

На правах рукописи



Нешина Елена Геннадьевна

**ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ
ИДЕНТИФИКАЦИИ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ**

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

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Томск—2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Юрченко Алексей Васильевич

Официальные оппоненты: **Носов Виктор Викторович**
Доктор физико-математических наук, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник лаборатории когерентной и адаптивной оптики, г. Томск

Потатуркин Олег Иосифович
Доктор технических наук, Институт автоматики и электрометрии СО РАН, главный научный сотрудник Лаборатории информационной оптики, г. Новосибирск

Защита состоится 28 сентября 2021 г. в 17.00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: Россия, 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: dis.tpu.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Е.А. Шевелева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Эффективная работа горных предприятий подразумевает междисциплинарную структуру и четкую координацию. Главным вопросом всегда остается обеспечение безопасности персонала при проведении горных работ. Самой сложной и опасной средой для работы людей является подземная шахта. Большая протяженность, взрыво- и пожароопасность подразумевает создание и применение надежных и безопасных информационно-измерительных систем.

Актуальность работы обусловлена важностью вопроса предупреждения о внезапных изменениях параметров, влияющих на прочность горной выработки и обеспечивающих защиту персонала от внезапного обрушения. В работе предлагается за счет использования новых достижений науки, связанных с использованием волоконно-оптических технологий, а именно волоконно-оптического датчика, входящего в аппаратно-программный комплекс, повысить безопасность труда.

Постоянный мониторинг и достоверная информация о геотехническом состоянии горной выработки может обеспечить безаварийный режим работы горных предприятий. Это связано с возможностью выброса угля или газа, а также опасности вывалов горной породы. Поэтому так важен вопрос оперативного сбора информации и возможности ее обработки.

Волоконно-оптические датчики способны с высокой точностью измерять следующие параметры: температуру воздуха, напряжение деформации состояния выработки, загазованность. В отличие от традиционных электронных датчиков, волоконно-оптические не могут создавать ситуации, повлекшие за собой взрыв или пожар в горной выработке, т.к. не чувствительны к перепадам напряжения и не могут создать короткое замыкание. Стоимость 1 километра волокна составляет 7-8 долларов и цена ежегодно снижается на рынке. К тому же в отличие от традиционных систем контроля нет необходимости использования цветных металлов (меди).

Одним из важных аспектов функционирования сложной системы шахты является безопасность проведения горных работ. Поэтому требуется разработка методов и средств, обеспечивающих или отвечающих всем требованиям.

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

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

Объектом исследования является предупреждение о внезапных изменениях параметров, влияющих на прочность горной выработки и обеспечивающих защиту персонала от внезапного обрушения. Использование энергоэффективной распределенной системы волоконно-оптических сенсоров и направляющей

системы связи с низкими показателями затухания сигнала и высоким уровнем помехозащищённости, а также аппаратно-программного комплекса для обработки данных позволит с высокой точностью идентифицировать любые механические воздействия на горный массив выработки с целью своевременного предупреждения обрушения ее стенок.

Степень разработанности темы исследования. Вопросу исследования оптического волокна для создания датчиков либо разработки информационно-измерительных систем посвящены работы В. Д. Буркова, В. И. Бусурина, М. М. Бутусова, В. М. Гречишниковой, В. Г. Жилина, Е. А. Зак, Н. Е. Конюхова, Я. В. Малкова, Т. И. Мурашкиной, А. Л. Патлах, В. Т. Потапова, Н. П. Удалова, Т. Ли, Ч. Ванг, Ю. Чао и Ю. Нинг. Несмотря на проведенные исследования, разработанные датчики недостаточно безопасны, так как чувствительны к перепадам напряжения.

Поэтому необходимо проведение полноценного комплексного исследования по разработке волоконно-оптической системы (ВОС) контроля для применения на шахтах Карагандинского угольного бассейна, что и определяет актуальность диссертационной работы.

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

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

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

Научная новизна заключается в том, что в ней впервые:

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

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

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

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

Методология и методы исследования. При выполнении исследований применялись методы визуализации трехмерного моделирования механического напряжения в программном пакете ANSYS, обработка результатов экспериментов при помощи компьютерной программы математического моделирования Wolframalpha, ANETR, использовались методы планирования эксперимента по оценке технического уровня и прогнозирование перспективных показателей, также основные теоретические положения оптики, методы цифровой обработки и анализа сигналов и изображений.

Положения, выносимые на защиту:

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

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

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

Достоверность полученных результатов подтверждена результатами выполненных теоретических и экспериментальных исследований конструкции

датчика; достаточным объемом лабораторных и стендовых испытаний, включая использование поверенных установок в сертифицированной лаборатории.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались: на Международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Караганда, 2017); IV Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле **SibTest** (Новосибирск, 2017); Международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Караганда, 2018, 2019); V Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле **SibTest** (Екатеринбург, 2019); заседании технологической службы шахты им. Костенко УД АО «Арселор Миттал Темиртау»; заседании геофизической службы угольного департамента АО «Арселор Миттал Темиртау»; заседании геотехнической службы рудника «Нұрқазған» филиала ТОО "Корпорация Казахмыс" ПО «Карагандацветмет».

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

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

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложена на 149 страницах машинописного текста, содержит 59 рисунков и 11 таблиц, список цитируемой литературы представлен 75 наименованиями. Имеются 2 приложения.

Содержание работы

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 развития волоконно-оптических датчиков в странах западной Европы и США, а также разработок ученых России на основании литературного обзора. Особенно много работ посвящено использованию волоконно-оптических датчиков в оборонной, авиакосмической, авиационной, транспортной, нефтегазовой сферах, а также в строительстве и медицине, как перспективных средств мониторинга, измерения и контроля параметров, при этом спрос на данные датчики ежегодно увеличивается.

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

В работе были изучены методы контроля давления в горизонтальных и наклонных выработках, что позволяет оценить геотехническое состояние. За основу приняты гипотезы М. М. Протодяконова и П. М. Цимбаревича, по которым высота свода составляет:

$$b = \frac{a}{f}, \text{ м}, \quad (1)$$

где a — полупролет свода, м;

f — коэффициент крепости пород кровли по классификации проф. М. М. Протодяконова. Свод горной выработки по М.П. Цимбаревичу представлен на рисунке 1. Величину бокового давления профессор П. М. Цимбаревич рекомендует определить как активное давление на подпорную стенку сползающих призм, нагруженных сверху породой в объеме параболических элементов п.

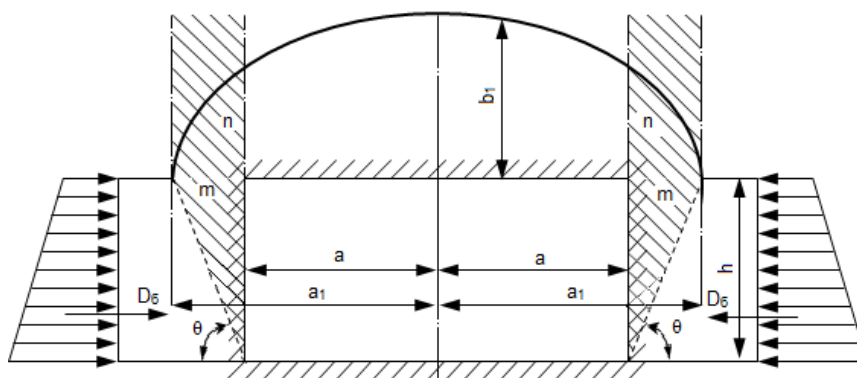


Рисунок 1 - Свод горной выработки по П. М. Цимбаревичу

Рассмотрены методы контроля напряженного состояния породных массивов горных выработок, большинство которых связано с выполнением работ по бурению в геоматериале измерительных скважин, что не всегда является удобным и безопасным. Данные обзора характеристик оптического волокна показали, что его использование в качестве датчика является наиболее перспективным решением.

В данном исследовании используется SMF волокно G.652. Волоконно-оптические системы возможно использовать не только для передачи информации, но и в качестве локальных распределённых измерительных датчиков.

Таким образом, анализ исследований позволил определить, что волоконно-оптические датчики хорошие диэлектрики, не подверженные к влиянию электромагнитных помех. Данный факт позволяет использовать их на горных предприятиях, учитывая их безопасность, долговременную стабильность и

долговечность, компактность. Также существует особенность, состоящая в том, что информация, получаемая в процессе мультиизмерений, собирается и передается в единую информационную сеть посредством оптического излучения. ВОД имеют ряд существенных преимуществ по скорости измерений и нечувствительны по многим внешним воздействиям по отношению к любым проводным и эфирным системам, связанных с передачей информации, полученных при измерениях.

Во второй главе описывается проведение научных исследований теоретических основ методов контроля идентификации геотехнического состояния массива горных выработок. При изменении свойств света образуются различные рассеяния (Релеевское, Бриллюэновское, Романовское). Для удобства описания физических основ метода контроля деформации горных выработок при помощи оптического волокна была использована классическая теория оптического интерферометра. Учитывая фотоупругий эффект, который возникает при механическом воздействии, что приводит к изменению свойств света, а именно его интенсивности, для повышения чувствительности волоконно-оптических датчиков потребуется:

- изменить длину оптического волокна в выбранной секции в сторону увеличения;
- добавить время накопления;
- изменить размер измерительного сенсора в сторону уменьшения.

Также было проведено моделирование процесса горного давления на элементы крепи с использованием программного обеспечения ANSYS. Полученная модель имитирует механическое воздействие на волоконно-оптический датчик, при воздействии на него горной массы. Известно, что по контуру сечения горной выработки формируются трещины, которые образуются естественным образом после прохождения выработки рабочим органом комбайна. Создаётся повышенная концентрация избыточной энергии, которая трансформируется в энергию, направленную на разрушение контура выработки, что в конечном итоге приводит к раскрытию сформировавшихся трещин.

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

Выполнено планирование эксперимента, обработка результатов измерений и построение математических моделей. Для обработки полученных данных применен статистико–детерминированный метод построения моделей с использованием ЭВМ и программы ANETR, который базируется на разработках проф. М. М. Протодяконова. Критерии оценки модели по среднеквадратичному отклонению СКО%, при условии $СКО\% \leq 20$ – модель отличная. Оценка модели по коэффициенту Фишера с надежностью 95% и 99% при $F \geq F_{005}$ и $F \geq F_{001}$.

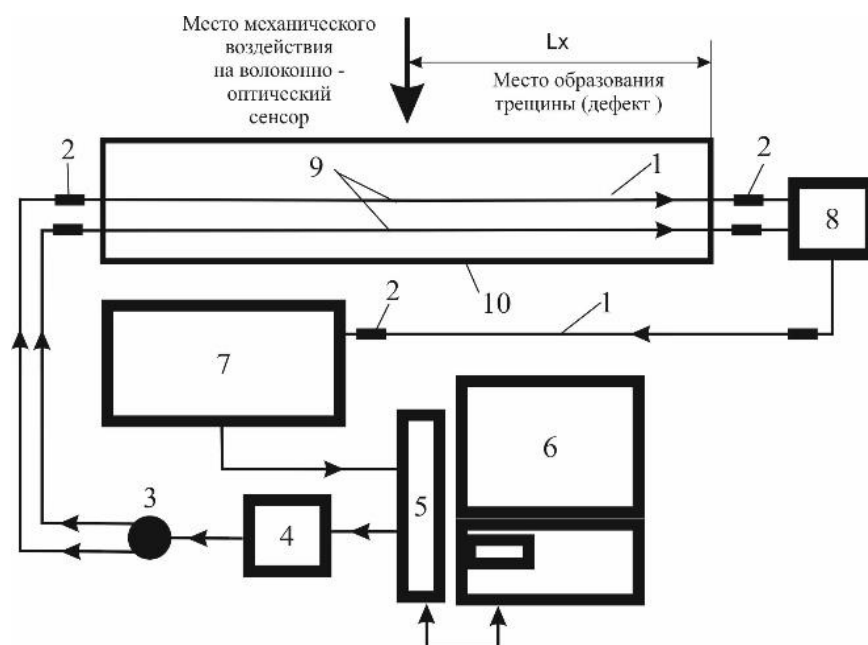
В третьей главе описываются экспериментальные исследования в лабораторных условиях при установке волоконно-оптических датчиков на монолитной бетонной шахтной крепи и арочной металлической крепи.

Проведя анализ существующих методов неразрушающего контроля прочности бетонной крепи, предложена система контроля идентификации

дефектов конструкции бетонной крепи при использовании телекоммуникационного одномодового оптического волокна G.652 в качестве чувствительного элемента и сенсора в системе. В основу измерения положены изменения свойств света либо увеличение потерь оптического волокна.

Разработанный вариант на основе интерферометра Маха-Цандера (рисунок 2) показал высокую линейность и точность при проведении измерений и может быть использован для контроля деформации массива после соответствующей доработки его конструкции. По двум сенсорам, основой которых является ОВ, проходит свет, а по третьему волокну свет передается дальше до анализатора системы.

Для проведения натурных испытаний и последующего создания опытного образца в строительной лаборатории на базе Карагандинского технического университета были проведены лабораторные исследования, и разработан лабораторный стенд на основе волоконно-оптической системы контроля деформации железобетонных конструкций (бетонной крепи). Стенд позволяет отработать различные типы системы измерения на основе оптических волокон. Исследовались изменения свойств света, проходящего по сердцевине ОВ при механическом воздействии как кратковременно, так и при долговременном режиме, при этом фиксировались изменения фаз, амплитуды, интенсивности, дополнительных потерь оптического излучения, поляризации, уровня оптического рассеяния и частоты. Воздействие имитируется при помощи испытательной машины МИИ – 100. Также лабораторные образцы бетонных балочек были испытаны на прессе гидравлическом измерительном ПГИ – 500, который предназначен для испытания на прочность.



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

Рисунок 2 - Метод идентификации механических воздействий на основе оптического интерферометра

По результатам испытаний, проведя аппроксимацию, были построены графики зависимости потерь оптического волокна с длинами волн 1310 и 1550 нм при пошаговом увеличении давления. Получена математическая совокупность, которая позволяет определить дополнительные потери в зависимости от приложенной весовой нагрузки, выбрана квадратичная аппроксимация, при которой достигнут наиболее высокий информационный критерий Акаике -53,6639:

$$0,0000237653P^2 + 0,0721934P + 25,2609 = A,$$

где А – оптические потери, бД,

Р – приложенный вес, Н.

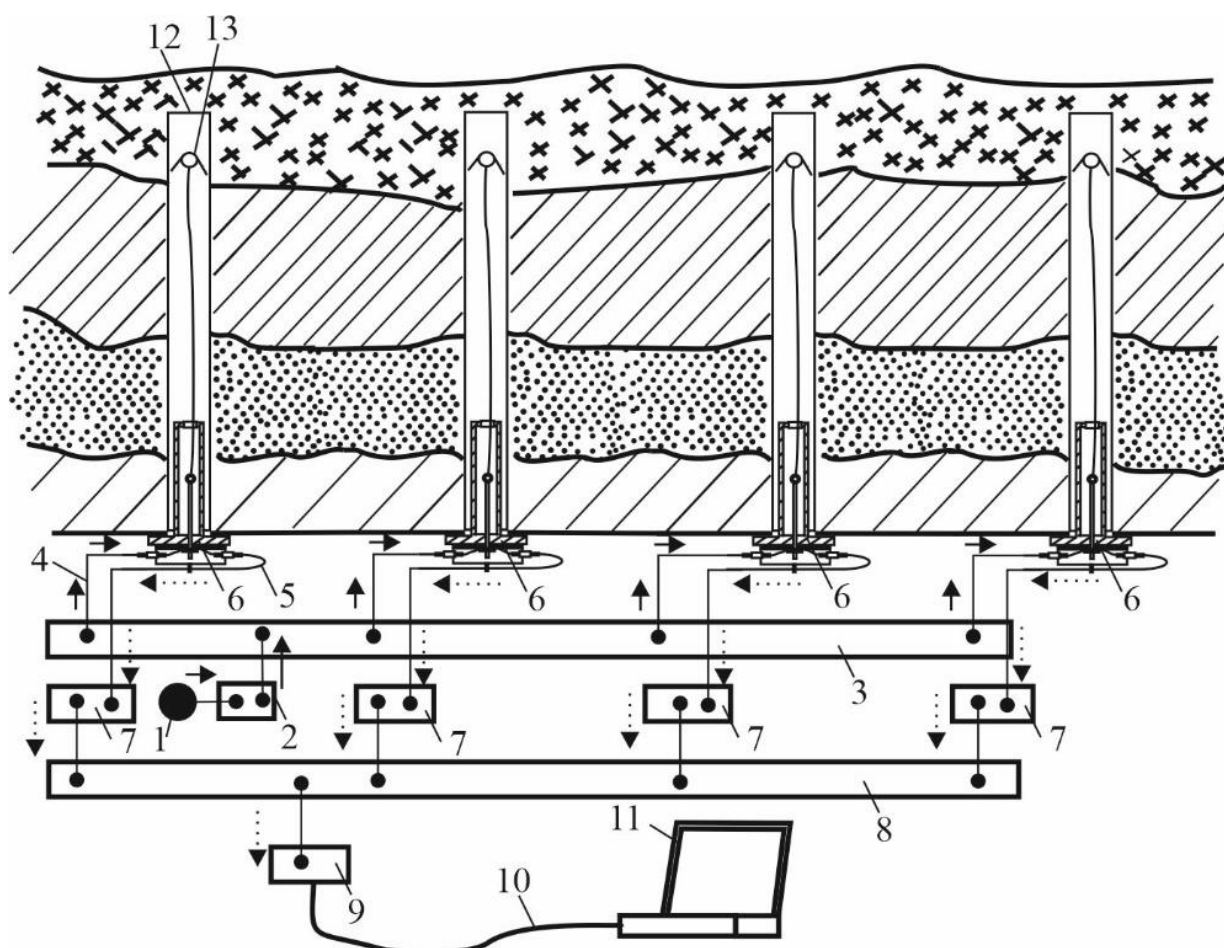
Также сделан вывод о нежелательности использования волокна с серии Ultra, так как оно имеет более низкую чувствительность к изгибу. При исследовании арочной металлической крепи были разработаны схемы систем с использованием оптического ваттметра и оптического рефлектометра Yokogawa AQ1200E. На полученных рефлектограммах можно определить расстояние до места приложения давления.

Четвертая глава посвящена разработке датчика и аппаратно–программного комплекса для контроля идентификации геотехнического состояния.

В настоящий момент времени контроль горного давления выработок, закрепленных анкерной и арочной крепью, проводится с помощью реперных станций двойной или тройной высоты, а также визуальными и инструментальными наблюдениями с участием маркшейдеров. По результатам измерений на реперных станциях, установленных на различных участках забоя, сделан вывод, что особое внимание необходимо уделить контролю за горным давлением в местах сопряжения, на выработках с анкерным креплением.

Предложенная система способна с высокой точностью измерять изменение горного давления и смещение пород кровли в условиях взрывоопасной среды. Для ее создания не требуется дорогостоящее оборудование, связанное с использованием спектроанализаторов и рефлектометров, что позволит существенно снизить стоимость волоконно-оптической системы по сравнению с зарубежными аналогами. Датчик, входящий в разработанную систему, по конструкции схож с реперными станциями, но позволяет осуществлять оперативный и непрерывный контроль и архивирование изменения напряженного состояния на контролируемом участке массива горных пород, предоставляет количественную оценку напряженного состояния, являясь при этом искро- и взрывобезопасным.

Предложенная ВОС состоит из источника когерентного излучения 1 с длиной волны в пределах 650 нм мощностью 30 мВт, поляризатора и оптического изолятора 2, оптического разветвителя 3, прямого и обратного волокна 4 и 5, ВОД 6, фотоприемника 7, устройства предварительной обработки данных 8, устройства согласования с компьютером, соединительных кабелей 9 и 10, а также персонального компьютера с программным обеспечением 11, шнура с фиксирующим элементом 12 и 13 (рисунок 3).



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

Рисунок 3 – Структурная схема волоконно-оптической системы контроля идентификации

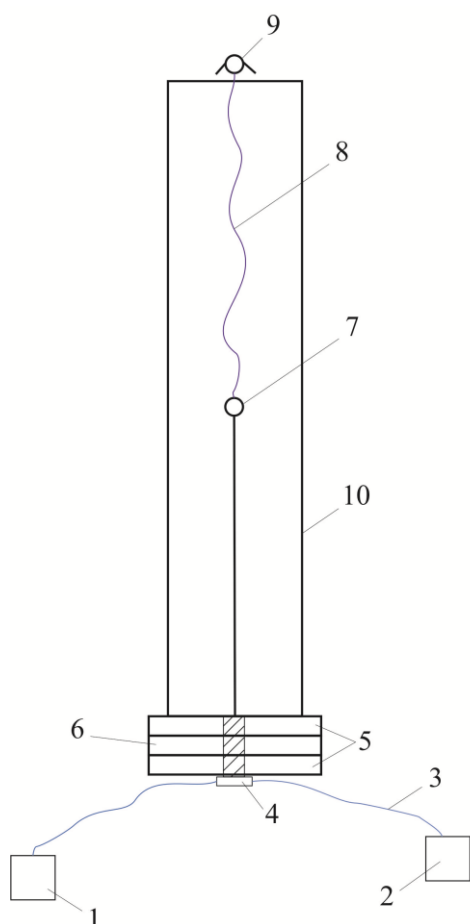
В лабораторной версии ВОС используется видимый диапазон красного света, в будущем возможно перейти на диапазоны 1310 или 1550 нм для увеличения протяженности измерительной системы свыше 30 км. Теоретическая протяженность настоящей направляющей линии ВОС составляет 30 км, что вполне достаточно для контроля самых удаленных точек шахты или рудника. Для снижения помех от источника излучения используется оптический поляризатор и изолятор 2. Оптическое излучение разделяется в равных пропорциях в оптическом разветвителе 3, с его помощью происходит разделение оптической мощности излучения источника в пропорции $\frac{1}{4}$. Все присоединения ВОД выполняется при помощи стандартных универсальных адаптеров UPR 2.5 мм и оптических коннекторов типа SC. ВОД подключен при помощи двух оптических волокон прямого и обратного направления движения оптического сигнала 4 и 5 соответственно. ВОД на схеме представлен позицией 6. Направления движения световой волны к ВОД показаны сплошной стрелкой, пунктиром движение световой волны в сторону фотоприемника 7, который фиксирует все изменения

интенсивности и формы светового пятна. ВОСМ содержит четыре ВОД и соответственно четыре фотоприёмника на каждый канал. Все четыре фотоприёмника подключены в устройство предварительной обработки данных 8. Далее уже электрический сигнал через устройство согласования 9 соединяется через соединительный кабель 10 с компьютером 11. ВОД размещается в шпуре 12, пробуренным в кровле горной выработки. В шпуре располагается фиксирующий элемент 13, к которому прикреплен трос одним концом, вторым концом трос крепится к воздействию элементу ВОД.

Конструкция разработанного волоконно-оптического датчика представлена на рисунке 4. ВОД по своей конструкции отличается простотой исполнения, низкой себестоимостью, имеет ряд общих элементов с типовой конструкцией реперной станции, но отличается более высокой точностью идентификации смещений, при этом не имеет сложных технологических деталей. Отличительной особенностью является использование оптического волокна в качестве чувствительного элемента и как направляющей системы связи между датчиком и устройством обработки. Основным преимуществом является взрывобезопасность и энергопассивность, что позволяет использовать в любых взрывоопасных средах. ВОД, имплантированный в шпур и кровлю горной выработки, может контролировать состояние пластов горных пород и применяться для контроля движения пластов кровли. Шпур имеет длину от 3 до 7 метров, соответственно можно в одном шпуре размещать до трех ВОД, что при необходимости позволит повысить точность измерения и контроля на проблемных участках призабойных выработок, находящихся в опасности внезапного обрушения кровли. Присоединение датчика к направляющей системе осуществляется посредством использования стандартных телекоммуникационных коннекторов типа SC, что исключает проведение сварки волокна в условиях взрывоопасной атмосферы.

Был проведен ряд экспериментов по определению потерь мощности оптического излучения, проходящего по плечам ВОД, при различном значении смещения датчика. Измерение значений перемещений датчика осуществлялось многократно с последующей обработкой данных эксперимента. Лабораторный образец ВОД показал высокую линейность и точность при проведении измерений.

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



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

**Рисунок 4 – Конструкция
волоконно-оптического датчика**

Программно-аппаратный комплекс для системы идентификации геотехнического состояния горных выработок с использованием распределенной системы волоконно-оптических сенсоров создан на графическом языке программирования «G» в среде разработки LabVIEW 2018. Программа имеет 4 окна, но их количество может изменяться до 8. Для распознавания и последующего анализа видеопотока с веб-камер использован модуль машинного зрения Vision Development. Интерфейс аппаратно-программного комплекса показан на рисунке 5.

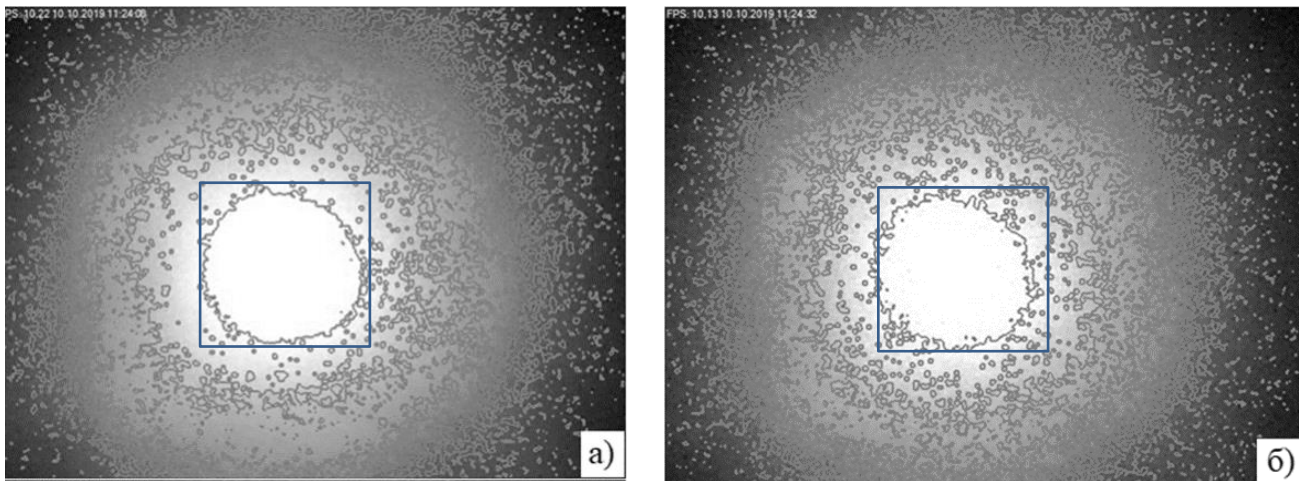
Аппаратно-программный комплекс настраивается путем проведения натурных экспериментов, при этом устанавливаются параметры: пороговое значение срабатывания 1, количество событий в течение заданного времени 2 и период времени 3, в течение которого измеряемый параметр превышает пороговое значение. Значение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



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

Рисунок 5 – Интерфейс аппаратно-программного комплекса

Дифракционные пятна в состоянии покоя горной выработки и после фиксирования изменения геотехнического состояния представлены на рисунке 6. При настройке начальных параметров было установлено пороговое значение 140 пикселей, что соответствует давлению горного массива 15 МПа (измерение проводилось при помощи измерительной системы гидравлической стойки) (рис.6, а). После срабатывания предупреждающего звукового сигнала количество пикселей составило 165, что соответствует изменению смещения на 7 мм, давление при этом составило 17 МПа (рис.6, б). Характер пятен позволяет сделать вывод, что зависимости, полученные при лабораторных экспериментах, соответствуют полученным при натурных.



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

Рисунок 6 – Дифракционные пятна

По апертуре заметно, что при деформации ОВ световое пятно меняет свою форму, что отражается во второй вкладке программы аппаратно-программного комплекса. Происходит сравнение диаметра дифракционного пятна в пикселях, если количество пикселей уменьшается после изменения моды света, то счетчик срабатывает и происходит фиксация времени, а также звуковое сопровождение.

При исследованиях функционирования комплекса были получены зависимости изменения потерь в оптическом волокне (зависящего от изменения количества пикселей дифракционного пятна) от приложенного давления на волоконно-оптический датчик. График зависимости представлен на рисунке 7.

Предложенный способ контроля геотехнического состояния горных выработок реализуется путем сравнения апертур световых пятен. Метод включает в себя регистрацию, обработку и анализ оптических изображений.

Также была получена зависимость интенсивности света от приложенного давления (рисунок 8).

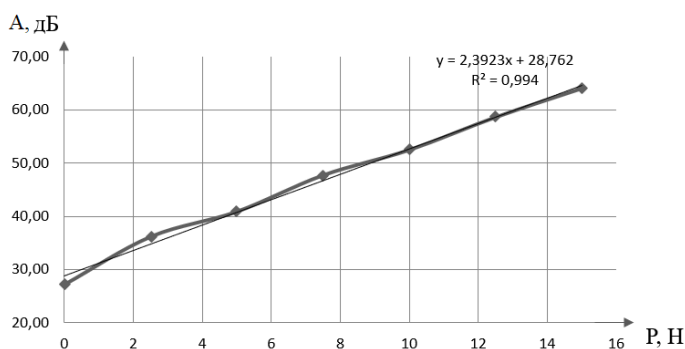


Рисунок 7 – График зависимости потерь от приложенного давления

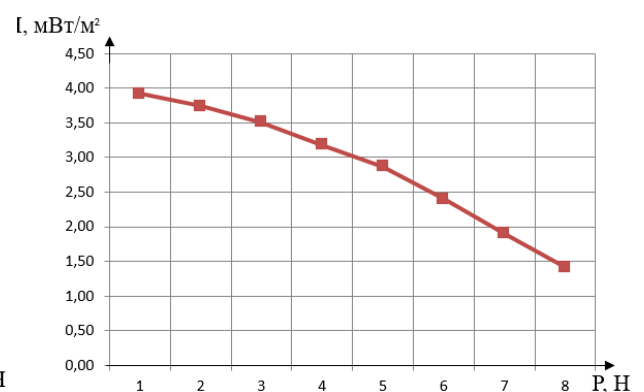


Рисунок 8 – График зависимости интенсивности света от приложенного давления

Методика проведения контроля идентификации геотехнического состояния основана на численной оценке изменения параметров оптической волны,

проходящей через ОВ при механическом воздействии на него с учетом фотоупругого эффекта и температурной коррекции, что позволяет осуществлять одновременный контроль в нескольких десятках точек измерений в автоматическом режиме.

Длительные наблюдения за проявлениями горного давления показали достаточно острую проблему внезапной деформации крепи, приводящую к существенному сокращению ее сечения, поэтому разработанный аппаратно-программный комплекс является более точным инструментом контроля идентификации горного давления, что позволяет при первоначальных его изменениях проводить упреждающие мероприятия по усилению крепления выработок, предотвращая случаи обрушения и деформации арочной крепи.

К преимуществам аппаратно-программного комплекса с волоконно-оптическими датчиками можно отнести оперативность и непрерывность контроля в режиме реального времени, количественную оценку напряженно-деформированного состояния горной выработки, помехозащищенность каналов от температурного воздействия, искро- и взрывобезопасность, высокую степень защиты от агрессивного влияния окружающей среды шахты, мониторинг и архивирование изменения напряженного состояния на контролируемом участке, а также возможность вести разработку конфигурации и вносить изменения в автономном режиме (не останавливая процесса управления), возможность менять вышедшее из строя оборудование без отключения питания, низкое энергопотребление, более высокую точность по сравнению с существующими реперными станциями.

Разработанный аппаратно-программный комплекс на основе волоконно-оптического датчика был представлен на заседании технологической службы шахты им. Костенко Угольного департамента АО «Арселор Миттал Темиртау», протокол и заключение о возможности использования. Производительность системы контроля идентификации геотехнического состояния была опробована в полевых условиях на руднике «Нұрқазған» филиала ТОО «Корпорация Казахмыс» ПО «Карагандацветмет».

Заключение

В полном объеме решены поставленные задачи:

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

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

3. Смоделирован процесс воздействия горного давления на элементы крепи и определение параметров данного воздействия с использованием программы, основанной на методе конечных элементов ANSYS STATIC STRUCTURAL. Моделирование показало, что дополнительные потери импульса световой волны увеличиваются при таком радиусе изгиба, который является критическим, когда волоконный проводник находится на грани механического повреждения.

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

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

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

Список публикаций по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Нешина, Е.Г. Использование оптического волокна G-652 для контроля горного массива угольных шахт / А.Д. Мехтиев, А.В. Юрченко, Е.Г. Нешина, А.Д. Алькина // Вестник ЮурГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. — 2020. — №20. — С. 144-154.
2. Нешина, Е.Г. Физические основы создания датчиков давления на основе изменения коэффициента преломления света при микроизгибе оптического волокна / А. Д. Мехтиев, А. В. Юрченко, Е. Г. Нешина [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2020. — Т. 63, № 2. — С. 129-136.
3. Нешина, Е.Г. Волоконно-оптическая система контроля геотехнических параметров горной выработки / А.Д. Мехтиев, А.Д. Алькина [и др.] // Омский научный вестник. 2021. — № 1 (175). — С. 64–68.
4. Нешина, Е.Г. Обеспечение безопасности горных работ с использованием волоконно-оптической системы / А.Д. Мехтиев, А.Д. Алькина [и др.] // Вестник ТОГУ. 2021. — № 1 (60). — С. 13-22.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus

1. Neshina, Y.G. The Model of a Fiber-Optic Sensor for Monitoring Mechanical Stresses in Mine Working / A.V. Yurchenko, A.D. Mekhtiyev, Y.G. Neshina, F.N. Bulatbayev, A.D. Alkina // Russian Journal of Nondestructive Testing. — 2018. — Vol.54. — No.7. — Pp. 528-533.
2. Neshina, Y.G. Nondestructive Testing for Defects and Damage to Structures in Reinforced Concrete Foundations Using Standard G.652 Optical Fibers / A.D. Mekhtiyev, A.V. Yurchenko, Y.G. Neshina, A.D. Alkina, A.K. Kozhas, S.R. Zholmagambetov // Russian Journal of Nondestructive Testing, Yekaterinburg: Pleiades Publishing Ltd. — 2020. — Vol.56, No. 7. — Pp. 179–190.
3. Neshina, Y.G. Research of Mechanical Stress at Tension of Quartz Optical Fiber (QOF) / A.D. Mekhtiyev, A.A. Kovtun, V.V. Yugay, E.G. Neshina, R.Zh. Aimagambetova, A.D. Alkina // Metalurgija. — 2020. — № 60. — Pp. 121-124.
4. Neshina, Y.G. The Questions of Development of Fiber optic Sensors for Measuring Pressure with Improved Metrological and Operational Characteristics / A. Yurchenko, A. Alkina, A. Mekhtiev, F. Bulatbayev, Y. Neshina // MATEC Web of Conferences. — 2016. — №79. — Pp. 1-5.
5. Neshina, Y.G. 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 Publishing IOP Conf. Series: Journal of Physics. — 2017. — 881. — Pp. 1-5.
6. Neshina, Y.G. Some Issues Of The Quality Control System Development For Telecommunications Services / A.V. Yurchenko, Y.G. Neshina, T.G. Serikov, A.D. Alkina // VIII International Scientific and Practical Conference «Information and Measuring Equipment and Technologies». — 2018. — V. 155. — Pp. 1-5.

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

8. Neshina, Y.G. Passive Perimeter Security Systems Based On Optical Fibers Of G 652 Standard / A. Yurchenko, A. Mekhtiyev, Y. Neshina, A. Alkina, V. Yugai // V Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT. — 2019. — V.7, Issue 1. — Pp. 31-36.

9. Neshina, Y.G. Investigation Of Additional Losses In Optical Fibers Under Mechanical Action / A.V. Yurchenko, A.D. Mekhtiyev, Y.G. Neshina et al. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — №516. — Pp. 1-5.

10. Neshina, Y.G. Comparing Methods of Controlling Unauthorized Access to Fiber-optic Transmission Lines / A.V. Yurchenko, A.D. Mekhtiyev, Y.G. Neshina, T.N. Shaigarayeva, A.D. Alkina // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. — 2019. — №1327. — Pp. 1-5.

Публикации в других научных изданиях

1. Нешина, Е.Г. Краткий сравнительный анализ эффективности использования сенсорной сети в горнодобывающей промышленности для мониторинга персонала и технологического оборудования / А.Д. Мехтиев, Е.Г. Нешина, С.Е. Алиакпаров и др. // Materials Of The Xii International Scientific And Practical Conference. — 2016. — Pp. 27-31.

2. Нешина, Е.Г. 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». — 2017. — С.36-41.

3. Нешина, Е.Г. Оптимизация волоконной оптики для автоматизации угольных шахт / А.Д. Мехтиев, Е.Г. Нешина, О.А. Нуржанова // Materialy XIII Miedzynarodowej naukow-i-praktycznej konferencji , «Perspektywiczne opracowania są nauką i technikami – 2017» . — 2017. — V.6. — Pp. 38-41.

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

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

6. Нешина, Е.Г. Пассивные системы охраны периметров на основе оптических волокон / А.В. Юрченко, А.Д. Мехтиев, Е.Г. Нешина, А.Д. Алькина //

Труды Междунар. Науч.-практ. Конф. «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации». — 2018. — №1. — С. 293-295.

7. Нешина, Е.Г. Применение оптического волокна для обеспечения безопасности горных выработок / А.В. Юрченко, Е.Г. Нешина // Труды V Международной научно-практической конференции «Global Science And Innovations 2019: Central Asia». — 2019. — С. 23-26.

8. Нешина, Е.Г. Некоторые вопросы разработки волоконно-оптических систем охраны периметров распределённого типа / А.Д. Мехтиев, А.Д. Алькина, Е.Г. Нешина // Труды VIII Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики». — 2019. — С. 357-362.

9. Нешина, Е.Г. Инновационные методы мониторинга дефектов и повреждений строительных конструкций и лабораторные исследования / А.Д. Мехтиев, Е.Г. Нешина, А.К. Қожас, Р.К. Кикнадзе, А.Т. Мухамеджанова // Труды университета. — 2020. — №3. — С.88-94.

Свидетельства о государственной регистрации прав на объект авторского права

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

2. Свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права 1445. Направляющие системы электросвязи и оптоволоконная техника связи / Нешина Е.Г., Мехтиев А.Д., Югай В.В., Мадиди П.Ш., Алькина А.Д.; опубл. 24.01.2019.

3. Свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права 5832. Схемы построения волоконно-оптических систем охраны периметров распределённого типа / Мехтиев А.Д., Алькина А.Д., Нешина Е.Г.; опубл. 16.10.2019.

4. Свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права 8475. Результаты научных исследований по разработке волоконно-оптических систем охраны периметров распределённого типа / Алькина А.Д., Мехтиев А.Д., Нешина Е.Г., Югай В.В., Ковтун А.А.; опубл. 02.03.2020.

5. Свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права 8476. Результаты научных исследований по разработке волоконно-оптических систем контроля технического состояния строительных конструкций и протяженных объектов / Мехтиев А. Д., Ковтун А.А., Нешина Е. Г., Алькина А. Д. и др.; опубл. 02.03.2020.

6. 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 / Мехтиев А.Д., Нешина Е.Г., Мадиди П.Ш. и др.; опубл. 13.03.2020.

Патенты:

1. Пат. На полезную модель РК 3852. Способ измерения температурного распределения в объекте и устройство для его осуществления / Мехтиев А.Д., Нешина Е.Г., Югай В.В., Алькина А.Д., Шайгараева Т.Н.; заявл. 23.01.2019; опубл. 05.04.2019.

2. Пат. На полезную модель РК 4220. Волоконно-оптический датчик измерения деформации металлических и не металлических поверхностей / Мехтиев Р.А., Нешина Е.Г., Мехтиев А.Д., Алькина А.Д., Югай В.В.; заявл. 28.03.19; опубл. 01.08.2019.

3. 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.

4. 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.

5. Пат. На полезную модель РК 5043. Волоконно-оптическая система охранной сигнализации / Мехтиев Р.А., Нешина Е.Г., Мехтиев А.Д., Алькина А.Д., Мади П.Ш., Югай В.В., Ковтун А.А.; заявл. 05.12.2019; опубл. 12.06.2020.

Монографии

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