\theta;\alpha_0)\rangle = \sum_{s=1}^k \langle P_{Vt}^{(s)}(\mathbf{d};\theta;\alpha_0)\rangle,$$
(36)

ГДе 
$$\left\langle P_{V_t}^{(s)}(d;\theta;\alpha_0) \right\rangle = \frac{2\omega}{c\pi} \int_{0}^{\frac{\pi}{2}} I(\alpha_0) n_{\infty}^{(s)}(d;\theta;\alpha_0) d\alpha_0.$$

#### 2.3 Процесс моделирования деформации на волокно

Основное направление работы связано с разработкой и созданием информационно-измерительного комплекса контроля, основой которой будет волоконно-оптический датчик, с учетом [92-97], в которых были приведены некоторые результаты исследований. Эти исследования направлены на поиск конструктивных решений для создания наилучшего оптимального датчика деформации, который может точно преобразовывать деформацию в инструмент при изменении характера световых волн, проходящих через оптическое волокно. При исследовании установлено, что имеет место воздействия со стороны пород выработки на прибортовой массив. Данное воздействие создает некую опасность внезапного обрушения бортов карьера. Также можно отметить, что для идентификации параметров, приводящих к обрушению бортов карьера, необходимо установить первоначальное смещение и деформацию пластов кровли перед обрушением. Изменение свойств напряжений проявляется образованием в породе участков с более низкими значениями механических напряжений и увеличиваются вдоль бортов карьера трещины и появляется растягивающее напряжение в прибортовом массиве. Принимая во внимание это обстоятельство был смоделирован данный процесс.

На рисунках 15 и 16 представлена компьютерная модель волоконно-оптических датчиков, созданная в программе ANSYS. Данная модель имитирует механическое воздействие на волоконно-оптический датчик смещения при воздействии на него горной массы.

B: Static Structural Directional Deformation Type: Directional Deformation(Y Axis) Unit: mm Global Coordinate System Time: 10 22.05.2016 3:27				ANSYS R14.5
0,207 Max 4,9492e-002 7 0,16908 0,12916 0,090246 0,051329 0,012411		-0,14281	5,9574e-003 )*	2,3989e-002
-0,025506 -0,065424 -0,10434 -0,14326 Min				v.e.
Geometry (Drint Durning) Research Denvirger	0,000	0,500 250 0,	1,000 (mm)	

Рисунок 15 - Компьютерная модель волоконно-оптических датчиков, созданная в



программе ANSYS

Рисунок 16 - Схема волоконно-оптического датчика для исследования на механические воздействия, созданная в программе ANSYS

Для численного анализа и моделирования воздействия деформации на прибортовой массив был использован метод конечных элементов ANSYS STATIC STRUCTURAL. Также выполнена имитация смещения оптического волокна, которое является датчиком, при изменении прибортового массива.

Процесс образования и роста трещин является самопроизвольным, вызывая общие изменения в распределении давления в породе, и в то же время может образовывать очаг концентрации напряжений, что приводит к открытию трещин и риску обрушения бортов карьера. Объектом исследования являются волоконно-оптические датчики, предназначенные для измерения деформации прибортового массива. Основой измерительного элемента оптоволоконного датчика является оптическое волокно диаметром 9 мкм. Установленная температура оптического волокна составляет 200С, что также учитывается, поскольку температура влияет на показатель преломления оптического волокна, и его изменения необходимо учитывать. Согласно результатам моделирования, получена зависимость механического воздействия от изменения величины механического напряжения, создаваемого оптическим волокном, и полученная кривая является достаточно линейной. Использован полупроводниковый лазер в качестве источника оптического излучения. В моделировании задавались параметры длины волны в диапазоне 1310 – 1625 нм. Для проведения моделирования воздействия деформации на прибортовой массив были использованы возможности программы ANSYS STATIC STRUCTURAL. Программный продукт ANSYS STATIC STRUCTURAL имеет возможность определять деформации в виде смещения, напряжения, внутренней силы тела при нагрузке. Визуализация напряженно-деформированного состояния при механическом воздействии на оптическое волокно показано на рисунке 17.



Рисунок 17 - Визуализация деформации трехмерного моделирования в программ-

ном пакете ANSYS

### **2.3** Планирование эксперимента, обработка результатов измерений и построение математических моделей

Для проверки выдвинутой научной гипотезы любой эксперимент начинается с планирования, наблюдения, измерений. Полученная информация требует теоретических знаний основ физических процессов построения моделей. Теоретический метод в виде математической модели раскрывает способ влияния на изменение в желаемом направлении. Но при построении математической модели необходимо вводить ограничения, предположения. Поэтому возникают проблемы при оценке надежности созданной модели. Эксперимент представляет собой метод проверки адекватности теоретической модели. С целью получения достоверной информации о свойствах исследуемого объекта, представляющего собой оптоволоконный датчик, установленный в горнодобывающей промышленности, было проведено п экспериментов. Точность построенной математической модели оценивается по критерию Фишера, который доказывает, что разумное планирование эксперимента имеет значительный выигрыш в точности оценки, как и оптимальная обработка результатов измерений [98]. Целью эксперимента является получение математической модели, которая связывает значение коэффициента с результатами эксперимента с использованием нескольких параметров. Основным требованием плана факторного эксперимента является сведение к минимуму количества экспериментов, в которых получены надежные оценки вычисленных параметров, при сохранении приемлемой точности математической модели в факторном пространстве. Задача обработки текущих экспериментальных результатов состоит в том, чтобы определить значение А и В. Целью эксперимента является получение и проверка математической модели объекта исследования, а также описание взаимосвязи между входными и выходными параметрами в функциональной и количественной форме.

Математические модели, полученные в процессе исследования, и математические модели, предлагаемые в будущем, отвечают требованиям

удобства и интерпретируемости математического использования. Граничное условие Q=0.001 до 100 МПа является пределом применимости модели. Для оценки относительной надежности модели используется стандартное отклонение СО%. Согласно значению СО%, модель может быть оценена в соответствии со следующими критериями: CO%≤20 - отличная модель; 20<CO%≤50 - хорошая 50<CO%≤80 CO%>80 модель; удовлетворительная модель; неудовлетворительная модель. Критерий Фишера (F) рассчитывается через СО%. Вычисление критерия Фишера (F) уровней значимости 001 и 005 и их критических значений осуществляется с помощью программы ANETR. Утверждают, что при значительной взаимосвязи 99%-ную надежность при F≥F001 и 95%-ную надежность при F≥F005. Используя программу ANETR, составлена матрица планирования, где т - количество независимых переменных (факторов), а n - количество уровней каждой независимой переменной. Для каждой матрицы количество независимых переменных можно уменьшить, удалив одноименный числовой столбец в числовом прямоугольнике (по позиции). Планируемые условия надежности: m не превышает n+1. Матрица планирования состоит из серии экспериментов, а оценка дисперсии всего эксперимента получается в результате усреднения значений дисперсии всех экспериментов [98]. Количество выполненных измерений равно 10, а значения повторных измерений точно такие же.

Изучение процессов, связанных с напряжением и деформацией в исследуемом объекте, связано с разработкой детерминированной модели, отражающей физическую природу его явления, и содержащей описание механизма основных процессов, которые в нем происходят. Среди задач, которые решены при планировании эксперимента, можно выделить следующие: определение (уточнение) параметров модели; дискриминация, механизм отклонения базового процесса, подлежащего тестированию.

Массив горных пород разреза представлен слабыми аргиллитами, склонными к пучению при увлажнении почвы и к вывалам пород кровли. Прочность пород на сжатие не превышает 100-200 кг/см2. Основная кровля сложена

79

переслаиванием алевролитов, песчаников и аргиллитов. Пласты K10, K12 склонны к самовозгоранию, пожароопасны. Угольная пыль взрывчатая. В соответствии с [99] принимаются величины их смещений на контуре поперечного сечения выработки, за весь срок ее эксплуатации без крепи, согласно разделению горных пород по устойчивости, таблице 3 [99].

Таблица 3 - Критерий устойчивости пород по значению их смещений на контуре поперечного сечения выработки (ВНИМИ).

Кате-	Оценка состояния	Смещение U, мм			
гория	устойчивости по-	Осадочные по- Изверженные		Соляные по-	
устой-	род	роды (песча-	породы (гра-	роды (каменная	
чиво-		ники, алевро-	ниты, диориты,	соль, сильви-	
сти		литы, аргил-	порфириты и	нит, карналит и	
пород		литы, извест-	др.)	др.)	
		няки, уголь и			
		др.)			
1	2	3	4	5	
Ι	Устойчивое	До 20	До 50	До 200	
II	Среднеустойчивое	св. 50 до 200	св. 20 до 100	св. 200 до 300	
III	Не устойчивое	>>200>>500	>>100>>200	>>300>>500	
IV	Очень неустойчи-	св. 500	св. 200	св. 500	
	вое				

Отнесение выработки к той или иной категории устойчивости следует проводить по абсолютному значению максимальных смещений пород на контуре поперечного сечения. Обобщенные критерии этих состояний приведены в таблице 4 [100].

Таблица 4 - Обобщенные критерии состояния породных массивов

Категория	Оценка состояния	Характеристика состояния устойчивости		
устойчивости	устойчивости по-			
пород	род			
1	2	3		
Ι	Устойчивое	Отсутствуют заметные смещения и разруше-		
		ния пород или имеются мелкие локальные		
		разрушения.		
II	Среднеустойчивое	Незначительное распространение наруше-		
		ний пород вглубь массива, соответствующие		
		начальной стадии общего развития зоны не-		
		упругих деформаций в окружающих выра-		
		ботку породах; возможно нарушение целост-		
		ности пород в структурно ослабленных зонах		
		с образованием небольших сводов обруше-		
		ния. Деформации пород носят затухающий		
		характер.		
III	Не устойчивое	Дальнейшее развитие зон деформаций и		
		нарушений пород со значительными смеще-		
		ниями свободного контура выработки. По-		
		степенный подход к слабо затухающим во		
		времени деформациям пород.		
IV	Очень неустойчи-	Вокруг выработки развиваются большие		
	вое	зоны неупруго-деформирующихся пород с		
		их разрушением. Смещения свободного (или		
		при малом отпоре крепи) контура выработки		
		носят слабо затухающий и незатухающий ха-		
		рактер.		

Расчеты базируются на методике Хука-Брауна [1001, которыми

предложены критерии устойчивости в качестве основы для проектирования горных выработок и анализа данных [102].

Хук и Браун предложили стандарты устойчивости в качестве основания для анализа данных на карьерах. Стандарт был выведен Хуком на основе результатов исследований хрупкого разрушения ненарушенных горных пород с учетом модели Брауна, описывающей поведение разрушенных горных пород [102]. Исходное соотношение, описывающее критерий Хука-Брауна, записывается в виде:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci}(m\frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s)^{0.5},$$

где  $\sigma'_1$  и  $\sigma'_3$  - максимальное и минимальное рабочее напряжение,  $\sigma_{ci}$  - прочность на сжатие по одной оси, m и s – постоянная, которая зависит от типа материала, s = 1 для ненарушенного массива.

Соотношение напряжений, действующих в массиве, описывается следующей формулой:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci}(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s)^a,$$

где  $m_b$  – приведенное значение постоянной массива, определяемое выражением

$$m_b = m_i e^{(\frac{GSI-100}{28-14D})}$$
,

где *s* и а – постоянные для горных пород, задаваемые соотношениями

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)};$$
  
$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}).$$

Нормальное напряжение сжатия и напряжение растяжения определяются основным напряжением в соответствии с уравнением, описанным Балмером

$$\sigma'_{n} = \frac{\sigma'_{1} + \sigma'_{3}}{2} - \frac{\sigma'_{1} - \sigma'_{3}}{2} \cdot \frac{\frac{d\sigma'_{1}}{d\sigma'_{3}} - 1}{\frac{d\sigma'_{1}}{d\sigma'_{3}} + 1};$$

$$\tau = (\sigma_1' - \sigma_3') \cdot \frac{\sqrt{\frac{d\sigma_1'}{d\sigma_3'}}}{\frac{d\sigma_1'}{d\sigma_3'} + 1}.$$

Модуль деформации для  $\sigma_{ci} \leq 100$  МПа задается следующим выражением:

$$E_m = (1 - \frac{D}{2}) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{(GSI - 10/40)}$$

Для  $\sigma_{ci} > 100$  МПа выражение будет следующим:

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot 10^{\left(GSI - \frac{10}{40}\right)}.$$

Расчет геомеханической модели осуществляется на основе метода конечных элементов по исходным данным, приведенным в таблице 2.1.

Методика позволяет экспериментировать с неуправляемыми и контролируемыми данными (можно задать уровень каждого параметра). Для работы в программе не требуется длительной специальной подготовки. Одним из преимуществ этого метода является возможность оценки результатов измерений с высоким уровнем достоверности (например, по критерию Фишера). Это обеспечивается процессом постепенной нейтрализации влияния сильных параметров на функцию, при котором начинает проявляться влияние слабых параметров. Метод является детерминированным, что означает, что он позволяет ограничить выбор моделей известными данными из теории процессов (типы уравнений, границы и т.д.). В конце программы отображается диаграмма и рейтинг надежности с размещением факторов на основе их интенсивности влияния на результаты, что позволяет нам идентифицировать факторы, оказывающие существенное влияние.

Для обработки полученных данных применяется статистически детерминированный метод построения модели с использованием компьютера и программы ANETR. Приняты граничные условия: давление горных пород на горную выработку Q колеблется от 0.001 до 100 МПа; омах< оТ; движение вдоль оси после приложения давления OX=0m; OY=0m; OZ=0m. Начальное условие величины приложенной силы Qpaб =10000Па, Q'0=0. В ходе аппроксимации с использованием программы ANETR была разработана однофакторная математическая модель:

Значение максимального напряжения  $\sigma_{\text{мах}}$  зависит от давления, приложенного к зоне прибортового массива Q от 0.01 до 100 МПа:

σ

$$\sigma_{\text{max}} = Q_{\text{pa6}}/(0.228692 + 6.12396 \cdot 10^{-13} \cdot Q_{\text{pa6}}),$$
 ΜΠα

-F(0)

В соответствии со стандартом модели оценки стандартного отклонения CO=0.09%, при условии CO%≤20 – модель отличная. Благодаря оценке модели с помощью коэффициента Фишера F=1135372.82250, если существует существенная связь, надежность при F≥F001 равна 99%.

Максимальное значение напряжения  $\sigma_{max1}$  зависит от давления, приложенного к зоне прибортового массива Q от 0.001 до 100 Мпа:

$$\sigma_{
m Max2} = F(Q_{
m pa6}),$$
  
 $\sigma_{
m Max2} = 42194.5 + 2.91625 \cdot Q_{
m pa6},$  MПа

В соответствии со стандартом модели оценки стандартного отклонения CO=0.05%, при условии CO%≤20 – модель отличная. Благодаря оценке модели с помощью коэффициента Фишера F=3630478.00590, если существует существенная связь, надежность при F≥F001 равна 99%.

Максимальное значение напряжения  $\sigma_{max2}$  зависит от давления, приложенного к зоне прибортового массива Q от 0.001 до 100 Мпа:

$$\sigma_{{
m Max1}} = F(Q_{{
m pa6}}),$$
 $\sigma_{{
m Max1}} = -6.5007.8 + 1.94385 \cdot Q_{{
m pa6}},$ МПа

В соответствии со стандартом модели оценки стандартного отклонения CO=0.08%, при условии CO%≤20 – модель отличная. Благодаря оценке модели с помощью коэффициента Фишера F=1652002.69770, если существует существенная связь, надежность при F≥F001 равна 99%.

Максимальное значение напряжения σ<sub>мах</sub> зависит от σ<sub>мах2</sub> (желтая область), а давление, приложенное к зоне прибортового массива Q, колеблется от 0.001 до 100МПа и условия  $\sigma_{max} < \sigma_{T}$ :

$$σ_{max} = F(σ_{max2}),$$
  
 $σ_{max} = 38993.2 + 1.49810 \cdot σ_{max2}, M\Pi a$ 

В соответствии со стандартом модели оценки стандартного отклонения CO=0.14%, при условии CO%≤20 – модель отличная. Благодаря оценке модели с помощью коэффициента Фишера F= 476634.87352, если существует существенная связь, надежность при F≥F001 равна 99%.

Максимальное значение напряжения омах зависит от  $\sigma_{\text{мах1}}$  (желтая область), а давление, приложенное к зоне прибортового массива Q, колеблется от 0.001 до 100МПа и условия  $\sigma_{\text{мах}} < \sigma_{\text{T}}$ :

$$\sigma_{\text{мах}} = F(\sigma_{\text{мах1}}),$$
 $\sigma_{\text{мах}} = 2.48116 + 2.24752 \cdot \sigma_{\text{мах1}},$  МПа

В соответствии со стандартом модели оценки стандартного отклонения CO=0.08%, при условии CO%≤20 – модель отличная. Благодаря оценке модели с помощью коэффициента Фишера F= 1528056.0173, если существует существенная связь, надежность при F≥F001 равна 99%.

Максимальное значение деформации  $\varepsilon_{\text{мах}}$  зависит от давления, приложенного к зоне прибортового массива Q, колеблется от 0.001 до:

 $arepsilon_{
m Max} = F(Q_{
m pa6}),$  $arepsilon_{
m Max} = -689.927 + 6.49300 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{
m pa6}, {
m M}{
m \Pi}{
m a}.$ 

В соответствии со стандартом модели оценки стандартного отклонения CO=1.05%, при условии CO%≤20 – модель отличная. Благодаря оценке модели с помощью коэффициента Фишера F=9013.65617, если существует существенная связь, надежность при F≥F001 равна 99%.

В результате автоматической аппроксимации экспериментальных данных, полученных программой ANETR, получена следующая многофакторная математическая модель:

Величина максимальной деформации  $\varepsilon_{max}$  зависит от приложенного давления Q и максимального напряжения  $\sigma_{max}$  в диапазоне от 0.001 до 100МПа и

условия  $\sigma_{max} < \sigma_T$ :

$$\varepsilon_{\text{max}} = F(Q_{\text{pa6}}; \sigma_{\text{max}}),$$
  
$$\varepsilon_{\text{max}} = (-4.18699 \cdot 10^{-11} \cdot Q^2 + 1.38076 \cdot 10^{-2} \cdot Q + (-59675.1))$$
  
$$\cdot (-1.83992 + 0.3081 \cdot \log(\sigma_{\text{max}}))$$

В соответствии со стандартом модели оценки стандартного отклонения CO=1.05%, при условии 20<CO%≤50 – модель хорошая. Благодаря оценке модели с помощью коэффициента Фишера F=8.87722, если существует существенная связь, надежность при F≥F005 равна 99%.

Значение напряжения в области прибортового массива зависит от приложенной нагрузки Q и максимального значения напряжения омах в диапазоне Q от 0.001 до 100МПа и условия о<sub>мах</sub> < о<sub>т</sub>:

$$\sigma_{\max 2} = F(Q_{\text{pab}}; \sigma_{\max}),$$

 $\sigma_{\text{max2}} = -(54259.4 + 2.91619 \cdot Q) + (31338.2 + (-3.1341 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_{\text{max}})).$ 

В соответствии со стандартом модели оценки стандартного отклонения CO=0.05%, при условии CO%≤20 - модель отличная. Благодаря оценке модели с помощью коэффициента Фишера F=3337511.9334, если существует существенная связь, надежность при F≥F001равна 99%.

Кроме того, для обработки результатов тестирования использована программа WolframAlpha, которая позволяет обрабатывать массивы данных. Оценка надежности основана на трех критериях:

AIC – это информационный критерий Akaike, который является критерием выбора для класса параметризованных регрессионных моделей, которые оценивают модели с различным количеством параметров;

BIC – это информационный Байесовский критерий, критерий выбора модели из класса параметризованных моделей, зависит от количества параметров;

R2 - коэффициент детерминации представляет собой отношение дисперсии зависимой переменной, объясняемой рассчитанной моделью зависимости.

#### ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1 Приведены основы математического моделирования дифракционной решетки для датчиков, где показана модуляция интенсивности решетки и физикоматематическая модель параметров системы контроля оптическим сигналом с использованием датчика. Можно сделать вывод, что, когда решетки смещены на некоторую величину друг от друга, интенсивность изменится на 100%. И в то же время чувствительность к смещению и динамический диапазон регулируются вместе. Благодаря динамическому диапазону достигается сверхвысокая чувствительность. Волоконно-оптический датчик с подвижной решеткой может использоваться для измерения любого параметра, и его изменения проявляются перемещением и движением двух решеток.

2 Сформулирована основа физико-математической модели процессов преобразования внешнего светового сигнала в визуальный сигнал, позволяющий с помощью методов квантовой волновой оптики интерпретировать процесс возникновения различного рода дефектов в горных породах в следствии смещении под действием внешних нагрузок.

3 Построены выражения позволяющие выполнить расчет смещения величины интенсивности светового сигнала в деформированной породе путем анализа зависимости показатей преломления света от геометрических характеристик пород, его температуры и условия деформации.

4 Смоделирован процесс деформации на оптическое волокно. Для численного анализа и моделирования воздействия деформации на прибортовой массив был использован метод конечных элементов ANSYS STATIC STRUCTURAL. Выполнена имитация смещения оптического волокна, которое является датчиком, при изменении прибортового массива в случае образования трещины, грозящей обрушением бортов карьера.

5 Относительное удлинение волокна однозначно связано с величиной напряжения, так как кварцевое волокно подчиняется закону Гука ( $\sigma = E \cdot \varepsilon$ ) в широком интервале напряжений вплоть до разрушения. Анализ разрушения

87

материала опттического волокна с учетом циклического фактора нагрузки показал, что основными факторами развития усталостных трещин являются: амплитуда напряжений и деформации; длительность циклов нагружения.

6 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 методиках Хука-Брауна. В соответствии со стандартом модели оценки стандартного отклонения CO=0.08%, при условии CO%≤20 – модель отличная. Благодаря оценке модели с помощью коэффициента Фишера F=1652002.69770, если существует существенная связь, надежность при F≥F001 равна 99%.

## ГЛАВА З ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЛАБОРАТОР-НЫХ УСЛОВИЯХ ПО РАЗРАБОТКЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

На основании геологоразведки в районе где определяется зона исследования бортов ожидается просадок, смещение. Были случаи когда гелогоразведка не определила, но в тех местах было смещение и обрушение бортов, которые повлекли за собой материальные потери, а самое главное нарушение безопасноси труда людей, работающих на горнодобывающих предприятиях. В тех местах где во время ведения горных работ выявляется появление гипса, значит в породе есть гелогическое нарушение, которое гелогоразведка не выявила и как в этих местах на рабочих и не рабочих бортах карьера установка волоконно-оптических датчиков будет эффективной и целесообразной. Вот в чем и преимущество волоконно-оптических датчиков. Соотвественно датчик может показать те зоны, в которых есть сомнения обрушения бортов карьера горного массива. Волоконно-оптические датчики важны и нужны в зонах когда отрабатывалась способность геологических нарушений, в зонах разведочных штреков. Применение в таких местах волоконно-оптических датчиков очень важны. Например, если развед-штреки были по выходу пластов, то вот именно эти борта отслеживать волоконнооптическими датчиками будет очень удобно и самое главное безопасно. Контролировать смещение и подвижку бортов карьера именно в зонах геологических нарушениях после того как определены и работы начаты в тех местах где породы нарушены, перемяты именно установка волоконнооптических датчиков является решением отслеживания и контроля устойчивости бортов карьера.

#### 3.1 Волоконно-оптический датчик перемещения

Для практических реализаций проведенных исследований, для проверки выдвинутой научной гипотезы об использовании оптического волокна для построения комплекса контроля смещений бортов был разработан имитационный лабораторный стенд (рисунок 18).



Рисунок 18 - Общий вид имитационного лабораторного стенда.

Измерение проводится на основе метода определения дополнительных потерь в оптическом волокне при механическом воздействии которые описаны в [103]. Основой метода измерений является оценка возникающих дополнительных потерь в оптическом волокне при его деформации. Генерировались световые волны от источника когерентного оптического излучения с длиной волны 1310 или 1550 нм. В качестве источника света использован полупроводниковый лазер, подключенный стандартным телекоммуникационным патч-кордом и катушкой. Датчик имеет пластиковый корпус, с размещенными двумя роликами, один из который двигается, другой нет, а между ними расположен упругий элемент. На выходе из корпуса световая волна проходит через измерительную систему, а затем световая волна поступает в оптический ваттметр. Разработан имитационный лабораторный стенд, где использован полупроводниковый лазер модели SmartPocket OLS-34/35/36 с длинами волн 1310 или 1550 нм, подключенный стандартным телекоммуникационным патч-кордом и катушкой с оптическим кварцевым Single Mode оптическим волокном стандарта Corning SMF 9/125 мкм длиной 2,00 км. Сам датчик помещен в корпус, изготовленный из белого пластика на основе двух роликов, расположенных в корпусе отдаленных друг от друга упругим элементом. В качестве измерительного комплекса служит линейка. Измерения выполнялись оптическим ваттметром SmartPocket OLP-38, который работает в динамическом диапазоне от -60 до +26 дБ, с диапазоном длины волны 780-1650 нм.

Методы измерения включают в себя тот факт, что существует смещающееся волокно, а подсчет представляет собой измерение (линейку) по всей длине. В зависимости от удлинения потери изменяются, то есть задачей датчика является измерение дополнительных потерь в оптическом волокне при механическом воздействии на него. Источник излучения генерирует световые волны длиной 1310 нм, а измеритель оптической мощности регистрирует ослабление сигнала с дополнительными потерями. На основе этих значений выполнен пересчет, связанный со смещением, схема измерений имитационного лабораторного стенда (рисунок 19).

Полученные результаты объясняются обратной зависимостью между значениями коэффициента упругости: чем больше число витков оптического волокна, тем ниже коэффициент упругости. Были проведены эксперименты по определению дополнительных потерь мощности оптического излучения, проходящего через волоконно-оптические датчики при различном смещении. Измерение величины смещения повторяется, затем обрабатываются экспериментальные данные, и полученное значение усредняется с помощью линейки. Результаты экспериментов представлены графиком зависимости оптических потерь от значения смещений (рисунок 20).



Рисунок 19 - Схема имитационного лабораторного стенда:

1 – источник света, 2 – оптическое волокно, 3 – патч-корд, 4 – катушка, 5 – корпус датчика, 6 – неподвижный ролик, 7 – упругий элемент, 8 – подвижный ролик, 9 – измерительная система, 10 – оптический ваттметр.



Рисунок 20 - График зависимости оптических потерь от значения смещений.

Результаты экспериментов обрабатываются с учетом наименьшего значения информационного критерия Акайке, и выбирается наилучший вариант с помощью приближения второй степени, где определяется коэффициент R2=0,9796. В результате лабораторные образцы волоконно-оптических датчиков показали довольно высокую линейность, то есть изменения параметров. Кроме того, результаты показывают, что это определенно может быть датчик с высокой точностью измерений. В будущем возможно разработать датчики на основе лабораторных датчиков для контроля смещения бортов карьера. На основании результатов измерений абсолютная погрешность рассчитывается как 2,486, относительная погрешность составляет 9,702, коэффициент Стьюдента равен 2,228, а доверительный интервал равен 0,95.

Итоги экспериментов камеральных исследований доказали, что оптическое волокно может быть использована в качестве датчика, обладает хорошей линейностью и может быть использована для контроля устойчивости бортов карьера. Камеральные исследования направлены на разработку датчиков, использующих оптическое волокно, позволяющие в режиме реального времени дистанционно контролировать устойчивость борта карьера. Результаты, полученные в камеральных исследованиях, позволяют утверждать, что по сравнению с электрическими измерительными системами разработанные волоконно-оптические датчики обладают достаточно хорошей характеристической линейностью и низким энергопотреблением на расстоянии 30-50 км.

# **3.2** Предварительные исследования волоконно-оптического датчика и отработка его конструкции

Исследован волоконно-оптический датчик на основе двухлучевого волоконно-оптического интерферометра, конструкция и обработка сигналов которого упрощены. Все типы волоконно-оптических датчиков имеют определенные недостатки. Например, датчики на основе интерферометра могут иметь изменения чувствительности, и по мере расширения измерительного канала наблюдаются эффекты температурных помех и показателя преломления [104].

Предложен волоконно-оптический датчик двухлучевого интерферометра

93

Mach-Cender на основе Single Mode оптического волокна для контроля деформации (смещения) изменения чувствительности и влияния дрейфа нуля, вызванного температурными помехами [104].

Чтобы изменить чувствительность измерителя деформации, в конструкцию были внесены изменения. Оптическое волокно намотано на два полудиска и может быть изготовлено из пластика (рисунок 21).



Рисунок 21 – Схема датчика для измерения смещения и контроля роста трещин: 1 – Источник излучения с длиной волны 1310-1625 нм, 2 – оптический коннектор, 3 – оптическое волокно, 4 – подвижный полудиск, 5 – неподвижный полудиск, 6 – демпфер, 7 – подвижный ригель, 8 – точка фиксации ригеля к полудиску, 9 - корпус датчика, 10 – оптический ваттметр.

Полученные результаты объясняются обратной зависимостью между значениями коэффициента упругости: чем больше число витков оптического волокна, тем ниже коэффициент упругости. Чтобы реально протестировать схему, был создан лабораторный образец оптоволоконного датчика на основе интерферометра Mach-Cender (рисунок 22).

Все эксперименты проводились в камеральных условиях при температуре воздуха от 220С до 230С с относительной влажностью в пределах 60%. Кварцевое Single Mode волокно Corning SMF 9/125 мкм (ITU-T G.652.Стандарт D) используется в качестве оптоволоконного датчика. Оптическое волокно имеет первичное покрытие толщиной 245 микрон. В плече интерферометра установлены катушки с оптическими волокнами длиной 2,03 км и 2,01км соответственно,

соединенные с помощью стандартной перемычки длиной 20 метров, с разъемами SC с обеих сторон.



Рисунок 22 - Лабораторный образец волоконно-оптического датчика на основе интерферометра Mach-Cender

Было проведено несколько экспериментов для определения потерь мощности оптического излучения, проходящего через плечо оптоволоконного датчика, при различных значениях смещения контрольной точки. Измерение величины смещения датчика повторяется, затем обрабатываются экспериментальные данные, и полученное значение усредняется с помощью линейки, которые описаны в [104].

#### 3.3 Датчик с изменениями на основе двухплечевого интерферометра

На основе двухплечевого оптического интерферометра, являющими простыми в построении и обработке сигналов рассмотрены вололоконнооптические датчики. В ходе рассмотрения отмечено, что имеются некоторые недостатки датчиков на основе интерферометра. Другими словами, при возможном

изменении чувствительности, а также при том факте, что имеет место влияние температурных помех и изменение показателя преломления, сигнал затухает из-за дрейфа начальной фазы световой волны, распространяющейся по сердцевине оптического волокна. Этот недостаток характерен для Single Mode оптических волокон, используемых для мониторинга протяженных объектов на расстоянии 30-50 км, в то время как Multi Mode оптические волокна оказывают меньшее влияние на температурные помехи и могут работать на небольшом расстоянии 500-1000 м. Существующие недостатки двухплечевого волоконно-оптического интерферометра практически полностью исключаются решением создания имеющее программное обеспечеие с комплекса контроля алгоритмами искусственного интелекта для обработки сигналов.

Представлена схема измерения смещения при помощи волоконнооптических датчиков (рисунок 23). Волоконно-оптический датчик основан на хорошо известном интерферометре Mach-Cender [104].

Источником излучения является полупроводниковый лазер типа InGaAs, Laser launcher level CLASS IIIB, 650 nm  $\pm$ 10nm. Мощность лазера составила 20 mW. Он подключается к оптическому разветвителю с помощью телекоммуникационного патч-корда с коннектором типа SC, ферулла диаметром 2,5 мм и суперфизическим контактным разъемом для шлифования UPC Ultra Physical Contact. Луч света равномерно разделяется на две волны и распространяется вдоль двух плеч интерферометра. Использовано кварцевое Single Mode оптическое волокно стандарта G.652 (Corning, CША) диаметром 9/125 мкм. Волоконно-оптический датчик помещен в пластиковый корпус. В корпусе расположены два полудиска, диаметром 2 см. На два полудиска намотано оптическое волокно, один из которых не подвижен. Полудиск перемещаясь на оси с помощью пружины возвращается в исходное положение. Single Mode оптическое волокно фиксируется с помощью муфт. Подвижный полудиск жестко соединен с ригелем, перемещающийся в направляющей втулке. Направление перемещения ригеля с подвижным полудиском показана стрелками (рисунок 23).

96



Рисунок 23 - Схема измерения смещения при помощи волоконно-оптических датчиков:

 источник света, 2 – коннекторы, 3 – патч-корды, 4 – оптический разветвитель, 5 – компенсационная катушка, 6 - корпус датчика, 7 - муфта, 8 – плечи интерферометра, 9 – полудиск не подвижный, 10 – полудиск подвижный, 11 – пружина, 12 – ось перемещения, 13 – уплотнитель,

14,15 – реперы, 16 – исследуемый массив, 17 – трещина, 18 – ригель, 19 – фотоприемное устройство, 20 – персональный компьютер с встроенным аппаратно-программным комплексом контроля (АПКК)

В массив погружаются реперы, которые расположены по обеим сторонам раскрывая трещины. При росте трещины расстояние между закрепленными точками будут менятся соответственно ригель перемещается в параллельной плоскости массива. Когда ригель и полудиск жестко соединены с оптическим волокном и происходит механическое воздействие, их длина изменяется, и, соответственно, интенсивность излучения, падающего на поверхность фотоматрицы, также изменяется. В конце канала от двух плеч интерферометра используется разветвитель для соединения световых волн, и световые волны поступают в устройство предварительной обработки данных с фотоматрицей. Окончательная обработка данных осуществляется с помощью аппаратнопрограммного комплекса контроля, который устанавливается на персональный компьютер. Аппаратно-программный комплекс контроля работает на основе алгоритмов искусственного интеллекта. Весь физический смыл и основы связанные с изменением расстояния между точками крепления представлены в ранее опубликованной работе [105].

В ходе эксперимента был создан имитационный стенд лабораторного образца оптоволоконного датчика перемещения на основе интерферометра Mach-Cender (рисунок 24).



Рисунок 24 - Лабораторный образец:

1 – ноутбук с АПКК, 2 – источник излучения 650 нм, 3 – фотоприемное устройство, 4 – компенсационная катушка, 5 – датчик смещения, 6 – источник излучения SmartPocket OLS-34/35/36, 7 – оптический ваттметр VIAVI (JDSU) SmartPocket OLP–38

Установлено, что чем больше число витков волокна, тем меньше коэффициент упругости. Использован VIAVI SmartPocket OLS-34/35/36 лазерный источник излучения выполнен в трех вариантах, позволяющих работать на длинах волн 850, 1300, 1310, 1550 нм. Совместно с измерителем оптической мощности SmartPocket OLP-34/35/38 и благодаря встроенным опциям Auto-λ и Multi-λ, SmartPocket OLS-34/35/36 автоматически измерены вносимые потери в Single Mode оптическом волокне. Вместо фотоприемного устройства на выходе из оптического волокна установлена фотоматрица КМОП (CMOS) с графическим процессором одного измерительного канала для предварительной обработки сигналов высокого разрешения.

При приложении силы к оптическому волокну сформировалось натяжение, что привело к возникновению эффекта фотоупругости. Соответственно, чем выше значения приложенной силы, тем больше смещении подвергается оптическое волокно и тем выше значение дополнительных потерь проходящей световой волны. Волоконно-оптический датчик имеет достаточно высокую линейность и способен с высокой точностью контролировать изменение горного массива.

При проведении эксперимента использовались следующие методы. Первый метод спектрального анализа светового пятна при воздействии дополнительных потерь на оптическое волокно, которое является собственной разработкой и проходит практическую апробацию [106]. Второй метод представляет собой хорошо известный метод измерения дополнительных потерь световых волн в оптическом волокне при механическом воздействии на него. Данный метод подробно описан в работах [106], для его реализации использовался источник лазерного излучения и оптический ваттметр. Данные приборы использованы для калибровки предлагаемого ранее датчика и программно-аппаратного комплекса контроля.

Полученные экспериментальные данные обрабатывались с помощью компьютерной программы Wolfram Alpha (computational knowledge engine), построен график (рисунок 25) зависимости изменения дополнительных потерь световой волны в зависимости от приложенной силы. При помощи компьютерной программы Wolfram Alpha были получены математические выражения различных аппроксимаций.



Рисунок 25 - График зависимости оптических потерь от значения смещений репера

Результаты экспериментов обработаны с учетом наименьшего значения информационного критерия Акаике, выбран лучший вариант аппроксимацией второй степени, при которой коэффициент детерминации R2=0,982. Лабораторный образец волоконно-оптического датчика на основе интерферометра Mach-Cender показал довольно высокую линейность и точность при проведении измерений и может быть использован для контроля деформации массива после соответствующей доработки его конструкции.

#### 3.4 Волоконно-оптический датчик смещения

Для проверки выдвинутой гипотезы, которая предполагает применение одномодового оптического волокна типа G652 были использованы в качестве датчика и направляющего комплекса передачи данных. Учитывая протяженность прибортового массива, необходимо обеспечить установку волоконно-оптического датчика на значительном расстоянии от блока обработки данных. Единственным вариантом посторожить распределённую систему мониторинга с низким потреблением энергии и затуханием сигналов возможно только на основе оптического волокна. Для проверки теории был разработан лабораторный стенд (рисунок 26 и 27).



Рисунок 26 - Метод контроля изменения пикселей светового пятна

Измерения смещения производились двумя методами, для обеспечения достоверности результатов. На рисунке 26 показан метод контроля изменения пикселей светового пятна, сформировавшегося на выходе из оптического волокна и падающего на поверхность фотоматрицы. Второй метод, представлен на рисунке 27, он основан на контроле вносимых дополнительных потерь световой волн проходящей по оптическому волокну при механическом воздействии и возникновении натяжения. В первом случае в качестве источника излучения использован твердотельный лазер от визуального локатора повреждений в оптическом волокне.

Важным моментом является подбор данного источника света по параметрам когерентности излучения и его стабильности, отклонения частоты излучения более чем на 5 % приводит к сбою в работе комплекса мониторинга. Датчик с одного конца подключен к источнику света, с другого конца к фотоматрице.



Рисунок 27 – Метод на контроле вносимых дополнительных потерь световой волны

Измерения точности смещения были произведены с помощью измерительного устройства (рисунок 28), с точностью 0,1мм. Обработка данных выполняется при помощи аппаратно-программного комплекса контроля, визуализация измерений представлена графиками на экране компьютера. Второй метод использует в качестве источника оптического излучения SmartPocket OLS-34/35/36 со встроенными опциями Auto- $\lambda$  и Multi- $\lambda$ , SmartPocket OLP-38, который может автоматически измерять уровень мощности и вносимые потери в одномодовом и многомодовом оптическом кабеле (рисунок 29).

Подключение к оптическому волокну производилось через универсальный UPP 2.5 мм адаптер и оптические коннекторы типа SC. Компенсационная катушка длиной 2,01 км. На рисунках 26 и 27 приведены фотографии используемого оборудования, а также показана конструкция натяжного механизма. На экране компьютера отображено окно программы, которая может выдавать численное значение смещения элементов натяжного механизма, на которых закреплен датчик. На рисунке 30 представлена схема проведения эксперимента.



Рисунок 28 – Измерительное устройство, фиксирующее шаг смещения



Рисунок 29 - Измеритель мощности оптического излучения SmartPocket OLP-38 и источник оптического излучения SmartPocket OLP-38



Рисунок 30 – Схема проведения эксперимента:

1 – блок обработки данных с источником видимого излучения с длиной волны 650 нм (полупроводниковый лазер), 2 оптический коннектор SC, 3 – оптический разветвитель, 4 – патчкорд, 5 - волоконно-оптический датчик смещения, 6 – пружина, 7 – натяжная муфта, 8 – измеритель смещения, 9 – основание, 10 – шпилька натяжения, 11 – гайка натяжения, 12 - измеритель мощности оптического излучения, 13 - источник излучения невидимого диапазона

1550 нм, 14 – соединительный кабель USB, 15 - персональный компьютер

Смещение выполняется при помощи затяжки натяжных муфт. При смещении торцы ферул, в которые вставлено оптическое волокно расходятся на расстояние до 3 мм, при необходимости диапазон измерения можно расширить до 100 мм путем удлинения ферул. Пока имеются ограничения, связанные с параметрами используемых ферул, которыми окантованы концы оптического волокна и трубки, в которой перемещаются ферулы. Можно соединить несколько датчиков последовательно или использовать передаточный механизм, для увеличения расстояния расхождения оптического волокна. При отдалении торцов волокна друг от друга происходят изменения свойств света касающиеся интенсивности и фазы распространения, что отражается в изменении формы светового пятна. Чем дальше торцы оптического волокна расходятся друг от друга, тем больше уровень дополнительных потерь и потери оптической мощности. Все изменения фиксируются аппаратно-программным комплексом контроля и отображаются на экране.

При проведении эксперимента начальные условия составляли: сила натяжения на оптическое волокно с шагом 0,2 мм для оптического волокна с длиной волны 650, 1310, 1550 нм, внутренняя температура помещения 25°С. Интерпретация данных представлена в таблице 4.

N⁰	1310 нм		1550 нм		650 нм	
изме-	Значения	Значения	Значения	Значения	Значения	Значения
рения	смеще-	при сме-	смеще-	при сме-	смеще-	при сме-
	нии, мм	щении,	нии, мм	щении,	нии, мм	щении,
		дБ		дБ		дБ
1	0	15,08	0	13,02	0	9,06
2	0,2	18,32	0,2	15,92	0,2	10,36
3	0,4	21,56	0,4	18,82	0,4	11,56
4	0,6	24,80	0,6	21,72	0,6	12,86
5	0,8	28,04	0,8	24,62	0,8	14,06
6	1,0	31,28	1,0	27,53	1,0	15,36
7	1,2	34,52	1,2	30,43	1,2	16,56
8	1,4	37,76	1,4	33,34	1,4	17,96
9	1,6	41,02	1,6	36,24	1,6	19,06
10	1,8	44,24	1,8	39,15	1,8	20,36
11	2,0	47,48	2,0	42,05	2,0	21,56
12	2,2	50,72	2,2	44,95	2,2	22,86
13	2,4	53,96	2,4	47,86	2,4	23,96
14	2,6	54,96	2,6	50,84	2,6	25,26

Таблица 4 – Результаты эксперимента

При проведении автоматизированной аппроксимации данных для оптического волокна с длиной волны 650, 1310, 1550 нм с помощью программы Wolframalpha были получены данные (таблица 5) и график зависимости (рисунок 31) значения потерь оптического волокна с длиной волны 1310 нм при пошаговом увеличении натяжения.

При проведении автоматической аппроксимации были получены следующие результаты (таблица 5):

-1.1038 x4 + 5.12581 x3 - 7.83571 x2 + 20.6803 x + 14.5029 (quartic) -0.850962 x2 + 18.0943 x + 14.5144 (quadratic) -0.613945 x3 + 1.54342 x2 + 15.695 x + 14.9358 (cubic)

Лучше всего подходит метод наименьших квадратов.

	AIC	BIC	R2	adjusted R2
quartic	37.9755	41.8098	0.997911	0.996983
quadratic	38.2173	40.7735	0.997004	0.996459
cubic	38.7262	41.9215	0.99737	0.996581

Таблица 5 – Диагностика данных

График зависимости (рисунок 32) значения потерь оптического волокна с длиной волны 1550 нм при пошаговом увеличении натяжения и диагностика данных (таблица 6).



Рисунок 31 – Значение потерь оптического волокна с длиной волны 1310 нм при пошаговом натяжении



Рисунок 32 – Значение потерь оптического волокна с длиной волны 1550 нм при пошаговом натяжении

При проведении автоматической аппроксимации были получены следующие результаты (таблица 6):

0.843542 x4 - 4.52264 x3 + 7.67182 x2 + 10.3153 x + 12.923 (quartic) 14.587 x + 12.5269 (linear) -0.0271291 x2 + 14.6576 x + 12.4986 (quadratic) Лучше всего подходит метод наименьших квадратов.

	AIC	BIC	R2	adjusted R2
quartic	15.3288	19.1632	0.999507	0.999288
linear	16.6078	18.5249	0.999108	0.999033
quadratic	18.7981	21.3544	0.99911	0.998948

Таблица 6 – Диагностика данных

График зависимости (рисунок 33) значения потерь оптического волокна с длиной волны 650 нм при пошаговом увеличении натяжения и диагностика данных (таблица 7).



Рисунок 33 – Значение потерь оптического волокна с длиной волны 650 нм при пошаговом натяжении

При проведении автоматической аппроксимации были получены следующие результаты (таблица 7):
Лучше всего подходит метод наименьших квадратов

	AIC	BIC	R2	adjusted R2
quadratic	4.68697	7.2432	0.998262	0.997946
cubic	5.66305	8.85833	0.998422	0.997949
quartic	8.11635	11.9507	0.998425	0.997725

Таблица 7 – Диагностика данных

Как сказано ранее, проведены натурные эксперименты по смещению оптического волокна, которое приводит к возникновению определенного численного значения дополнительных потерь оптического излучения в сердцевине кварцевого волокна. Соответственно, есть возможность установить через изменение значений дополнительных потерь значение подвижки горных пород, а также установить величину смещения пород горного массива. Основным преимуществом информационно-измерительных систем на основе волоконно-оптических датчиков является их безопасность для месторождений открытым способом, опасных по внезапному обрушению бортов карьера, вспучиванию отвалов и тд. Данные комплекса обеспечивают полную искро- и пожаробезопасность, так как каналы связи и сами волоконно-оптические датчики 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 информационно-измерительных систем находится на поверхности или в безопасной зоне околоствольного двора. Протяженность измерительных каналов может достигать 30 км. Информационно-измерительный комплекс работает полностью в автоматическом режиме в течение суток и не требует остановки для проведения обслуживания. Она может быть изготовлена в различных вариантах в зависимости от реальной потребности карьера. Одним из видов может быть информационно-измерительный комплекс, основанный контроля на методе

дополнительных потерь оптического диапазона 650 – 1550 нм при помощи оптического измерителя мощности. В любом случае контроль смещения выполняется через изменение дополнительных потерь световой волны в оптическом волокне при механическом воздействии на него со стороны горных пород при его подвижке. Соответственно, с увеличением подвижки горных пород растут и дополнительные потери в оптическом волокне.

Информационно-измерительные комплексы на основе волоконно-оптических датчиков может содержать в одном модуле более 100 каналов и столько же точек измерения. Датчики смещения устанавливаются на реперах, которые закладываются в прибортовом массиве, не нарушая технологический процесс производства добычи полезных ископаемых или как-то мешать производственному персоналу при его работе. Наоборот, удаленный контроль смещения устойчивости бортов является безопасным, простым методом контроля. Важным моментом является удобство присоединения волоконно-оптических датчиков 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.

Идея функционирования информационно-измерительных систем на основе волоконно-оптических датчиков 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 650 нм, 1310 нм, 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 волоконно-оптическому датчику через оптический разветвитель для увеличения числа каналов. Между источником света в качестве направляющего комплекса используется волоконно-оптический кабель, используемый в телекоммуникации, который выполнен из одномодовых волокон, что позволяет практически без ощутимых потерь передавать сигнал на расстоянии 100 км. Основной частью волоконно-оптических датчиков 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.

Импульс частично отражается от места натяжения, возникшего при механическом воздействии на оптическое волокно, 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 оптическое волокно 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 оптического волокна 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 горной подвижки 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 информационно-измерительные комплексы контроля. Важным и наиболее наукоемким элементом информационно-измерительных систем на основе

волоконно-оптических датчиков является блок анализа и обработки данных. Обработка данных выполняется аппаратно-программным комплексом контроля с выводом информации на экран оператора. Можно увидеть численные значения, выдаваемые волоконно-оптическим датчиком в определенных точках. Также комплекс подает предупредительный сигнал в случае значительных динамических изменений давления в пластах кровли горной породы и возникновения опасности обрушения бортов. Оператор также может отследить изменение горного давления в течение суток, так как все результаты хранятся в памяти информационно-измерительных систем.

В настоящее время на карьерах Карагандинской области устойчивость бортов зависит не только от месторождения, в первую очередь устойчивость бортов карьера зависит от правильности ведения горных работ. Но в ходе разработки плана горных работ могут быть не учтены такие моменты, которые не определила геологическая разведка, топологическая съемка, предварительные наблюдения не определили эти проблемные моменты, зоны геологических разломов. На поверхности зон геологических разломов не видно, не каждая сетка бурения может это выявить, так как скважины бьются по определенной сетке. В целях экономии могут просто заверочные скважины бурить, но эти скважины могут не попасть в зону нарушения при введении вскрышных работ. Отличие различных карьеров разрезов рудников в том, что есть разрезы где применяется способ вскрыши буровзрывных работ. На данных предприятиях устойчивость бортов карьера определяется именно крепостью пород и направлением взрыва, если неправильно сделать, то естественно борт не будет «стоять». Есть разрезы, где буровзрывные работы просто невозможны или нет надобности. Так где нет надобности породы мягкие, относятся К среднеустойчивой категории, соответственно устойчивость борта будет ниже. Поэтому в любом случае ни один метод все не учтет, но конкретно в данном случае буровзрывных работ нет. В проведении горных работ ведутся определенные расчеты, закладывается определенный объем взрывчатки, но при взрыве в любой породе образуется

112

трещиноватость. Эти трещины визуально не наблюдаются и где то внутри породы они образовываются. И эта трещина будет «шевелить» во-первых само ведение горных работ, так как после бурения работы экскаватора, происходят определенные вибрации. И во-вторых это давление грунта сверху. На какой глубине образовалась трещина никто не знает и сколько она выдержит тоже никто конкретно не может знать. Вот основная проблема карьеров, разрезов в настоящее время, которая существует. Разрушение породы только определяет бурение. Но по факту наблюдения за трещинами на бортах карьера можно производить и вести контроль за поведением поверхностных трещин, от которых зависит состояние устойчивости бортов.

На основании геологоразведки в районе где определяется зона исследования бортов ожидается просадок, смещение. Были случаи когда геологоразведка не определила, но в тех местах было смещение и обрушение бортов, которые вовлекли за собой материальные потери, а самое главное нарушение безопасноси труда людей, работающих на горнодобывающих предприятиях. В тех местах где во время ведения горных работ выявляется появление гипса, значит есть в породе геологическое нарушение, которое гелогоразведка не выявила и как в этих местах на рабочих и не рабочих бортах карьера установка волоконно-оптических датчиков будет эффективной и целесообразной. Вот в чем и преимущество волоконно-оптических датчиков. Соотвественно датчик может показать те зоны, в которых есть сомнения обрушения бортов карьера горного массива. Волоконно-оптические датчики важны и нужны в зонах когда отрабатывалась способность геологических нарушений, в зонах разведочных штреков. Применение в таких местах волоконно-оптических датчиков очень важны. Например, если развед-штреки были по выходу пластов, то вот именно эти борта отслеживать волоконнооптическими датчиками будет очень удобно и самое главное безопасно. Контролировать смещение и подвижку бортов карьера именно в зонах геологических нарушениях после того как определены и работы начаты в тех

113

местах где породы нарушены, перемяты именно установка волоконнооптических датчиков является решением отслеживания и контроля устойчивости бортов карьера.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Из нескольких разработанных стендов для имитации и опытных образцов был выбран второй вариант опытного образца волоконно-оптических датчиков, измерения которых производились двумя методами: первый метод контроля изменения пикселей светового пятна, сформировавшегося на выходе из оптического волокна и падающего на поверхность фотоматрицы; второй метод основан на контроле вносимых дополнительных потерь световой волн проходящей по оптическому волокну при механическим воздействии и возникновении натяжения.

2. Использование оптического волокна в качестве датчика в комплексе с системой обработки, является весьма перспективным и позволяет дистанционно контролировать смещения наблюдая за устойчивостью бортов карьеров в режиме реального времени. Полученные результаты камеральных исследований позволяет утверждать, что разработанный волоконно-оптический датчик имеет достаточно хорошую линейность характеристик

3. Смоделированный датчик на основе оптического волокна имеет незначительную нелинейность. При натяжении сохраняется его стабильная линейная характеристика, что создает возможность использования его в качестве измерительного органа со стороны прибортового массива для контроля устойчивости бортов карьера внезапного его обрушения.

# ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДЛЯ КОНТРОЛЯ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬРА

#### 4.1 Разработка конструкции датчика и схемы соединения

В настоящий момент времени контроль смещения бортов проводится с помощью реперов, а также визуальными и инструментальными наблюдениями с участием маркшейдеров. Влияние на точность контроля оказывает человеческий фактор, также нужно учитывать внезапность изменения горного давления на определенных участках и формирования аварийно-опасных зон обрушения. Длительные наблюдения за проявлениями горного давления показали достаточно острую проблему внезапного обрушения бортов карьера, приводящую к опасности жизнедеятельности персонала, оборудования и существенным финансовым затратам. Поэтому возникает необходимость в разработке аппаратно-программного комплекса контроля устойчивости бортов карьеров с использованием волоконно-оптических датчиков, что позволит получить более достоверные данные и дистанционный мониторинг в режиме реального времени, предотвращая случаи внезапного обрушения прибортового массива.

Структурная схема разработанного волоконно-оптического датчика представлена на рисунке 34. На рисунке 35 представлены структурные схемы датчика а) в обычном положении и б) в положении, когда существует подвижка бортов. Условная поясняющая схема расположения датчика на борту карьера представлена на рисунке 36.



Рисунок 34 – Конструкция датчика:

оптическое волокно, 2 – неподвижный коннектор, 3 – подвижный коннектор, 4 – ферула,
 5 – пружина, 6 – основание, 7 – репер неподвижный, 8 – репер подвижный.



а) в начальный момент раскрытия трещины
 В начальный момент раскрытия трещины
 Рисунок 35 – Датчик в обычном и смещенном положении:

1 – оптическое волокно, 2 – неподвижный коннектор, 3 – подвижный коннектор, 4 – ферула, 5
 – пружина, 6 – основание, 7 – репер неподвижный, 8 – репер подвижный, 9 – трещина, 10 – грунт.



Рисунок 36 – Условная поясняющая схема расположения датчика на борту карьера

Чувствительность разработанного датчика в разы превышает чувствительность применяемых механических 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 0,1 мм дистанционно и непрерывно в режиме реального времени. Диапазон измерений датчика составляет 0-100 мм смещения. Порог чувствительности составляет 0,1 мм. Эффективность предлагаемого комплекса контроля заключается в том, что комплекс контроля способен контролировать начальные смещения и фиксировать начальный момент роста трещин, что важно для принятия решений по управлению устойчивостью борта карьера.

Внешний вид экспериментального образца датчика, который расположен в горизонтальном и вертикальном положении представлены на рисунках 37 и 38.

Предложенный комплекс контроля способен 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-оптического комплекса по сравнению с зарубежными аналогами, что является немаловажным фактором.



Рисунок 37 – Внешний вид экспериментального образца датчика в



горизонтальном положении

Рисунок 38 – Внешний вид экспериментального образца датчика в вертикальном

## положении

Структурная схема соединения аппаратно-программного комплекса

контроля с использованием волоконно-оптических датчиков смещения представлена на рисунке 39.



Рисунок 39 – Структурная схема соединения аппаратно-программного комплекса контроля с волоконно-оптическими датчиками:

1 – источник питания, 2 – полупроводниковы лазер,

3 – блок обработки компьютера, 4 – персональный компьютер, 5 – разветвители, 6 – фотоматрица, 7 – оптическое волокно с лазера, 8 – оптическое волокно к фотоматрице, 9 -датчики.

## 4.2 Разработка аппаратно-программного комплекса контроля

Исследование проводилось с использованием способа измерения дополнительных потерь при механическом воздействии и формировании изгиба

Способ основан на изменении свойств света, на оптическом волокне. испускаемого от источника лазерного излучения. Источник лазерного излучения предтавляет собой лазерный диод с длиной волны 650 нм мощностью 30 мВт, принцип действия которого основан на возникновении изменения заселенности в области pn-перехода во время инжекции носителей заряда. При механическом воздействии излучаемый свет имеет свойство изменения светопропускания при прохождении через оптическое волокно. В случае микроизгиба возникает влияние фотоупругости, что приводит к изменению показателя преломления между оболочкой и сердечником. В случае микроизгиба дополнительные потери, возникающие в оптическом волокне при механическом воздействии на него, увеличиваются, а также происходят изменения интенсивности световой волны и фазы ее распространения. Может преобразовывать изменение фазы в изменение амплитуды. Следовательно, во время механического воздействия на оптическое волокно наблюдаются изменения в характере световых волн, проходящих через сердцевину оптического волокна и падающих на поверхность фотоприемника, в котором регистрируются все изменения. Роль фотоприемника на выходе оптического волокна исполняет фотоэлектрическая матрица КМОП (CMOS) с графическим процессором измерительного канала для предварительной обработки сигналов высокого разрешения. На конце оптического волокна установлен оптоволоконный соединитель типа SC с наконечником диаметром 2,5 мм, а также установлен физический контактный разъем UPC Ultra. Это позволяет формировать более четкие пятна света в отличие от ситуации при резке оптических волокон ножом. В процессе настройки определяется фокусное расстояние между концом разъема и поверхностью фотоматрицы. Эта настройка позволяет аппаратно-программному комплексу контроля записывать все изменения светового пятна при воздействии на оптическое волокно.

Аппаратно-программный комплекс контроля (АПКК) разработан используя элементы библиотеки OpenCV (Open Source Computer Vision Library) [107]. OpenCV - эта библиотека компьютерного зрения с открытым исходным

кодом. Эта библиотека алгоритмов теории и технологии создания машин, которые могут производить обнаружение, отслеживание и классификацию объектов. OpenCV реализована на основании компилируемых статистически типизированных языках программирования, в данном комплексе используется версия для языка Python [108]. Генерация и отображение графиков производится в библиотеке Matplotlib [109] на языке программирования Python для визуализации данных с использованием двумерной (2D) графики (также поддерживается 3D-графика). Сгенерированное изображение может быть использовано в качестве иллюстрации в публикации. Интерфейс был реализован с помощью библиотеки Tkinter. Tkinter - кросс-платформенная событийно-ориентированная графическая библиотека на основе средств Tk [110], входит в стандартную библиотеку Python [108].

Интерфейс программы представляет собой главное окно (рисунок 40), предоставляющий 1) блок запуска в фоне, 2) блок настройки камер, 3) блок мониторинга активности, 4) - блок индикаторов состояния и сигналов, 5) – кнопка сохранения настроек «Применить.



Рисунок 40 – Главное окно интерфейса АПКК

В блоке кнопка «Запуск в фоне», запускает программу в нормальном режиме (рисунок 41). При запуске программы, берется эталонное изображение для сравнения всех следующих с ним для измерения изменений.

В блоке кнопка «Стоп» – остановка программы (рисунок 41).

1	запуск в фоне	Стоп
---	---------------	------

Рисунок 41 – Блок запуска в фоне и стоп

В блоке настройки камер существует четыре вкладки, для настройки каждого канала отдельно, в каждой вкладке имеется шесть полей ввода параметров и две функциональные кнопки, кроме того дополнительно имеется вкладка «Параметры», где задается единица измерения цифровых значений, а также кнопка сохранения настроек «Применить» (рисунок 42). Кнопка «Применить» изменяет значения переменных и сохраняет их в файл «config.ini» который всегда должен находится в той же папке что и программа, при ее запуске все значения загружаются из этого файла. Кнопку «Применить» можно использовать при работающей программе, без остановки, для изменения параметров и чувствительности в реальном времени.



Рисунок 42 – Кнопка «Применить» для изменения и сохранения

В блоке настройки камеры, поля параметров обозначают (рисунок 43):

1 -Количество кадров с камеры, которое будет усредненно в одно изображение, применяется для снижения шумов камеры. Увеличение значения так же увеличивает время реакции детектирования. В среднем камера снимает 30 кадров в секунду. Например, при значении этого параметра равным 10 займет 10/30 = 1/3 = 0.33 секунды на каждое получение изображения. При изменении этого параметра в момент работы программы необходимо перезапустить программу (нажать стоп и запустить повторно). Прямо влияет на чувствительность детекции

и время реакции.

10	сколько брать кадров в одно среднее значение (картинку)	
15	количество средних показаний(картинок) за период	
15	ПОРОГ с какой яркости пиксели будут белыми от 0 до 255	
3	количество движений подряд до срабатывания	
5000	значение порога чувствительности регистрации движений	
2000	увелечения порога чувствительности	
	Настройки камеры запуск камеры в режиме отладки	

Рисунок 43 – Блок настройки камеры

2 – Количество изображений (измерений значений) за один период детекции. Служит для построения графиков скорости изменения и величин значений (белых пикселей) и указания периода – раз в сколько изображений (измерений значений) выявлять движение. Минимальное значение = 2.

3 – Пороговое значение цвета пикселя в градациях серого (от 0 до 255), при котором произойдет срабатывание (превращение его в белый) для подсчета. 0 = черный, 255 = белый, 1-254 = оттенки серого. Прямо влияет на чувствительность детекции.

4 - Количество срабатываний (детекции движения) подряд до сигнала ТРЕ-ВОГИ.

5 - Значение порога срабатывания детекции движения (количество белых пикселей) при превышении которого будет зарегистрировано движение.

6. Значение увеличения порога чувствительности на величину N, при регистрации движений подряд. При отсутствии движения значение будет сброшено к исходному значению из поля 6.

В блоке настройки камеры имеется вкладка «Параметры» где задаются единицы измерений показаний.

В блоке настройки камеры в каждой вкладке «Камера» имеются функциональные кнопки: 1) «Настройки камеры».

2) «Запуск в режиме отладки»

При нажатии кнопки «Настройки камеры» - открывается браузер с IPадресом текущего канала для настройки IP-камеры в веб-интерфейсе, для наладки аппаратных характеристик матрицы (рисунок 44).



Рисунок 44 – Веб-интерфейс настроек камер

В вкладке «Picture» производится настройка параметров картинки светового пятна: яркости, контрастность, цветность, резкость, гамма, отражения, вращения (рисунок 45).

Picture	Stein Standard	
Exposure	Brichtness	
Backlight	Contrast	
WB	Saturation	
Day & Night	Sharmoness	
Illuminator	Gamma C	
	Mirra C. C. C. O.	
	Mirror O On O On	
	Flip 0*	~

Рисунок 45 - Вкладка «Picture»

В вкладке «Exposure» производится настройка параметров экспозиции,

	Profile	Day	~
<ul> <li>Picture</li> <li>Exposure</li> <li>Backlight</li> <li>WB</li> <li>Day &amp; Night</li> <li>Illuminator</li> </ul>	Anti-Ilicker Mode Shutter Gain SD NR	Oundoor Manuæ 1/500 0 – 50 0 e 0	√ √ √ 0 (0=100)

выбирается режим работы затвора (рисунок 46).

Рисунок 46 – Вкладка «Exposure»

При нажатии кнопки «Запуск в режиме отладки» - запускается режим наладки. Окно режима отладки в состоянии покоя (рисунок 47), представляет собой стандартное окно.



Рисунок 47 – Окно режима отладки в состоянии покоя

Запуск в режиме отладки запускает программу в режиме показа поступающих и обрабатываемых данных (рисунок 48), состоящих из трех окон:

Первое окно показывает разницу между эталоном и текущим изображением;

Второе окно показывает сколько пикселей (серых точек) сработало – превысило пороговое значение и перешло в белые пиксели;

Третье окно показывает графики. Верхний график 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.



Рисунок 48 – Режим показа поступающих и обрабатываемых данных

Для остановки программы в режиме отладки, достаточно закрыть окно режима отладки.

В блоке мониторинга активности показаны цифровые значения, соответственно для каждой камеры. Ведутся записи логов по времени и движения за текущий запуск на жесткий диск (рисунок 49).

<sup>3</sup>2,457px 1,151px 64px 7,445px

Рисунок 49 – Блок мониторинга активности

Блок индикаторов состояния и сигналов в выключенном положении (рисунок 50).



Рисунок 50 – Блок индикаторов состояния и сигналов в выключенном положе-

НИИ

При запуске программы активным становится зеленый индикатор, указывающий на работу программы (рисунок 51). При срабатывании сигнала движения активным становится желтый индикатор. При тревоге активным становится красный индикатор.



Рисунок 51 – Режим работы в включенном положении

Все блоки предоставляют полную информацию об изменениях абсолютных и скоростных изменений пятна в режиме реального времени с сохранением времени срабатывания сигналов, возможностью полной настройки с мгновенным применением параметров.

4.5 Практическая апробация аппаратно-программного комплекса контроля с использованием волоконно-оптического датчика в условиях предприятий

Разработанный аппаратно-программный комплекс контроля устойчивости бортов карьеров с использованием волоконно-оптических был представлен на заседании технологической службы ТОО «Акжарык Комир» и подтвержден протоколом, актом внедрения в ТОО «Научно-технический центр «Альтернатива»», которые представлены в приложениях Б.

На разрезе ТОО «Акжарык Комир» ранее были выявлены нарушения, влияющие на устойчивость карьерных откосов (рисунок 52-57). Нарушение состояния устойчивости северного борта карьера обусловлено наличием деформаций группы бортов (рисунок 52) в районе выходов угольных пластов под наносы, где в данный момент ведутся добычные работы.

Участок 1, общий вид которого представлен на рисунке 55 расположен между горизонтами (гор. +553/+525м). Деформация по фронту составляет 51м. Участок 2 располагается между горизонтами (гор. +553/+541м). Деформация по фронту составляет 43м (рисунок 56).



Рисунок 52 – Деформации на северном борту разреза



Рисунок 53 – Деформация восточного борта карьера (гор. +555/+506м)

Устойчивость бортов зависит не только от месторождения, в первую

очередь устойчивость бортов карьера зависит от правильности ведения горных работ. Но в ходе разработки плана горных работ могут быть не учтены такие моменты, которые не определила геологическая разведка, топологическая съемка, предварительные наблюдения не определили эти проблемные моменты, зоны геологических разломов. На поверхности зон геологических разломов не видно, не каждая сетка бурения может это выявить, так как скважины бьются по определенной сетке. В целях экономии могут просто заверочные скважины бурить, но эти скважины могут не попасть в зону нарушения при введении вскрышных работ. Отличие различных карьеров, разрезов, рудников в том, что есть разрезы где применяется способ вскрыши буровзрывных работ. На данных предприятиях устойчивость бортов карьера определяется именно крепостью пород и направлением взрыва, если неправильно сделать, то естественно борт не будет «стоять».



Рисунок 54 - Деформация южного борта карьера (гор. +551/+534м)

Есть разрезы, где буровзрывные работы просто невозможны или нет надобности. Так где нет надобности, породы мягкие, относятся к

среднеустойчивой категории, соответственно устойчивость борта будет ниже. Поэтому в любом случае ни один метод все не учтет, но конретно в данном случае буровзрывных работ нет. В проведении горных работ ведутся определенные расчеты, закладывается определенный объем взрывчатки, но при взрыве в любой породе образуется трещиноватость. Эти трещины визуально не наблюдаются и где то внутри породы они образовываются. И эту трещину будет шевелить во-первых само ведение горных работ, так как после бурения работы экскаватора, происходят определенные вибрации. И во-вторых это давление грунта сверху. На какой глубине образовалась трещина никто не знает и сколько она выдержит тоже никто конкретно не может знать. Вот основная проблема карьеров, разрезов в настоящее время, которая существует. Разрушение породы только определяет бурение. Но по факту наблюдения за трещинами на бортах карьера можно производить и вести контроль за поведением поверхностных трещин, от которых зависит состояние устойчивости бортов.



Рисунок 55 – Деформация северного борта карьера (гор. +553/+525м)

Анализ показал, что угол наклона деформированных групп уступов в результате выполаживания по 1 участку составил 18°. Угол наклона

131

деформированных групп уступов в результате выполаживания по 2 участку составил 23°.

Нарушение состояния устойчивости восточного борта обусловлено наличием деформаций группы уступов (гор. +555/+506м) (рисунок 53). Деформация данного участка по фронту достигает 95м. Угол наклона деформированных групп уступов в результате выполаживания по 3 участку составил 37°.



Рисунок 56 – Деформация северного борта карьера (гор. +553/+541м)

Нарушение состояния устойчивости южного борта обусловлено наличием деформаций группы уступов (гор. +551/+534м) (рисунок 54). Угол наклона деформированных групп уступов в результате выполаживания по 4 участку составил 43°.

В южной части карьера ТОО «Акжарык Комир» производится формирование внутреннего отвала. В результате оседаний свежеотсыпанной горной массы на поверхности проявляются раскрытия трещин размером 15-20см (рисунок 57).

Для того чтобы полно и объективно установить механизм деформирования бортов карьера и разработать мероприятия по проведению контроля, следует на проблемных участках, где происходят деформационные процессы, заложить контрольные станции за состоянием устойчивости бортов карьера ТОО «Акжарык Комир». Схема расположения контрольных станций, состоящих из реперов с датчиками выбрана на основании анализа состояния прибортовых массивов разреза и откосов отвала, современного состояния горных работ и перспективы их дальнейшего развития.

На разрезе в наиболее вероятных местах возникновения деформаций в виде подвижек и смещения рекомендуется заложить ряд контрольных станций, но в целях подтверждения теоретических исследований и проведения экспериментов в качестве образца рекомендовано заложить одну контрольную станцию с использованием четырех волоконно-оптических датчиков за состоянием контроля устойчивости бортов наблюдая смещения и подвижки пород.



Рисунок 57 – Раскрытие трещин (Южная часть карьера)

Для апробации аппаратно-программного комплекса контроля устойчивости бортов карьера с использованием волоконно-оптического датчика принято установить реперы на контрольной станции I (северный борт разреза (гор. +553/+541м)) (рисунок 56). В комплекс контроля и мониторинга входит 1 контрольная станция, состоящая из 4 реперов с датчиками. Фактором, объединяющим контрольные станции в единую систему контроля мониторинга, является то, что плановое и высотное положение реперов станций определяется в единой системе аппаратно-программного комплекса на карьере.

Места закладки лабораторных образцов реперов с датчиками и процесс настройки аппаратно-программного комплекса контроля на карьере показан на рисунках 58 и 59.



Рисунок 58 – Места закладки репера с датчиком

На основании анализа современного состояния и перспективы развития горных работ на карьере ТОО «Акжарык Комир» предусматривается два этапа создания сети контрольных станций: 1 - текущий, соответствующий современному состоянию горных работ; 2 - перспективный, соответствующий наблюдениям за бортами разреза и ярусов отвалов при постановке их на проектный (конец отработки) контур.

При развитии горных работ предусматривается производить реконструкцию старых наблюдательных станций и закладку новых реперов в рабочей части разреза при неизменном положении исходных и опорных реперов, наблюдательных и контрольных пунктов датчиками на основе оптического волокна.

При любом механическом воздействии на датчик происходят изменения свойств света, проходящего по датчику, возникают дополнительные потери и изменение фазы световой волны, что и фиксирует фотоприемник. Далее микропроцессорное устройство производит анализ полученных данных и выдает решение о срабатывании комплекса. Важным моментом является разработка программного обеспечения, позволяющего эффективно бороться с помехами.



Рисунок 59 - Процесс настройки аппаратно-программного комплекса контроля

Разработанная принципиальная схема и аппаратно-программный комплекс контроля с использованием волоконно-оптических датчиков доказали свою работоспособность. Новый метод контроля является полностью взрывобезопасным и пригоден для использования в опасных горных предприятиях по внезапному обрушения бортов карьера.

# ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

По проведенным теоретическим и натурным исследованиям можно

заключить следующее:

1. На примере ТОО «Акжарык Комир» представлено геологическое строение разреза, горно-геологические и инженерно-геологические условия, гидрогеологическая характеристика, а также анализ нарушений устойчивости бортов карьера. Анализ мониторинга устойчивости бортов карьера, показал, что в настоящее время устойчивое состояние бортов карьера является одной из основных проблем при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом.

2. Результаты практического применения разработанного аппаратно-программного комплекса контроля показали, что при использовании увеличения длины волны от 650 нм до 1625 нм дополнительные потери возрастают. В связи с этим рекомендуется использовать оптическое волокно с длиной волны 1310 нм. Разработанное программное обеспечение обеспечивает многоканальную обработку данных, полученных от волоконно-оптических датчиков.

3. Разработанный аппаратно-программный комплекс контроля устойчивости бортов карьеров с использованием волоконно-оптических датчиков позволяет контролировать дистанционно смещение прибортового массива. По результатам практического применения рекомендуется использовать оптическое волокно с длиной волны 1310 нм.

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

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа представляет собой завершенную работу, в которой содержится новое решение актуальной научной и практической задачи – контроль за состоянием устойчивости бортов карьера с целью повышения безопасности и эффективности эксплуатации угольных разрезов в условиях повышенной опасности по внезапному обрушению бортов карьеров.

Основные научные и практические результаты научно-квалификационной работы заключаются в следующем:

1. Проведен анализ краткой горно-геологической характеристики месторождений полезных ископаемых, который показал, что открытые разработки по глубине карьеров на некоторых месторождениях достигают до 400-600 м, а некоторые в пределах от 100-300 м. С ростом глубины карьера растет и срок службы бортов карьера. Все открытые разработки характеризуются наличием карьеров с огромным сроком службы, которые превышают 60-летний рубеж и более, когда в среднем расчетный проектный срок колеблется в пределах от 20 до 30 лет. В связи с ростом глубины карьера, как правило ухудшаются геотехнические и геомеханические параметры устойчивости бортов карьеров.

2. Анализ существующих методов контроля устойчивости бортов карьера выявил достоинства и недостатки каждого метода. Определил, что в настоящее время развитие карьеров характеризуется усовершенствованием новых процессов и приобретением новых средств, новейших технологических решений при добыче месторождений полезных ископаемых для безопасной и бесперебойной работы в горнодобывающей промышленности. Масштабы горных предприятий требуют постоянного контроля за происходящими геотехническими, геомеханическими процессами устойчивости бортов карьеров в период эксплуатации. В связи с этим карьеры должны быть снабжены автоматизированным комплексом контроля дистанционного управления устойчивости бортов карьеров для обеспечения безопасной работы на горнодобывающих предприятиях. 3. Выполнен обзор волоконно-оптических датчиков, их применение, а также выявлены преимущества по сравнению с традиционными датчиками. Анализ показал, 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. Приведены основы математического моделирования дифракционной решетки для датчиков, где показана модуляция интенсивности решетки и физикоматематическая модель параметров системы контроля оптическим сигналом с использованием датчика. Можно сделать вывод, что 100% изменение интенсивности будет тогда, когда решетки сдвинуты друг от друга на величину а(ξ). А при этом чувствительность к смещению и динамический диапазон регулируются вместе. Сверхвысокая чувствительность получается за счет динамического диапазона. Волоконно-оптические датчики с подвижными решетками могут применяться для измерения любого параметра, изменение которых проявляттся через движение и перемещение двух решеток.

5. Сформулирована основа физико-математической модели процессов преобразования внешнего светового сигнала в визуальный сигнал, позволяющий с помощью методов квантовой волновой оптики интерпретировать процесс возникновения различного рода дефектов в горных породах в следствии смещении под действием внешних нагрузок.

6. Построены выражения позволяющие выполнить расчет смещения величины интенсивности светового сигнала в деформированной породе путем анализа зависимости показателей преломления света от геометрических характеристик пород, его температуры и условия деформации.

7. Приведен процесс моделирования деформации на оптическое волокно. Для численного анализа и моделирования воздействия деформации на прибортовой массив был использован метод конечных элементов ANSYS STATIC STRUCTURAL. Выполнена имитация смещения оптического волокна, которое

138

является датчиком, при изменении прибортового массива в случае образования трещины, грозящей обрушением бортов карьера.

8. Были разработаны два метода контроля: первый метод контроля изменения пикселей светового пятна, сформировавшегося на выходе из оптического волокна и падающего на поверхность фотоматрицы; второй метод основан на контроле вносимых дополнительных потерь световых волн проходящей по оптическому волокну при механическом воздействии и возникновении натяжения.

9. Использование оптического волокна в качестве датчика в комплексе с системой обработки, является весьма перспективным и позволяет дистанционно контролировать смещения, наблюдая за устойчивостью бортов карьеров в режиме реального времени. Полученные результаты лабораторных исследований позволяет утверждать, что разработанный волоконно-оптический датчик имеет достаточно хорошую линейность характеристик.

10. Смоделированный датчик на основе оптического волокна имеет незначительную нелинейность. При натяжении сохраняется его стабильная линейная характеристика, что создает возможность использования его в качестве измерительного органа со стороны прибортового массива для контроля устойчивости бортов карьера внезапного его обрушения.

11. На примере ТОО «Акжарык Комир» представлено геологическое строение разреза, представлены горно-геологические и инженерно-геологические условия, гидрогеологическая характеристика, а также анализ нарушений устойчивости бортов карьера. Анализ мониторинга устойчивости бортов карьера, показал, что в настоящее время устойчивое состояние бортов карьера является одной из основных проблем при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом.

12. Результаты практического применения разработанного аппаратно-программного комплекса контроля показали, что при использовании увеличения длины волны от 650 нм до 1625 нм дополнительные потери возрастают. В связи с этим рекомендуется использовать оптическое волокно с длиной волны 1310 нм.

139

Разработанное программное обеспечение обеспечивает многоканальную обработку данных, полученных от волоконно-оптических датчиков.

13. Разработанный аппаратно-программный комплекс контроля устойчивости бортов карьеров с использованием волоконно-оптических датчиков позволяет контролировать дистанционно смещение прибортового массива. По результатам практического применения рекомендуется использовать оптическое волокно с длиной волны 1310 нм

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

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1 Низаметдинов Ф.К., Ожигин С.Г., Ожигина С.Б., Долгоносов В.Н., Радей К., Станькова Г. Мониторинг состояния откосов уступов и бортов карьеров // Монография. Научно-исследовательский геодезический, топографический и картографический институт, пгт. Здибы, Чешская Республика Здибы, 2015. – 350 с.

2. Попов В.Н., Шпаков П.С., Юнаков Ю.Л. Управление устойчивостью карьерных откосов. М.: МГГУ, «Горная книга», 2008. - 683 с.

3. Руководство по проектированию бортов карьера, под редакцией: Джон Рид, Питер Стейси. Пер. с англ. – Екатеринбург, Правовед, 2015 – 544 с.

4. Галустьян Э.Л. Управление геомеханическими процессами на карьерах.- М.: Недра, 1980. - 237 с

5. Попов И.И., Окатов Р.П., Низаметдинов Ф.К. Механика скальных массивов и устойчивость карьерных откосов. - Алма-Ата: 1986. – 256 с.

6. Имашев А., Немова Н., Рахимбекова Г., Рабатулы М., Закиров Р., Курманбаев А. Исследование трещиноватости горных пород законтурной части массива // XVI Международная научно-практическая интернет-конференция «Проблемы и перспективы развития науки в начале третьего тысячелетия в странах СНГ». - Переяслав-Хмельницкий, 2013. - С. 29-32

7. Корнилов Ю.Н., Буркова Т.В., Волкова Ю.Ю. Определение элементов внутреннего ориентирования цифровых снимков // Записки горного института. - 2004.- №156. - С. 229-231.

8. Викторов С.Д., Казаков Н.Н., Шляпин А.В., Добрынин И.А. Определение грансостава по фотопланиграммам с использованием компьютерной программы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. - Отд.вып. №8, Взрывное дело. - С. 169-173.

9. Мечников О.С. Стереофоточисловой метод оценки кусковатости взорванной горной массы на карьере// ГИАБ. -2005. - №4. - С. 156-162. 10. Тапсиев А.П., Усков В.А. Фотодокументация систем трещин в породном массиве// VIII Международный научный конгресс «ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2012». - Новосибирск: СГГА, 2012. - Т-2, № 1.- С.156-160.

11. Игнатенко И.М., Яницкий Е.Б., Зайцев М.С. Методика оценки блочности пород в уступах карьера и кусковатости взорванной горной массы с применением компьютерных технологий//Известия Тульского государственного университета. Науки о земле, ТулГУ.- 2011. - № 1. - С. 112-118.

12. Рождественский В. Н., Панжин А. А., Пьянзин С. Р., Кочнев К. А. Исследование трещиноватости локальных массивов с помощью средств наземного лазерного сканирования// Известия вузов. Горный журнал. - 2014. - №5. - С. 75-79.

13. Иванов Л.В., Горбонос М. Г., Коньшин Б. Ф. Разработка алгоритма сегментации изображения для автоматизированной экспресс-оценки блочности горного массива// Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2010. - Отд. вып. №5. – С. 112-120

14. Гапий А.В., Ожигин Д.С. Определение зоны деформирования горного массива при производстве буровзрывных работ // XVII Междунар. науч. Симпоз. имени академ. М.А. Усова студен. и мол. ученых «Проблемы геологии и освоения недр». - Томск: ТПУ, 2013.- С.308 – 310.

15. Методические указания по изучению выветривания и осыпания пород в откосах угольных разрезов. – Л.: ВНИМИ. -1972.

16. ВНИМИ. Инструкция по наблюдению за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. - Л., 1971. - 187с

17. Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. – Астана: Комитет по государственному контролю за чрезвычайными ситуациями и промышленной безопасностью РК, 2008, - 109 с.

18. Е.А. Несмашный, Г.И. Ткаченко, А.В. Болотников. Обзор технологий и

технических средств для геомеханического мониторинга состояния бортов карьеров и отвалов. Разработка рудных месторождений. Выпуск 93, 2010

19. Низаметдинов Ф.К., Ожигин С.Г., ОжигинаС.Б., Ожигин Д.С. Мониторинг устойчивости бортов карьеров Казахстана // Маркшейдерский вестник. – 2013. – № 3(95). – С. 19–23.

20. Низаметдинов Р.Ф., Низаметдинов Н.Ф., Ожигин Д. С. Геомеханическое обеспечение устойчивости карьерных откосов Казахстана // Труды университета, КарГТУ. - Караганда, 2013. - № 4. - С. 38-42.

21. Ожигин С.Г., Низаметдинов Ф.К., Ожигина С.Б., Ожигин Д.С. Маркшейдерское обеспечение состояния устойчивости прибортовых массивов карьеров Казахстана // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe». – 2016. - С.74-80

22. Касымканова Х.М., Кыргизбаева Г.М. и др. Методика контроля и прогноза устойчивости бортов карьера //Горный журнал Казахстана, 2006. - №7. - С. 10-12.

23. Ожигина С.Б., Урдубаев Р.А., Ожигин Д.С., Ожигин С.Г. Мониторинг состояния бортов глубоких карьеров АО «ССГПО» // ХІ Междунар. выст. и науч. конгр. «Интерэкспо Гео-сибирь-2015». - Новосибирск: СГГА, 2015.- С. 210 - 215.

24. Ожигина С.Б., Сашурин А.Д., Ожигин С. Г., Кулыгин Д.А. Мониторинг состояния устойчивости карьерных откосов // XII Междунар. выст. и науч. конгр. «Интерэкспо Гео-сибирь-2016».- Новосибирск: СГУГиТ, 2016. - С. 163 - 168.

25. Ожигина С.Б., Жумабеков Т.А., Сиренко Г.В., Ожигин Д. С. Создание пространственной модели прибортового массива карьера при помощи ГИС ArcGIS // XII Междунар. выст. и науч. конгр. «Интерэкспо Гео-сибирь-2016». - Новосибирск: СГУГиТ, 2016. - С. 130 - 135.

26. Горохов Д.А., Ожигин Д. С., Ожигина С.Б., Дорош Н.А., Кулыгин Д.А., Воробъева Ю.Б. Инструментальные наблюдения за деформациями техногенных

объектов// XIII Междунар. выст. и науч. конгр. «Интерэкспо Гео- сибирь-2017». - Новосибирск: СГУГиТ, 2017. - С.135 - 139.

27. Nizametdinov, F., Yavorskiy, V., Ozhigin, D. The approaches to the problem of stabilization of the quarry boards // Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems – Tomsk 2014

28. Низаметдинов Ф.К., Ожигин С.Г., Ожигина С.Б., Долгоносов В.Н. и др. Устойчивость карьерных откосов /под. ред. Ф.К. Низаметдинова. - Караганда: КарГТУ, 2014. - 348 с.

29. Ожигин С.Г., Низаметдинов Ф.К., Шпаков П.С., Ожигина С.Б. Обеспечение устойчивости прибортовых массивов карьеров Казахстана. - Караганда: Казахстанско-Российский университет, 2014. - 307 с

30. Мозер Д.В., Ожигин С.Г., Долгоносова Е.В., Ожигин Д.С. Исследование деформаций прибортового массива Соколовского карьера с применением глобальных навигационных систем // Труды университета, КарГТУ. - Караганда, 2011. - № 1(42). - С. 47- 50.

31. Долгоносов В.Н., Шпаков П.С., Низаметдинов Ф.К., Ожигин С.Г., Ожигина С.Б., Старостина О.В. Аналитические способы расчета устойчивости карьерных откосов. - Караганда: «Санат-Полиграфия», 2009. - 332 с.

32. Ожигин С.Г., Низаметдинов Ф.К., Ожигина С.Б., Ожигин Д.С. Инновационные методы мониторинга состояния устойчивости горных пород и земной поверхности // X Междунар. выст. и науч. конгр. «Интерэкспо Гео-сибирь-2014». - Новосибирск: СГГА, 2014.- С.104 – 109

33. Лютак А. И. Технология создания цифровых моделей карьеров с применением лазерных сканеров // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. - 2014. - № 1. - С. 386–388.

34. Середович В.А., Комиссаров А.В., Комиссаров Д.В., Широкова Т.А. Наземное лазерное сканирование. - Новосибирск: СГГА, 2009. – 261

35. Barbarella M., Fiani M. Monitoring of large landslind es by Terrestrial Laser Scanning techniques: field data collection and processing // European Journal of Re-
mote Sensing. - 2013. -Vol. 46.- P. 126-151.

36. Bin Liang, Chong Yue, Xu Hui Chen, Bing Wang, Xing Kai Sun. The Study of De- formation Monitoring Based on the Ground Three-Dimensional Laser Scanning Technology // Advanced Materials Research. - 2014. - Vol. 1022. - P.387-391.

37. Котельников С. И. Применение технологии лазерного сканирования для мониторинга нефтеналивных резервуаров// Маркшейдерский вестник. - 2016. - № 2.- С. 36-40.

38. Карташов Ю.М., Матвеев Б.В., Михеев Г.В. и др. Прочность и деформируемость горных пород. - М.:Недра, 1979. - 269с.

39. Низаметдинов Ф.К., Ожигина С.Б., Омарова А.С., Ожигин Д. С. Применения технологии лазерного сканирования горного массива на карьерах АО «ССГПО»// Труды университета, КарГТУ. - Караганда, 2011. - № 1(42). - С. 40-42.

40. Ozhigina S. B., Mozer D. V., Ozhigin S. G., Ozhigin D. S., Bessimbayeva O. G., Khmyrova E. N. Monitoring of the undermined territories of Karaganda coal basin on the basis of satellite radar interferometry//XXIII ISPRS Congress 2016 (Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., III-6, 37-40, doi:10.5194/isprs- annals-III-6-37-2016). - Prague: Congress Hall, 2016.

41. Е.А. Несмашный, Г.И. Ткаченко, А.В. Болотников. Обзор технологий и технических средств для геомеханического мониторинга состояния бортов карьеров и отвалов. Разработка рудных месторождений. Выпуск 93, 2010

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

43. 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.

44. 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 c.

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

46. 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.

47. 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.

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

49. 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.

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

51. Гроднев, И.И. Оптические кабели: конструкции, характеристики, производство и применение / И.И. Гроднев, Ю.Т. Ларин, И.И. Теумин. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 176 с.

52. 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.

53. 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.

54. 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.

55. 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.

56. 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.

57. Чотчаев, Х. О. Контроль напряженно-деформированного состояния горного массива звукометрическими и геофизическими методам / Х. О. Чотчаев // Геология и геофизика юга России. — 2016. — № 3. — С. 129-140.

58. Буймистрюк, Г. Я. Принципы построения интеллектуальных волоконно-оптических датчиков / Г. Я. Буймистрюк // Фотон-Экспресс. — 2011. — № 6 (43). — С. 38-39.

59. Дмитриев, С. А. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и перспективы / С. А. Дмитриев, Н. Н. Слепов. — М.: ООО «Волоконнооптическая техника», 2005. — 576 с.

60. Пат. На полезную модель РК 5045. Волоконно-оптический датчик давления / Мехтиев А.Д., Мехтиев Р.А, Алькина А.Д., Нешина Е.Г., Мади П.Ш., Ковтун А.А.; заявл. 05.12.2019; опубл. 12.06.2020

61. 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.

62. 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.

63. 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.

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

65. 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.

66. 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.

67. 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.

68. 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.

69. Мехтиев, А.Д. Краткий сравнительный анализ эффективности использование 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. — Р. 27-31.

70. Liu X, Wang C, Liu T, Wei Y, Lv J 2009 Fiber Grating Water pressure sensor and system for mine. *ACTA Photonica Sinica* V.38 pp.112–114

71. Kumar Atul, Kumar Dheeraj, Singh U., Gupta P S., Shankar Gauri 2011 Optimizing fibre optics for coal mine automation International Journal of Control and Automation V.3 pp.63–70

72. Naruse H, Uehara H, Deguchi T, Fujihashi K, Onishi M, Espinoza R, Pinto M 2007 Application of a distributed fibre optic strain sensing system to monitoring

changes in the state of an underground mine *Measurement Science and Technology* V.18(10) pp.3202-3210. doi: 10.1088/0957-0233/18/10/S23

73. Yiming Zhao, Nong Zhang and Guangyao Si 2016 A Fiber Bragg Grating-Based Monitoring System for Roof Safety Control in Underground Coal Mining *Journal List Sensors (Basel)* V16(10) 1759 doi: 10.3390/s16101759

74. Tao Hu, Gongyu Hou and Zixiang Li 2020 The Field Monitoring Experiment of the Roof Strata Movement in Coal Mining Based on DFOS *Sensors 20*(5) 1318 (This article belongs to the Special Issue Optical Fiber Sensors and Photonic Devices) doi: 10.3390/s20051318

75. Chiara Of Lanciano, Riccardo Salvini 2020 Monitoring of deformation and temperature in a career with the help of distributed fiber-optic Brillouin sensors Earth and physical Sciences and CGT Geotechnology Center, Department of environment, University of Siena, Via Vetri Vecchi 34, 52027 San Giovanni Valdarno (AR), Italy 20 (7), 1924; doi.org/10.3390/s20071924

76. https://i-sensor.ru/

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

78. 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.

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

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

81. 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.

82. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и

научных работников. Под ред. Э. Удда Москва: Техносфера, 2008. - 520 с. ISBN 978-5-94836-191-8

83. Мади, П. Ш. Основы математического моделирования дифракционной решетки для датчиков оптоволоконных контрольно-измерительных систем / П. Ш. Мади, В. А. Калытка, А. Д. Алькина // SIBTEST - 2019 : Сборник тезисов докладов V Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле, Екатеринбург, 26–28 июня 2019 года. – Екатеринбург: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2019. – С. 42.

84. Мади, П.Ш. Математическая модель геометрических параметров оптических характеристик волны и температуры на основе дифракционной решетки / Мади П.Ш., Нешина Е.Г., Дюсембаева М.С. // 11-ая Международная конференция «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент». 2019. – С.56-61

85. Madi P.Sh. Development of a model fiber-optic sensor of the external action on the basis of diffraction gratings with variable parameters of the system / Madi P.Sh., Kalytka V.A., Alkina A.D., Nurmaganbetova M.T.// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. - Vol.1327.- No.012036. - Pp.1-5

86. Свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права 8912. Разработка математической модели оптоволоконного датчика на основе дифракционной решетки с варьируемыми параметрами / Мади П.Ш., Калытка В.А., Нурмаганбетова М.Т., Алькина А.Д. опубл. 13.03.2020.

87. Kalytka V A, Korovkin M V, Mekhtiev A D, Yurchenko A V 2018 Nonlinear polarizing effects in dielectrics with hydrogen bonds Russian Physics Journal 61(4) 757-69 DOI: 10.1007/s11182-018-1457-8

88. Kalytka V A, Korovkin M V 2016 Quantum effects at a proton relaxation at low temperatures Russian Physics Journal 59(7) 994- 1001 DOI: 10.1007/s11182-016-0865-x

89. Kalytka V A, Korovkin M V 2017 Dispersion relations for proton relaxation in solid dielectrics Russian Physics Journal 59(12) 2151-61 DOI: 10.1007/s11182-017-

1027-5

90. Annenkov Yu M, Kalytka V A, Korovkin M V 2015 Quantum effects under migratory polarization in nanometer layers of proton semiconductors and dielectrics at ultralow temperatures Russian Physics Journal 58(1) 35- 41. DOI: 10.1007/s11182-015-0459-z

91. Мади, П.Ш. Волоконно-оптический длиннобазовый деформометр для системы мониторинга горных пород бортов карьеров / А. Д. Мехтиев, А.В. Юрченко, В.А. Калытка, Е. Г. Нешина, А. Д. Алькина // Письма в журнал технической физики – 2022. – Т. 48. – № 15. – С. 30-32. DOI: 10.21883/PJTF.2022.15.53129.19200

92. 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.

93. Пат. На полезную модель РК 5045. Волоконно-оптический датчик давления / Мехтиев А.Д., Мехтиев Р.А, Алькина А.Д., Нешина Е.Г., Мади П.Ш., Ковтун А.А.; заявл. 05.12.2019; опубл. 12.06.2020.

94. Мади, П.Ш. Вопросы использования волоконно-оптических датчиков / Мади П.Ш., Алькина А.Д., Юрченко А.В. // Труды Международной научнопрактической конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации». 2019. – С.222-224

95. Yurchenko A V, Mekhtiyev A D, Bulatbaev F N, Neshina Y G, Alkina A D, Alkina A D, Kokkoz M M 2017 The clearance control system of the lever-hinge mechanism of the mine winder braking device using the capacitive sensors Journal of Physics: Conference Series 881(1) 012034

96. 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.

97. 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.

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

99. Методические указания по определению физико-механических свойств и трещиноватости горных пород... А-96735. Фонды предприятия –разработчика 1981

100. Подземные горные выработки. Актуализированная редакция СНиП II-94–80. 2012

101. Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. (2002). Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition. 5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunneling Association of Canada Conference: NARMS-TAC, 2002, pp. 267–271

102. Hoek E., Karakas A. Practical rock engineering // Environmental and Engineering Geoscience. – 2008. – T. 14. – <sup>1</sup> 1. – P. 55– 58

103. Madi, P.Sh. Research of fiber-optic displacement sensors / Madi, P.S., Gorokhov, D.A., Mekhtiyev, R.A., Nurmaganbetova, M.T.// Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1843(1), 012016

104. Автоматизированная волоконно-оптическая система мониторинга устойчивости прибортового массива карьера и отвалов / А. Д. Мехтиев, Е. Г. Нешина, П. Ш. Мади, Д. А. Горохов // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 4. – С. 19-26. – DOI 10.24000/0409-2961-2021-4-19-26.

105. 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(746). – С. 129-136. – DOI 10.17223/00213411/63/2/129.

106. Yugay, V.; Mekhtiyev, A.; Madi, P.; Neshina, Y.; Alkina, A.; Gazizov, F.; Afanaseva, O.; Ilyashenko, S. Fiber-Optic System for Monitoring Pressure Changes on Mine Support Elements. Sensors 2022, 22, 1735. https://doi.org/10.3390/s22051735

107. https://docs.opencv.org/4.x/d9/df8/tutorial\_root.html

108. Сидорова, А. В. Руthon как инструментарий оптимизации режима ГЭС в составе ЭЭС / А. В. Сидорова, А. А. Черемных, А. Г. Русина // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2021. – Т. 13. – № 2(50). – С. 119-132.

109. https://www.w3schools.com/python/matplotlib\_pyplot.asp

110. https://python-scripts.com/tkinter-introduction

# ПРИЛОЖЕНИЕ А КОПИИ ПОЛУЧЕННЫХ ПАТЕНТОВ

1. Патент № 5444

2. Патент № 5045

)-6	)-0		1-6-6
казақстан рі	еспубликасы	PEC	ПУБЛИКА КАЗАХСТАН
	REPUBLIC C	)F KAZAKHSTAN	
	ПА	TEHT	
	PA	TENT	
	N	2 <u>5044</u>	
ПАЙДАЛ	Ы МОДЕЛЬГЕ / <mark>НА П</mark> ОЛ	ЕЗНУЮ МОДЕЛЬ	/ FOR UTILITY MODEL
	(21) 2019/1068.2		
	(22) 05.12.2019		
	(45) 12.06.2020		
<ul> <li>(54) Екі сәулелі ин Датчик для из Sensor for tem</li> <li>(73) Мехтиев Русл Мекһtiyev Rus</li> <li>(72) Мехтиев Али Алькина Алия Мәди Перизат Ковтун Алекс Нешина Елена</li> </ul>	терферометр негізіндегі тел мерения температуры на ос perature measurement based ан Алиевич (KZ) slan Aliyevich (KZ) Джаванширович (KZ) даулетхановна (KZ) Шаймуратқызы (KZ) андр Анатольевич (KZ) а Геннадьевна (KZ)	мператураны өлшеу снове двухлучевого и on double-beam inter Mekhtiyev Ali Dz Alkina Aliya Dau Madi Perizat Shai Kovtun Alexandr Neshina Yelena G	датчигі iнтерферометра ferometer chavanshirovich (KZ) letkhanovna (KZ) muratkyzy (KZ) Anatolyevich (KZ) ennadyevna (KZ)
	ЭЦҚ қол қойы Подписано ЭЦ Signed with EL «Ұлттық зиять Директор РГП Director of the	лды ЦП )S «Национальный институть «Национальный инстит «National Institute of Inte	Е. Куантыров Е. Куантыров Ү. Kuantyrov » РМК директоры ут интеллектуальной собственности» llectual Property» RSE



# ПРИЛОЖЕНИЕ Б АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ И РАССМОТРЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РА-БОТЫ

1. Акт о внедрении в учебный процесс результатов научно-исследовательской работы от НАО «Карагандинский технический университет».

2. Акт о внедрении в учебный процесс результатов научно-исследовательской работы от НАО «Карагандинский технический университет.

3. Акт о внедрении в учебный процесс результатов научно-исследовательской работы от НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова».

4. Протокол заседания технологической службы ТОО «Акжарык Комир»

5. Акт внедрения результатов диссертационной работы на ТОО «Научнотехнический центр «Альтернатива»».

**УТВЕРЖДАЮ** И.о. проректора по научной работе НАО «Карагандинский технический университет», д.т.н., профессор Ожигин С.Г. 2021 г. Mag

# о внедрении в учебный процесс результатов научно-исследовательской работы

Настоящим актом подтверждается, что результаты научных исследований Мади Перизат, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по направлению 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» по теме «Аппаратнопрограммный комплекс контроля устойчивости бортов карьеров с использованием волоконно-оптических датчиков» обладают актуальностью, представляют научно-практический интерес и внедрены в учебный процесс образовательной программы 7М07205 «Маркшейдерское дело» Карагандинского технического университета.

Результаты диссертационных исследований Мади Перизат по теме «Аппаратно-программный комплекс контроля устойчивости бортов карьеров с использованием волоконно-оптических датчиков» используются при проведении лекционных, лабораторных занятий для магистрантов по следующим дисциплинам:

- геоинформационные системы в горном деле,

- маркшейдерский мониторинг состояния горного массива.

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

Заведующий кафедрой «Маркшейдерское дело и геодезия»

Al-

Е.Н. Хмырова

Заведующий кафедрой «Энергетические системы»

Е.Г. Нешина

**УТВЕРЖДАЮ** И.О проректора по научной работе НАО «Карагандинский технический университет», д.т.н., профессор Ожигин С.Г. Kapty 2021 г. (28 » anpen 1131 АКТ

#### о внедрении в учебный процесс результатов научно-исследовательской работы

Настоящим актом подтверждается, что результаты научных исследований Мади Перизат, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по направлению 05.11.13 - «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» по теме «Аппаратнопрограммный комплекс контроля устойчивости бортов карьеров с использованием волоконно-оптических датчиков» обладают актуальностью, представляют научно-практический интерес и внедрены в учебный процесс образовательной программы 6В06201 «Радиотехника, электроника и телекоммуникации» Карагандинского технического университета.

Результаты диссертационных исследований Мади Перизат по теме «Аппаратно-программный комплекс контроля устойчивости бортов карьеров с использованием волоконно-оптических датчиков» используются при проведении лекционных, лабораторных, практических занятий для бакалавров по следующим дисциплинам:

- основы электронной и измерительной техники,

- метрология и радиоизмерения.

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

Заведующий кафедрой «Технологии систем связи»

В.В. Югай

Заведующий кафедрой «Энергетические системы»

10000 Jeck

Е.Г. Нешина



### о внедрении в учебный процесс результатов диссертационного исследования Мади Перизат

Основные научные результаты диссертационной работы Мади Перизат, старшего преподавателя кафедры «Энергетические системы» Карагандинского технического университета имени Абылкаса Сагинова, 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 учебно-методическом комплексе дисциплины «Метрология и информационно-измерительная техника» для студентов специальностей 6В07108 «Теплоэнергетика», 6В07109 «Электроэнергетика».

Передача осуществлена на безвозмездной основе.

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

Заведующая кафедрой «Энергетические системы», Академик МАИН, кандидат технических наук

Декан факультета энергетики, автоматики и телекоммуникаций, ассоциированный профессор, Академик МАИН, кандидат технических наук

Auf

Е.Г. Нешина

Ф.Н. Булатбаев

## <u>«АКЖАРЫК КОМИР»</u> ЖШС

100012 Қарағанды облысы, Қарағанды қ., Қазыбек би атындағы ауданы Бухар-Жырау даң-лы 57/1, 617 ЖИН 160840022724

### ТОО «АКЖАРЫК КОМИР»

100012 Карагандинская область, г.Караганда, район им.Казабек би, пр-кт Бухар-Жырау, строение 57/1, 617 БИН 160840022724

#### протокол

заседания технологической службы ТОО «Ақжарық Көмір»

#### Повестка дня

1. Обсуждение научной работы аппаратно-программного комплекса контроля устойчивости бортов карьеров с использованием волоконно-оптических датчиков.

СЛУШАЛИ: Мәди Перизат Шаймуратқызы, старшего преподавателя кафедры «Энергетические системы» Карагандинского технического университета имени Абылкаса Сагинова, которая доложила основные положения своей диссертационной работы на тему «Аппаратно-программный комплекс контроля устойчивости бортов карьеров с использованием волоконнооптических датчиков». Научный руководитель - Юрченко А.В., доктор технических наук, профессор Томского политехнического университета. Представленный аппаратно-программного комплекса контроля устойчивости бортов карьеров с использованием волоконно-оптических датчиков, имеет практическую значимость и актуальность. Научная работа содержит новые научно-обоснованные результаты, основанные на выполненных теоретических и экспериментальных исследованиях, совокупность которых имеет важное значение для обеспечения безопасности ведения горных работ открытых разработок.

Отмечено, что волоконно-оптические датчики для отслеживаниия устойчивости бортов карьера хорошо работают в зонах гелогических нарушений и в перспективе способна контролировать ряд параметров одновременно таких как горное давление, состояние вспучиваемости отвалов, температуру пласта, давление воды в подземном водонасосном горизонте.

С учетом рекомендаций и предложений специалистов представленная научная работа не теряет актуальности, содержит новые научно-обоснованные результаты и может самостоятельно являтся конструкторским решением при контроле устойчивости бортов карьера для обеспечения безопасности ведения горных работ открытых разработок. В процессе доклада были заданы ряд вопросов по теме проведенных исследований и содержанию научной работы, на которые автор диссертации дал подробные и исчерпывающие ответы.

ПОСТАНОВИЛИ: рекомендовать научную работу Мәди П.Ш. к дальнейшей разработке и внедрению на горных предприятиях.

**1**.Б. Бабас

1 Беккер

Директор

Технический директор

ТВЕРЖДАЮ» р «НТЦ «Альтернатива» В.Н. Долгоносов 2022r. pers AKT

о внедрении результатов диссертационной работы Мади Перизат. «Аппаратно-программный комплекс контроля устойчивости бортов карьера с использованием волоконно-оптических датчиков»

Настоящим актом подтверждается, что выполненные в рамках диссертационной работы исследования Мади Перизат, а также их практическая реализация в виде разработанного аппаратно-программного комплекса контроля устойчивости бортов карьера с использованием волоконно-оптических датчиков смещения, используются на объектах исследования ТОО «Научно-технический центр «Альтернатива» с целью контроля смещения и измерения геотехнических параметров горных выработок. Комплекс контроля доказал свою работоспособность и пригодность для практического применения.

Предложенный метод контроля регистрации изменения параметров позволили с высокой точностью оперативно реагировать, а также отслеживать показатели, характеризующие протекание процесса.

Настоящее заключение не является основанием для предъявления финансовых претензий.

Заместитель директора по научной работе. Сесов С.Т. Омаров

Главный инженер, PhD

Д.С. Ожигии