

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Машиц

Мади Перизат

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

Юрченко Алексей Васильевич

доктор технических наук, профессор
Исследовательской школы физики
высокоэнергетических процессов ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский Томский
политехнический университет» г. Томск.

Официальные оппоненты:

Шандаров Станислав Михайлович

доктор физико-математических наук, профессор
кафедры Электронных приборов ФГБОУ ВО
«Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники», г. Томск.

Коношонкин Александр Владимирович

доктор физико-математических наук, ведущий
научный сотрудник лаборатории рассеяния
электромагнитных волн, ФГБУН Институт
оптики атмосферы им. Е.В. Зуева Сибирского
отделения Российской академии наук, г. Томск.

Защита состоится 13 декабря 2022 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: г.Томск, ули.Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru.

Автореферат разослан ____ октября 2022г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.13
кандидат технических наук, доцент



Е.А. Шевелева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Казахстан после России занимает 2 место среди стран СНГ по объемам добычи полезных ископаемых. Главным вопросом остается обеспечение безопасности персонала при проведении работ на горнодобывающих предприятиях. В настоящее время добыча полезных ископаемых ориентирована на открытые разработки, идет переход от подземных к открытым разработкам, которые являются более рентабельными.

Открытый способ разработки отличается высокой производительностью труда, полнотой извлечения полезных ископаемых, лучшими и сравнительно безопасными условиями работы. Полное извлечение полезных ископаемых должно сопровождаться минимальными объемами вскрышных работ. В свою очередь обоснование минимума вскрыши на карьерах возможно только при решении вопроса обеспечения устойчивости бортов карьера.

Актуальность работы обосновывается повышением эффективности и безопасности работ на бортах карьера, позволяющих управлять его параметрами в процессе эксплуатации.

На основе нового метода разработан комплекс контроля устойчивости бортов карьера, с использованием волоконно-оптических датчиков в режиме реального времени, выбор высокоточных методов контроля, математическая обработка результатов наблюдений, а также анализ и прогноз устойчивости бортов карьера.

Преимущества волоконно-оптических датчиков и технологий применительно 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 повторно использовать в линиях связи. В отличие от традиционных 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 квази-распределительной технологии оптоволоконных датчиков, а также управляемый комплекс контроля с низким затуханием сигнала и высокой помехозащищенностью предоставляет возможность с высокой точностью контролировать смещения бортов карьера и прогнозировать внезапные обрушения прибортового массива и в настоящее время является весьма актуальным.

Объектом исследования 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.

Степень разработанности темы исследования. Проведенный анализ разработок в области волоконно-оптических датчиков ведущих ученых России, как Бурков В. Д., Бусурин В. И., Бутусов М. М., Гречишников В. М., Жилин В. Г., Зак Е. А., Конюхов Н. Е., Малков Я. В., Мурашкина Т. И., Патлах А. Л., Потапов В. Т., Удалов Н. П. и стран западной Европы, таких как Т. Ли, Ч. Ванг, Ю. Чао и Ю. Нинг, Х.-Н. Лю, К. Ван, Т.-Ю. Лю, Ю.В. Вэй, Ли Чэ-Сиэнь, Кисида Кинзо, Нисигути Кенити, Гузик Артур, Макита Ацуси, Ямаути Йосиаки, Atul Kumar, Dheeraj Kumar, U. K. Singh, P. S. Gupta and Gauri Shankar, Мадждабади, Б, Долина Б, Дюссо МБ, Kaiser РК, Имин Чжао, Нонг Чжан и Гуньяо Си, Тао Ху, Гунной Хоу, Цзысян Ли, Кьяра Ланчано и Риккардо Сальвини, Свадеш Чауля и Г.М. Прасад и др. показывают, что проблема есть и к решению нужно подходить не односторонне, так как разработанные методы контроля не полностью обеспечивают безопасность жизнедеятельности людей на производстве.

В связи с этим остро стоит проблема полного комплексного исследования по разработке аппаратно-программного комплекса контроля устойчивости бортов для применения на карьерах и разрезах Карагандинской области и Казахстана в целом, что определяет актуальность диссертационной работы.

Цель работы - 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 смещения 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 аппаратно-программного 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.

Теоретическая и практическая значимость работы 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 аппаратно-программным комплексом для мониторинга геотехнического состояния бортов карьеров. Разработка прошла практическую апробацию на предприятиях Карагандинского угольного бассейна ведущие открытые разработки. Практическая значимость 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.

Методология и методы исследования:

- Анализ и обобщение литературы по обеспечению устойчивости бортов карьера и его контроль и мониторинг состояния уступов, внутренних отвалов на сегодняшний день;
- Метод контроля дополнительных потерь возникающих в оптическом волокне в случае механического воздействия с учетом фотоупругого эффекта;
- Комплексное исследование и анализ фактического состояния устойчивости бортов карьера при его эксплуатации;
- Метод спектрального разложения светового пятна Пуансона, сформированного на поверхности фотоматрицы;
- Использование закона распределения Гауса, позволяющего описать интенсивность распределения световой волны на поверхности фотоматрицы;
- Методы теоретической физики раздела оптики связанной с распространением световой волны в различных средах;
- Методы теоретического исследования: трехмерное моделирование механических натяжений в программной среде ANSYS, использование компьютерных программ, как Wolframalpha, ANETR для математических моделирований, обработки экспериментальных результатов;
- Методы эмпирического исследования. Измерения всех существующих физических характеристик бортов карьера и бермы от условий их функционирования. Метод планирования экспериментов для оценки уровня технологии и прогнозирования перспективных показателей, метод цифровой обработки изображений и спектрального анализа.

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 результатов заключается в использовании методов сбора первичной информации и анализа литературы наукоемких баз, а также подтверждается результатами выполненных теоретических и экспериментальных исследований схем и конструкции датчика; достаточными объемами лабораторных и стендовых испытаний; положительными результатами апробации разработанного метода контроля и рекомендаций в производственных условиях.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были доложены, обсуждены и одобрены в ходе следующих мероприятий как, Международная научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии» (Томск, 2018); Международная научно-практическая конференция «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Караганда, 2018,2019,2020,2021); 11-ая Международная конференция «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент» (Караганда, 2019); V Международная конференция по инновациям в неразрушающем контроле SibTest (Екатеринбург, 2019); Республиканская студенческая научная конференция «Вклад молодежной науки в реализацию Стратегии «Казахстан-2050» (Караганда, 2020); Международная научно-теоретическая конференция «Сейфуллинские чтения – 17: «Современная аграрная наука: цифровая трансформация», посвященная 30-летию независимости Республики Казахстан (Нур-Султан 2021); II Международная научно-техническая конференция «Smart Energy Systems 2021» (Казань, 2021); X Международная конференция школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» (Томск, 2021), Международная научно-практическая конференция «Электрические сети: Надежность, Безопасность, Энергосбережение и Экономические аспекты» (Казань, 2022); Международная научно-практическая конференция "Сейфуллинские чтения 18 (2) на тему "Наука XXI века - эпоха трансформации", посвященной 65 летию КАТУ им.С.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»».

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.

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.

Объем и 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.

Содержание работы. Введение включает актуальность исследования, проведенного в рамках диссертационной работы, определяет цель исследования, определяет задачи исследования и излагает научную новизну и практическую значимость предлагаемого исследования.

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена научному анализу современного состояния горно-геологической характеристики месторождений полезных ископаемых Казахстана, факторам, влияющих на развитие геомеханических процессов бортов (уступов) карьера, существующих методов контроля устойчивости бортов карьера с выявлением достоинств и недостатков каждого метода. Выполнен обзор волоконно-оптических датчиков и их применение в странах западной Европы и США, а также разработок ученых России.

Проведенный анализ разработок в области волоконно-оптических датчиков ведущих ученых России и стран западной Европы показывает, что основное направление данных работ направлено на использование волоконно-оптических датчиков во многих областях и отраслях, как

перспективных средств мониторинга, измерения и контроля параметров, при этом спрос на данные датчики ежегодно увеличивается.

Волоконно-оптические технологии имеют существенные преимущества для применения на горных предприятиях, заключающиеся в следующем: чувствительность и стабильность волоконно-оптических датчиков, способность к мультиплексированию; возможность работы от одного источника питания; отсутствие влияния электромагнитных волн; искро- и взрывобезопасность.

Во второй главе 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.

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.

Проведено моделирование процесса деформации горной выработки с использованием программного обеспечения ANSYS. Полученная модель имитирует деформацию волоконно-оптического датчика, при воздействии на него горной массы. Моделирование показывает, что дополнительные потери импульсов оптических волн увеличиваются при натяжении, когда проводник оптического волокна находится на грани смещения. Фактически, это можно объяснить относительным смещением оптического волокна, связанным с размером напряжения, поскольку кварцевое оптическое волокно подчиняется закону Гука ($\sigma = E \cdot \varepsilon$) в широком диапазоне напряжений, пока оно не разрушится. Анализ разрушения материала оптического волокна принимая во внимание коэффициент цикла нагрузки, показал, что основными факторами развития усталостных трещин являются: амплитуда напряжения и деформации (смещения); продолжительность и количество циклов нагружения (натяжения).

Выполнено планирование опытов, обработаны результаты измерений и созданы математические модели. Для обработки полученных данных применен статистически-детерминированный метод построения модели с использованием компьютера и программы ANETR. Стандартное отклонение CO% используется для оценки стандарта модели, при условии, что $CO\% \leq 20$ - модель отличная. При $F \geq F_{005}$ и $F \geq F_{001}$ надежность модели оценки коэффициента Фишера составляет 95% и 99%.

В третьей главе описываются экспериментальные исследования в лабораторных условиях при установке волоконно-оптических датчиков для контроля деформации (смещения).

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

Для проверки выдвинутой гипотезы, в которой предположено использование одномодового оптического волокна типа G652 в качестве датчика и направляющей системы передачи данных. Учитывая протяженность приборного 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.

Измерения смещения производились двумя методами, для обеспечения достоверности результатов. Первый метод контроля изменения пикселей светового пятна, сформировавшегося на выходе из оптического волокна и падающего на поверхность телевизионной матрицы. Второй метод основан на контроле вносимых дополнительных потерь световой волны, проходящей по оптическому волокну при натяжении, схема проведения эксперимента которого показана на рисунке 1.

Смещение выполняется при помощи затяжки натяжных муфт. При смещении торцы ферул, в которое вставлено оптическое волокно расходятся на расстоянии 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, касаются 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.

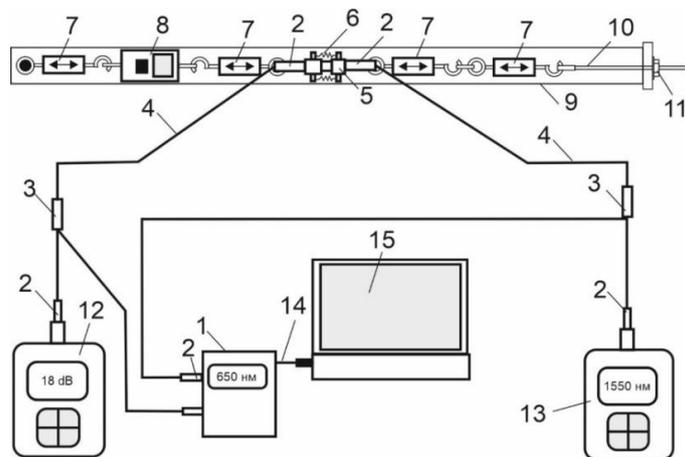


Рисунок 1 - Схема проведения эксперимента:

1 – блок обработки данных с источником видимого излучения с длиной волны 650 нм (полупроводниковый лазер), 2 – оптический коннектор SC, 3 – оптический разветвитель, 4 – патч-корд, 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

В четвертой главе создан комплекс контроля устойчивости бортов карьера на основе волоконно-оптических датчиков в виде аппаратно-программного комплекса контроля. Фактором, объединяющим контрольные станции в единую систему контроля мониторинга, является то, что плановое и высотное положение реперов контрольных станций определяется в едином системе аппаратно-программного комплекса контроля (АПКК) на карьере ТОО «Акжарык Комир». Рассмотрены общие сведения о районе месторождения ТОО «Акжарык Комир».

На основе анализа состояния разработки и перспектив горных работ на разрезе ТОО «Акжарык Комир» предусмотрены два этапа создания контрольных станций. Первый является текущим и соответствует текущему состоянию горных работ, второй является перспективным и соответствует наблюдению, когда разрез и отвальный слой размещены на проектном контуре (конец горных работ).

В процессе разработки горных работ планируется перестроить существующие контрольные станции и заложить новую точку отсчета в рабочем борту разреза. Начальная и контрольная станция находятся в одном и том же месте, с использованием датчиков на основе оптического волокна, а точки наблюдения и контроля находятся в околоствольном дворе.

Масштабы производства открытых горных работ, инженерно-геологические и гидрогеологические условия разработки угольного карьере ТОО «Акжарык Комир», требуют углубленных исследований и мониторинга текущих геомеханических процессов, чтобы избежать

неконтролируемых катастрофических деформационных проявлений, как смещение и подвижка бортов.

Условная схема разработанного волоконно-оптического датчика представлена на рисунке 2. На рисунке 3 представлены условные схемы датчика а) в обычном положении и б) в положении, когда существует подвижка бортов. При разработке схем предложена простая доступная условная схема соединения, которая приведена на рисунке 4.

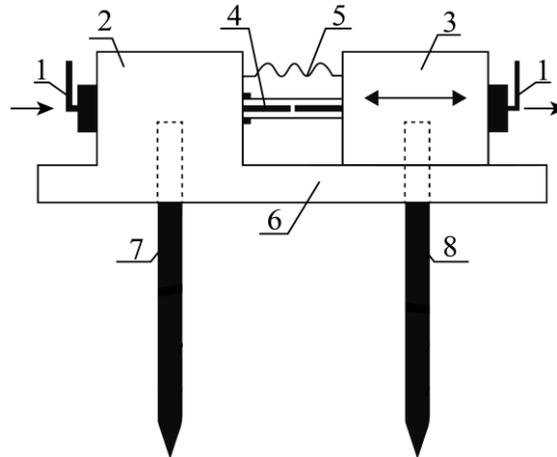
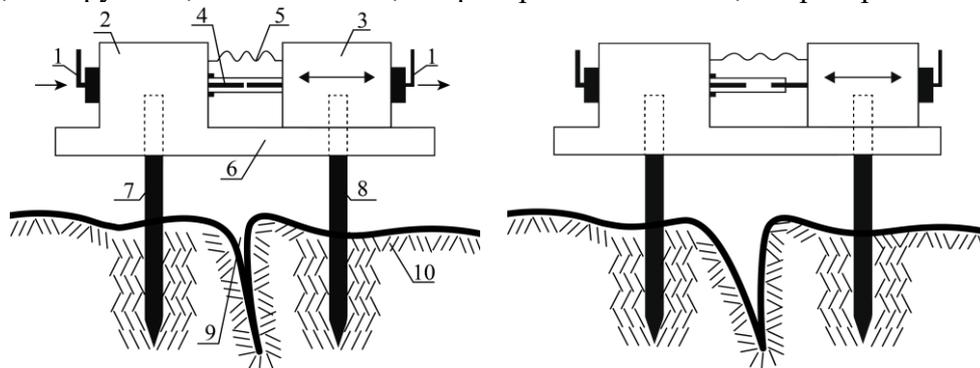


Рисунок 2 – Условная схема датчика:

1 – 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 б) процесс раскрытия трещины

Рисунок 2 – 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.

Настройки могут меняться в зависимости от условий горного предприятия и необходимости выставления порога срабатывания тревожной кнопки при угрозе обрушения или предупреждения о резком изменении горного давления в точке измерения. Первоначально программа позволяет откалибровать подключенный волоконно-оптический датчик и его фотоматрицу. Так как дистанция от блока обработки данных до волоконно-оптического датчика может меняться от сотен метров до десятков километров, проходящее световое пятно будет иметь различный

размер и площадь. Проводится этап настройки чувствительности камеры и подстройка изображения пятна под определенный размер. Для этого нужно нажать вкладку «калибровка камеры» и произвести настройку, после чего выполнить сохранение установленных параметров чувствительности и закрыть окно. Также при настройке камеры можно определить, является ли источник излучения когерентным. Это очень важное обстоятельство, так как сбой работы лазера приведет к нарушениям работы всего АПКК в целом. Проведено исследование с использованием способа измерения дополнительных потерь при механическом воздействии и формировании изгиба на оптическом волокне. Способ основан на изменении свойств света, испускаемого от источника лазерного излучения. Источник лазерного излучения представляет собой лазерный диод с длиной волны 650 нм, мощностью 30 мВт, принцип действия которого основан на возникновении изменения заселенности в области рn-перехода во время инжекции носителей заряда. При механическом воздействии излучаемый свет имеет свойство изменения светопропускания при прохождении через оптическое волокно.

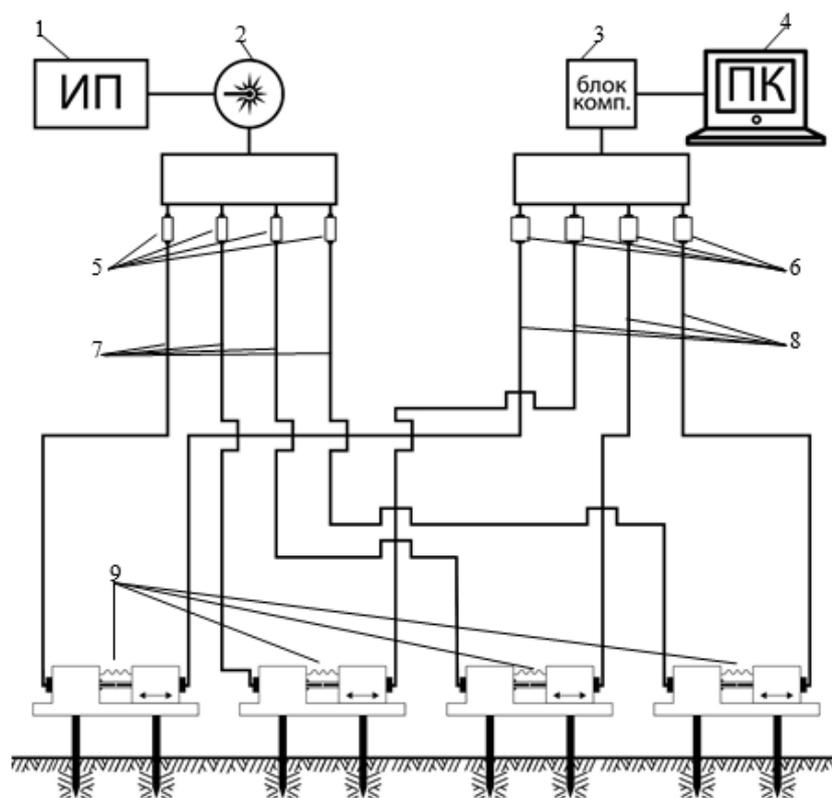


Рисунок 4 – Условная схема подключения волоконно-оптических датчиков для контроля смещения бортов:

- 1 – источник питания, 2 – полупроводниковый лазер,
 3 – блок обработки компьютера, 4 – персональный компьютер, 5 – разветвители, 6 – фотоматрица, 7 – оптическое волокно с лазера, 8 – оптическое волокно к фотоматрице, 9 – датчики.

Аппаратно-программный комплекс контроля (АПКК) разработан используя элементы библиотеки OpenCV (Open Source Computer Vision Library). 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.

Интерфейс программы представляет собой главное окно (рисунок 5), предоставляющий блок запуска в фоне, блок настройки камер, блок мониторинга активности, блок индикаторов состояния и сигналов, блок регистрации движения с ведением логов по времени.

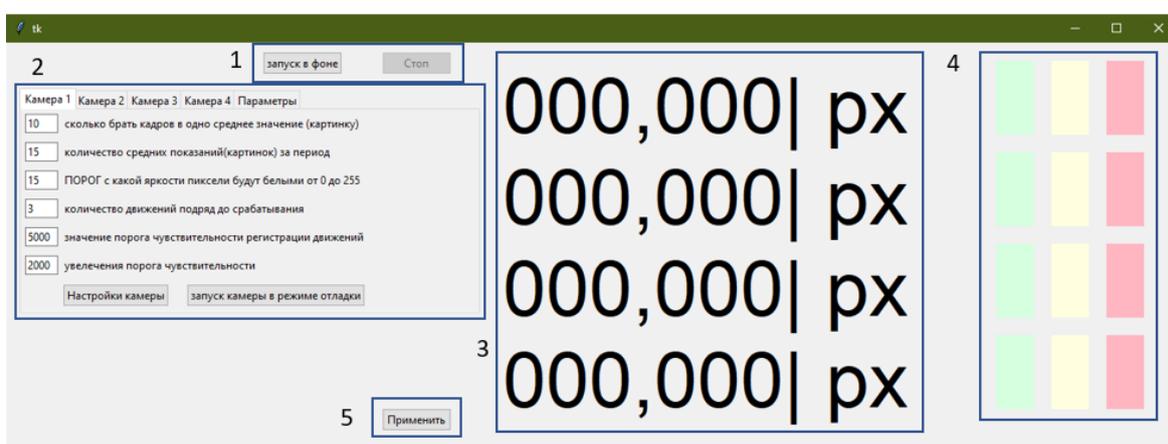


Рисунок 5 – Главное окно интерфейса аппаратно-программного комплекса контроля

При нажатии кнопки «Запуск в режиме отладки» - запускается режим наладки. Окно режима отладки в состоянии покоя (рисунок 6), представляет собой стандартное окно, а режим показа поступающих и обрабатываемых данных (рисунок 7) при возникновении смещении борта карьера, где показан процесс перехода черных пикселей в белые пиксели.

Запуск в режиме отладки запускает программу в режиме показа поступающих и обрабатываемых данных, 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.

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

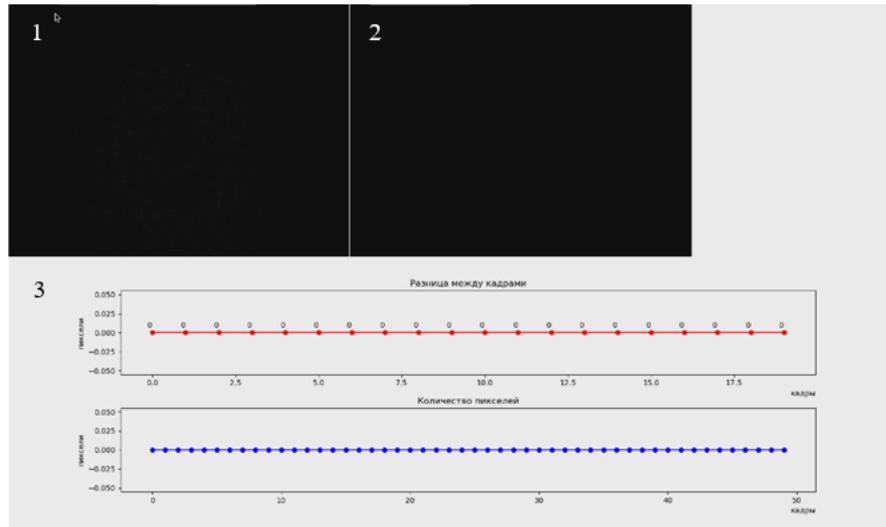


Рисунок 6 – Окно режима отладки в состоянии покоя

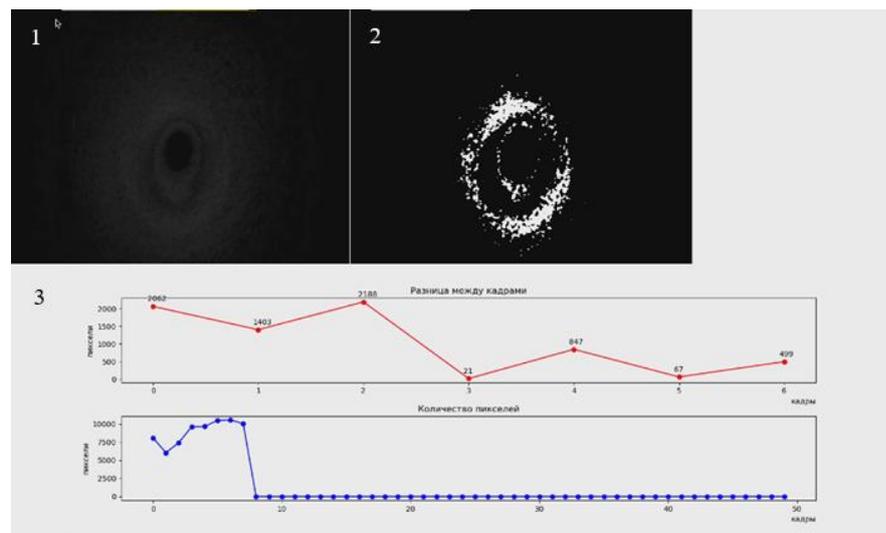


Рисунок 7 – Режим показа поступающих и обрабатываемых данных

Предложенный способ контроля и мониторинга устойчивости бортов карьера реализуется путем сравнения апертур световых пятен.

Заключение

Основные научные и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Проведен научный 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.

4. 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 мировой 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.

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

7. Приведены основы математического моделирования дифракционной решетки для датчиков, где показана модуляция интенсивности решетки и физико-математическая 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 $a(\xi)$. 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 проявляются через движение и перемещение двух решеток.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

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

12. 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 $CO\% \leq 20$ – модель отличная. Благодаря оценке модели с помощью коэффициента Фишера $F=1652002.69770$, если существует существенная связь, надежность при $F \geq F_{001}$ равна 99%.

13. 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 световой волны проходящей по оптическому волокну при механическим воздействием и возникновении натяжения.

14. 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.

15. 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 приборного массива для контроля устойчивости бортов карьера внезапного его обрушения.

16. 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.

17. 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.

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

Список публикаций по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Мади, П.Ш. 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. (Bezopasnost' Truda v Promyshlennostithis).

2. Мади, П.Ш. Обеспечение безопасности горных работ с использованием волоконно-оптической системы / А. Д. Мехтиев, А. И. Солдатов, Е. Г. Нешина [и др.] // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2021. – № 1(60). – С. 13-22.

3. Мади, П.Ш. 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.

4. Мади, П.Ш. Краткий сравнительный анализ эффективности использования сенсорной сети в горнодобывающей промышленности для мониторинга персонала и технологического оборудования / А. Д. Мехтиев, Е. Г. Нешина, А. Д. Алькина [и др.] // Уральский научный вестник. – 2016. – Т. 9. – № 2. – С. 159-163.

5. 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 (Technical Physics Letters).

Публикации в изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus

1. Madi P.Sh. Studying additional losses of standard G.652 optical fiber with protective cladding during multiple bending to develop weight control sensor / Alkina, A., Mekhtiyev, A., Neshina, Y., ...Sansyzbay, K., Yurchenko, A. // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2022, 100(7), p. 1983–1995

2. Madi P.Sh. Fiber-Optic System for Monitoring Pressure Changes on Mine Support Elements / Yugay, V., Mekhtiyev, A., Madi, P., ...Afanaseva, O., Pyashenko, S. // Sensors. – 2020, (22)5, 1735

3. Мади П.Ш. The working roof rock massif displacement control system / Mekhtiyev A.D., Soldatov A.I., Neshina Y.G., Alkina A.D., Madi P.Sh. // NEWS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN SERIES OF GEOLOGY AND TECHNICAL SCIENCES. – 2021. – Vol. 5. – No 449. – Pp.68-76

4. Madi, P.Sh. Questions of application of fiber-optic sensors for monitoring

crack growth during rock deformations / Yugay, V.V., Sh Madi, P., Ozhigina, S.B., Gorokhov, D.A., Alkina, A.D.// Journal of Physics: Conference Series 2021, 2140(1), 012037

5. Madi, P.Sh. The use of optical fiber for the creation of security systems for electrical cables of distribution networks of 0.4 kV / Yugay, V.V., Mekhtiyev, A.D., Sh Madi, P., Alkina, A.D., Neshina, E.G.// Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2140(1), 012002

6. 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

7. Madi P.Sh. Universal installation for studying structural defects in electrical and optical fiber materials / Kalytka V.A., Korovkin M.V., Madi P.Sh., Kalacheva S. A., Sidorina Y.A. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. – Vol.1499.- No. 012046. - Pp.1-5

8. Madi P.Sh. Universal installation for studying structural defects in electrical and optical fiber materials / Madi P.Sh., Gorokhov D.A., Mekhtiyev R.A., Nurmaganbetova M.T. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. – Vol.1499.- No. 012046. - Pp.1-5

9. Madi, P.Sh. Investigation of additional losses in optical fibers under mechanical action / A V Yurchenko, A D Mekhtiyev, F N Bulatbaev, Y G Neshina, A D Alkina, Madi P.Sh.// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. - Vol.516. - No.012004. - Pp.1-5

10. 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.

Публикации в других научных изданиях

1. Мади, П.Ш. Исследование волоконно-оптического датчика смещения / П. Ш. Мади, С. Б. Ожигина, А. Д. Алькина, Р. А. Мехтиев // Ресурсосберегающие технологии в контроле, управлении качеством и безопасности : Сборник научных трудов X Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых, Томск, 09–11 ноября 2021 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2022. – С. 152-155.

2. Мади, П.Ш. Исследование волоконно-оптических датчиков перемещения / Мади П.Ш., Юрченко А.В., Мехтиев А.Д. // Т Р У Д Ы Международной научно-практической online-конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации», посвященной 30-летию Независимости Республики Казахстан. 2021. – С.769-770.

3. Мади, П.Ш. Исследование волоконно-оптических датчиков

смещения / Мади П.Ш., Алькина А.Д., Мехтиев А.Д. // Международная научно-теоретическая конференции «Современная аграрная наука: цифровая трансформация», посвященная 30-летию Независимости Республики Казахстан. Секция - Актуальные проблемы растениеводства и применение цифровых технологий. 2021. – С.92-95.

4. Мади, П.Ш. Волоконно-оптические датчики (ВОД) / Мади П.Ш., Юрченко А.В. // Труды Международной научно-практической online-конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации». Секция «Телекоммуникации и измерительная техника». 2020. – С.955-957.

5. Мади, П.Ш. Применение волоконно-оптических датчиков в энергосистеме / Мади П.Ш., Сейтжанов А.К. // Труды Республиканской студенческой научной конференции «Вклад молодежной науки в реализацию Стратегии «Казахстан-2050», посвященный 1150-летию, философа Абу Насыра аль-Фараби, 4 секция, Информационно-коммуникационные технологии. Часть 5. 2020. – С.79-80.

6. 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.

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

8. 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.

9. Мади, П.Ш. Исследование дополнительных потерь в оптических волокнах при механическом воздействии / Юрченко А.В., Мехтиев А.Д., Булатбаев Ф.Н., Нешина Е.Г., Алькина А.Д., Мади П.Ш. // Сборник тезисов VIII Международной научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии». 2018. – С.8.

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

А. А., Баландин В.С. Мади П.Ш. // Materials Of The Xii International Scientific And Practical Conference. — 2016. — Pp. 27-31.

11. Мади П.Ш. Исследование метода контроля и безопасности устойчивости бортов карьеров с использованием волоконно-оптических датчиков / Международная научно-практическая конференция «Электрические сети: Надежность, Безопасность, Энергосбережение и Экономические аспекты».

12. Мади П.Ш. Практическая апробация аппаратно-программного комплекса контроля с использованием волоконно-оптического датчика в условиях предприятий / Международная научно-практическая конференция «Сейфуллинские чтения 18 (2) на тему «Наука XXI века - эпоха трансформации», посвященной 65-летию КАТУ им.С.Сейфуллина"» 2022.

Патенты:

1. Пат. На полезную модель РК 5044. Датчик для измерения температуры на основе двухлучевого интерферометра / Мехтиев Р.А., Нешина Е.Г., Мехтиев А.Д., Алькина А.Д., Мади П.Ш., Ковтун А.А.; заявл. 05.12.19; опубл. 12.06.2020.

2. 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.

Свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права

Свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права 8783. Анализ определения дополнительных потерь при механическом воздействии оптического волокна стандарта ITU-T G.652.D / Мади П.Ш., Мехтиев А.Д., Булатбаев Ф.Н., Алькина А.Д., Нешина Е.Г. опубл. 13.03.2020.