

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 681.586'326:622.248.381

РАЗРАБОТКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ КВАЗИРАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СМЕЩЕНИЙ ПЛАСТОВ КРОВЛИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

**А. Д. Мехтиев^{1,3}, Е. Ж. Сарсикеев¹, Е. Г. Нешина²,
А. Д. Алькина², М. Ж. Мусагажинов¹**

¹Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина,

E-mail: barton.kz@mail.ru, просп. Женис, 62, 010000, г. Нур-Султан, Казахстан

²Карагандинский технический университет,

E-mail: 1_neg@mail.ru, просп. Н. Назарбаева, 56, 100012, г. Караганда, Казахстан

³Томский политехнический университет,

просп. Ленина, 30, 634050, г. Томск, Россия

Приведены результаты исследований по разработке нового метода и оригинальных технических решений для контроля геотехнического состояния горных выработок. Представлен подробный анализ литературы и современных разработок по рассматриваемой тематике. Предложена конструкция волоконно-оптического датчика смещения, входящего в систему мониторинга, отличающаяся простотой исполнения. Принципиальным отличием от применяемых на угольных предприятиях реперных станций является использование одномодового волокна в качестве чувствительного элемента. Разработанный аппаратно-программный комплекс позволяет повысить эффективность контроля и обеспечения безопасности ведения горных работ. Предложенный способ идентификации геотехнического состояния горных выработок реализуется путем сравнения апертур световых пятен.

Оптическое волокно, давление, кровля, горная выработка, безопасность, волоконно-оптические датчики

DOI: 10.15372/FTPRPI20220216

Карагандинский угольный бассейн обладает значительными запасами каменного угля, объемы которого составляют 9 млрд т и до конца не изведаны. По прогнозам ученых, при нынешнем темпе добычи запасов хватит до 300 лет. Уголь потребляется электростанциями и металлургическим производством, а также химической промышленностью. В настоящий момент времени добыча коксующегося угля осуществляется подземным способом, для нужд энергетики — с помощью открытых разработок. Шахты Карагандинского угольного бассейна относятся к сверхкатегорийным и опасным по внезапному выбросу метана и угольной пыли, поэтому необходимо использовать

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP09058149).

специализированное взрывозащищенное оборудование с искробезопасными цепями. Обеспечение безопасности проведения горных работ при добыче угля — важный вопрос современного производства [1–3]. С увеличением глубины горных работ возрастают нагрузки на крепь, что увеличивает ее стоимость, а это в конечном итоге ведет к повышению стоимости добываемого полезного ископаемого. Для оценки наиболее экономически выгодного варианта крепления горных выработок требуется набор метрологических и измерительных средств контроля параметров горного давления. Это позволит не только выбрать наиболее приемлемый в экономическом и рациональный в техническом планах паспорт крепления, но и своевременно определить изменение горного давления для принятия мер по усилению конструкции крепи горных выработок, что предотвратит ее разрушение. В большинстве случаев на шахтах Карагандинского угольного бассейна используется металлическая арочная и анкерная крепи.

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

На угольных шахтах Карагандинского угольного бассейна контроль смещений пород и состояния крепи горных выработок осуществляется при помощи известных инструментальных методов, которые не могут обеспечить непрерывности контроля. В арсенале маркшейдеров имеются реперные станции, по которым отслеживается смещение пород кровли. Контроль необходимо вести путем обхода и записи изменения параметров в журнал сотрудниками маркшейдерской службы. Так как реперные станции расположены в своде выработки, считывать показания затруднительно. Пока еще не внедрены автоматические измерительные средства, способные определять смещения и давление горной породы на арочную крепь в режиме реального времени [4–6]. По мере продвижения очистного забоя по угольному пласту горное давление на крепь призабойных выработок может резко возрасти, что приводит к деформации ее элементов. Необходимо создание современных цифровых автоматических измерительных систем, способных работать в условиях взрывоопасной среды. С аналогичными проблемами автоматического контроля горного давления и смещений пород кровли сталкиваются и на других горных предприятиях.

Волоконно-оптические датчики (ВОД) оценивают не только горное давление и смещения пород свода горной выработки, но и давление воды, состав шахтной атмосферы, температуру угольных пластов. При помощи ВОД на основе волоконной брэгговской решетки определяется давление воды в системах трубопроводов [1]. В [2] представлены результаты разработок ВОД, контролирующих давление пород верхних слоев выработки на поддерживающую и ограждающую шахтную крепь. Исследована распределенная оптоволоконная система измерения деформаций пород, которая выполняет автоматический мониторинг геотехнического состояния подземных выработок [3]. Теоретические разработки в области контроля напряженно-деформированного состояния пород горных выработок представлены в [7]. Ряд статей посвящен интеллектуальным ВОД [8, 9]. Рассмотрен опыт создания лабораторных образцов ВОД на основе решеток Брэгга, способных заменить устаревшие реперные станции [10]. Приведены сведения о разработке ВОД для мониторинга геотехнического состояния горных выработок угольных шахт [11].

Применение решеток Брэгга усложняет конструкцию ВОД, так как требуется анализ оптического спектра излучения в диапазоне 1100–1500 нм [12]. Проблемы создания ВОД при разработке системы мониторинга проанализированы в [13]. Авторам [14] удалось создать действующий образец ВОД и провести его испытания. В [15] для реализации ВОД использован интерферометр Маха–Цендера [15]. Отмечена проблема теплового шума в измерительном канале при изменении температуры, что приводит к колебаниям фазы распространения оптиче-

ского сигнала [16]. В [17] приведены результаты исследования специальных типов оптических волокон для ВОД. Проанализированы вопросы, посвященные разработке ВОД для структурного мониторинга инженерных сооружений [18]. Изучены автоматизированные измерительные системы (АИС), построенные на основе методов оптической рефлектометрии. Практическая реализация данных методов сопряжена со значительными техническими проблемами и материальными вложениями, что не позволяет внедрить АИС на горных предприятиях. Проводились исследования, направленные на упрощение конструкции датчиков давления с микроструктурированными оптическими волокнами [19]. Результаты практической апробации ВОД на основе решеток Брэгга в условиях угольных шахт Китая обсуждаются в [20]. Использование решеток Брэгга сопряжено с применением дорогостоящего оборудования, что увеличит в несколько раз стоимость одной точки измерения по сравнению с существующими реперными станциями.

Проведенный анализ мировых достижений и подходов к решению проблем автоматического контроля горного давления и смещений пород кровли выработки показывает целесообразность использования волоконно-оптических датчиков [21]. Необходимо искать пути, позволяющие снизить стоимость ВОД и АИС в целом.

В [21] представлен аппаратно-программный комплекс, который способен производить анализ данных, полученных по изменению пикселей светового пятна, падающего на поверхность телевизионной матрицы, что является принципиальным отличием от существующих в мире аналогов. Использование одномодового оптического волокна позволяет увеличить дистанцию от места установки ВОД до блока обработки данных. Одномодовое оптическое волокно характеризуется ступенчатым профилем, описывается распределением Гаусса: световое пятно содержит значительную долю шума, особенно при изменении температуры, что затрудняет процесс измерения. При помощи интеллектуальной обработки полученных данных с использованием специализированного аппаратно-программного комплекса можно решить указанные проблемы. Описание ВОД и аппаратно-программного комплекса, преимущество использования оптического волокна G-652 для контроля горного массива угольных шахт представлено в [22]. Предложенная АИС обеспечивает измерения нескольких параметров одновременно в автоматическом режиме и способна при резком изменении горного давления и смещений пород свода выработки подавать предупреждающие сигналы дежурному персоналу.

Волоконно-оптическая квазираспределенная система, по сравнению с распределенной системой на основе решеток Брэгга, имеет большее количество оптических проводников, но проще по своему конструктивному исполнению и дешевле, что может быть решающим фактором для принятия решения о ее внедрении на угольных шахтах Карагандинского угольного бассейна.

Преимуществом данного вида разработок также является энергопассивность волоконно-оптических датчиков: используется не электрический ток, а световая волна, что позволяет размещать датчики во взрывоопасной среде горной выработки и решить основную проблему безопасности эксплуатации, так как световая волна не способна спровоцировать взрыв. Это обстоятельство исключает наличие взрывозащищенных оболочек у датчиков, а также упрощает их присоединение к кабелю связи. Устройство обработки данных и вывода информации будет находиться на поверхности. Протяженность измерительных каналов может составлять десятки километров, затухание сигнала менее 0.2 дБ/км, что недостижимо для измерительных систем, передающих сигналы по электрическим кабелям.

Меньшая стоимость одной точки измерения и более высокий уровень взрывобезопасности создают перспективы внедрения на угольных шахтах волоконно-оптических систем мониторинга горного давления и смещения пластов кровли. С помощью оптических волокон можно измерять, например, состав шахтной атмосферы, а также температуру угольных пластов. Важ-

ный момент разработки волоконно-оптических систем — возможность создания эффективных методов обработки сигналов, так как протяженные волоконно-оптические каналы характеризуются достаточно высоким уровнем генерации помех, особенно при изменении внешней температуры среды вокруг датчика или направляющей системы передачи данных.

Использование метода оптической рефлектометрии возможно, но в масштабах горного предприятия и многоканальности потребуются значительные материальные вложения. Выдвинута гипотеза по созданию волоконно-оптического датчика смещения, основанного на контроле параметров отраженной световой волны. Для подключения одного волоконно-оптического датчика смещения используется только один оптический проводник, по которому подается импульс от источника излучения и возвращается назад к блоку обработки данных, где находится фотоприемное устройство — телевизионная матрица. Далее полученная информация об изменении параметров светового пятна обрабатывается аппаратно-программным комплексом, который на основании изменений формирует численные значения параметров смещения.

Цель настоящей работы — разработка волоконно-оптической квазираспределенной системы мониторинга смещения пластов кровли. В систему входит датчик, который является первичным преобразователем, позволяющим контролировать изменение геотехнических параметров выработки. Его основа — одномодовое кварцевое оптическое волокно, используемое в телекоммуникации для передачи информации.

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЧАСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ КВАЗИРАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ И СМЕЩЕНИЙ ПЛАСТОВ КРОВЛИ

В настоящей статье представлена часть волоконно-оптической квазираспределенной системы мониторинга (ВОСМ), с высокой точностью измеряющая смещения горных пород. В ее конструкции не используются оптический спектроанализатор и решетки Брэгга, что позволяет существенно снизить стоимость ВОСМ по сравнению с зарубежными аналогами. Этот фактор, создает перспективу их внедрения на угольных шахтах и замены устаревших реперных станций. Стоимость одной точки измерения составляет около 90 долл. США, при массовом производстве датчиков возможно ее снижение. Разница в 20–30 долл. США является не существенной в сравнении с изготовлением, монтажом и обслуживанием реперной станции.

Использование ВОСМ позволит сделать определенные шаги в цифровизации процесса добычи угля. На один измерительный канал приходится два оптоволоконка. По одному оптическому волокну световая волна распространяется в прямом направлении, а по второму — обратно к блоку обработки данных. В зарубежных аналогах применяется одно оптоволоконко, на котором размещается группа датчиков, это позволяет построить распределенную измерительную часть и сократить количество оптических проводников в кабеле направляющей системы связи. В зарубежных источниках не отмечено, что сварочные работы в угольных шахтах запрещены, осуществляются все соединения при помощи оптических коннекторов, а также не указано, как данные элементы повлияют на работу ВОСМ.

В разработанной системе присоединения ВОД выполняются при помощи стандартных универсальных адаптеров UPR 2.5 мм для подключения к разъемам типа SC, что гарантирует полную взрывобезопасность при проведении монтажных работ. Измерительная часть схемы ВОСМ работает от источника излучения мощностью 30 мВт, генерирующего когерентную световую волну 650 нм видимого диапазона (рис. 1).

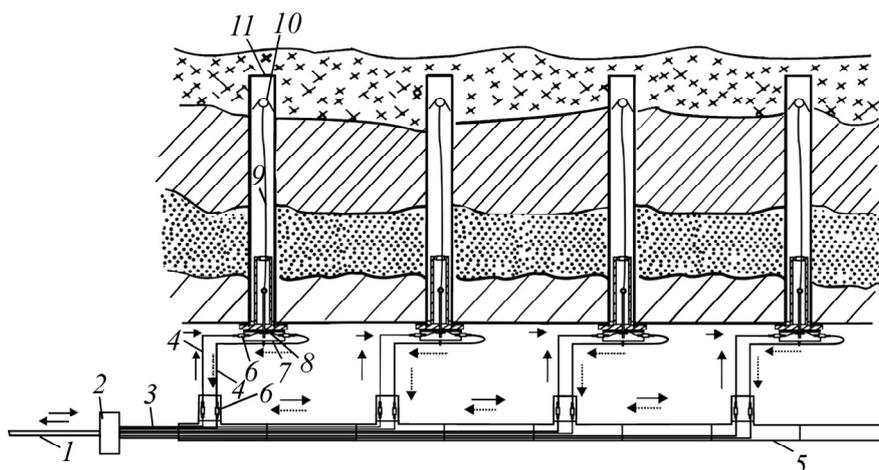


Рис. 1. Конструкция датчика ВОСМ (пояснения в тексте)

В лабораторной версии ВОСМ используется видимый диапазон красного света. В будущем возможно перейти на диапазоны 850 или 900 нм для увеличения протяженности измерительной системы свыше 30 км. Теоретическая протяженность настоящей направляющей линии ВОСМ составляет 30 км, что вполне достаточно для контроля самых удаленных точек шахт. Количество оптических проводников выбирается в зависимости от количества точек измерения и протяженности горной выработки. Например, если реперные станции устанавливаются в призабойных выработках через каждые 20 м, необходимо использовать два оптоволоконна на одну точку измерения. При использовании телекоммуникационного кабеля с числом оптического волокна, равным 120, количество точек измерения составит 60. В случае, если этого недостаточно, можно использовать два кабеля. Волоконно-оптический кабель нечувствителен к электромагнитным помехам, что позволяет размещать его на элементах крепления силовых кабелей, расположенных на бортах выработки.

В качестве направляющей системы используется бронированный волоконно-оптический кабель 1, который присоединяется к оптическому кроссу 2, далее от него отходят оптические проводники измерительных каналов прямого и обратного направлений движения световой волны 3. Датчики присоединяются при помощи оптических патч-кордов 4. Оптические проводники 3 укладываются в защитный короб 5. Все присоединения датчиков выполняются при помощи оптических коннекторов 6. В корпусе датчика 7 находится чувствительный элемент 8. Конструкция датчика имеет сходство с реперной станцией, что существенно удешевляет его стоимость. В шпур 11 помещается крепежная скоба 10, которая распирается при помощи пружины. Крепежная скоба 10 соединяется с чувствительным элементом 8 при помощи троса 9.

Стрелками показано направление распространения световой волны к датчику и от него в сторону блока обработки данных. Принцип действия датчика смещения горных пород достаточно прост и основан на контроле дополнительных потерь в оптическом датчике и изменении свойств световой волны. При смещении горных пород свода выработки в движение приходит пружинный фиксатор 10. Породы кровли при движении утягивают за собой пружинный фиксатор 10, закрепленный на соединительном тросе 9, при натяжении которого осуществляется механическое воздействие на чувствительный элемент 8. Механическое воздействие приводит к изменению свойств световой волны, проходящей через чувствительный элемент 8. Все изменения фиксируются телевизионной матрицей блока обработки данных. Чем больше смещение пород, тем сильнее механическое воздействие на чувствительный элемент.

Конструкция ВОД проста, имеет много общего с типовой реперной станцией, но принципиальным отличием является использование одномодового волокна в качестве чувствительного элемента (рис. 2). При изменении горного давления и возникновении смещений слоев в кровле выработки происходит механическое воздействие на волоконно-оптический сенсор 1. Данное воздействие осуществляется при смещении пружинного фиксатора 2, который размещается в определенной зоне пробуренного в кровле выработки шпура для фиксации положения троса 4. Направляющий трубчатый элемент 3 позволяет правильно разместить датчик внутри шпура 15. Трос крепится к шпильке 5 при помощи проушины 6. Волоконно-оптический сенсор 1 расположен между подвижной стальной шайбой 7 и упругим элементом 8 с одной стороны и неподвижной стальной шайбой 9 с другой. Приходящая по прямому оптическому волокну 10 световая волна проходит через чувствительный элемент 1 и возвращается к фотоприемнику по обратному оптическому проводнику 11. Для присоединения ВОДС используются соединительный адаптер 12 (UPP 2.5 мм) и оптический коннектор 13 типа SC. При воздействии на оптический сенсор 1 изменяется интенсивность отраженной световой волны, которая фиксируется фотоприемником. Полученные изменения в дальнейшем обрабатываются при помощи программного обеспечения.

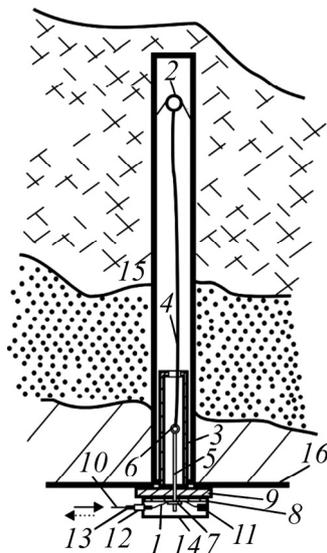


Рис. 2. Конструкция датчика смещения для волоконно-оптической квазираспределенной системы мониторинга: 1 — чувствительный элемент; 2 — пружинный фиксатор; 3 — направляющий трубчатый элемент; 4 — трос; 5 — шпилька; 6 — проушина для крепления троса; 7 — подвижная стальная шайба; 8 — упругий элемент; 9 — неподвижная стальная шайба; 10 — прямой оптический проводник; 11 — обратный оптический проводник; 12 — соединительный адаптер; 13 — оптический коннектор; 14 — защитный корпус датчика; 15 — шпур; 16 — кровля горной выработки

При сдвигении пород кровли выработки происходит смещение пружинного фиксатора 2, который воздействует на чувствительный элемент 1, находящийся между шайбой 7, упругим элементом 8 и стальной шайбой 9. Отраженный от зеркала импульс световой волны проходит через чувствительный элемент 1 и возвращается назад к фотоприемному устройству блока обработки данных. Конструкция ВОДС позволяет создать квазираспределенную систему контроля. Шпур 15 пробуривается в кровле выработки 16.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ КВАЗИРАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ И СМЕЩЕНИЙ ПЛАСТОВ КРОВЛИ

На рис. 3 представлена структурная схема экспериментального образца волоконно-оптической квазираспределенной системы мониторинга смещения пластов кровли.

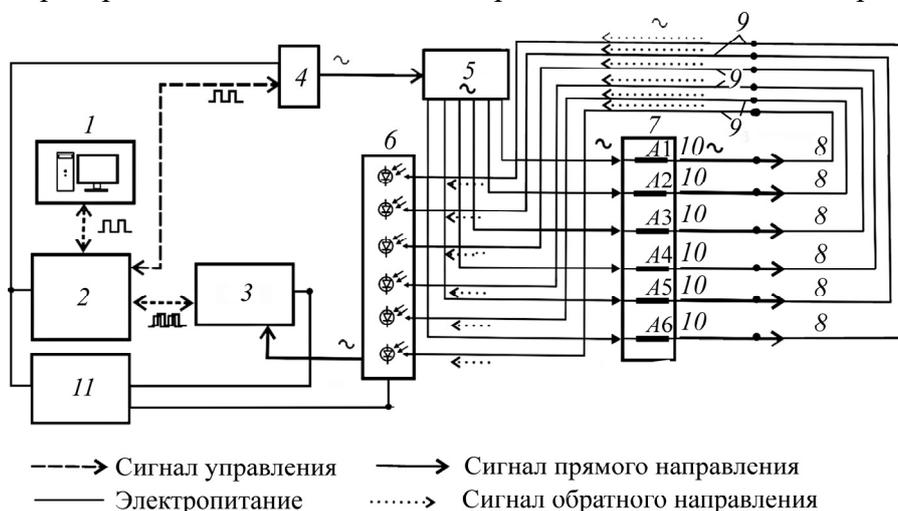


Рис. 3. Блок обработки данных волоконно-оптической квазираспределенной системы мониторинга горного давления и смещения пластов кровли: 1 — персональный компьютер с программным обеспечением и монитором для вывода информации; 2 — аппаратно-программный комплекс обработки сигналов и управления элементами системы; 3 — блок предварительной обработки сигналов и логических операций; 4 — полупроводниковый когерентный лазер; 5 — оптический разветвитель; 6 — фотоприемное устройство; 7 — оптический кросс; 8 — волоконно-оптический датчик квазираспределенной системы мониторинга; 9 — световод обратного направления; 10 — световод прямого направления; 11 — источник электрического питания

Схема работает следующим образом: персональный компьютер 1 выполняет сразу несколько функций, обеспечивает вычислительную мощность для работы программного обеспечения и служит сервером для хранения информации. Волоконно-оптическая квазираспределенная система мониторинга способна не только производить контроль параметров горного давления и смещения пластов кровли, но и отслеживать резкие изменения данных параметров, приводящие к внезапному разрушению выработки. Система подает предупреждающие сигналы в зависимости от скорости изменения параметров и количества воздействий на крепь в течение определенного периода времени. На экране компьютера выводится окно программы для управления и контроля параметров, отображаются кнопки множества функций настройки чувствительности и порога срабатывания сигнализации. Длина измерительного канала до 30 км, количество каналов в теоретическом плане не ограничено, но на практике их может быть до 120 при использовании одного кабеля направляющей системы. Информация, полученная от датчиков 8, передается на блок аппаратно-программного комплекса обработки сигналов и управления элементами системы 2, который контролирует блок предварительной обработки сигналов и логических операций 3. Так же осуществляется управление лазером 4 и контроль параметров излучения. Со всеми указанными блоками имеется обратная связь для повышения уровня автоматического управления всей системой. Источник лазерного излучения 4 работает непрерывно и должен быть обязательно когерентным с длиной волны 650–900 нм. Световая волна от источника когерентного излучения 4 через оптический разветвитель 5 попадает на оп-

тический кросс 7, к которому подключаются измерительные каналы. Прямой импульс проходит по оптическому волокну 10 в прямом направлении, далее через волоконно-оптический датчик квазираспределенной системы 8. Затем световой сигнал возвращается в блок обработки данных по обратному световоду 9. При воздействии на датчик 8 параметры распространяющейся световой волны изменяются. Световая волна падает на чувствительную поверхность телевизионной матрицы, которая находится в фотоприемном устройстве 6, фиксирующем все изменения светового пятна. В блоках 2 и 3 изменения интенсивности светового пятна преобразуются в численное значение смещения горных пород. На каждый канал приходится один фотоприемник (телевизионная матрица высокого разрешения Full HD) и два световода: по одному сигнал распространяется в прямом направлении, по другому — в обратном.

Блок предварительной обработки сигналов и логических операций 3 преобразует аналоговый сигнал при помощи встроенного преобразователя в цифровой. Впоследствии сигнал передается в аппаратно-программный комплекс 2 для анализа. При помощи программного обеспечения контролируются параметры смещения и давления, а также принимается решение о срабатывании или несрабатывании сигнализации на основании заложенных интеллектуальных алгоритмов. Самой важной функцией аппаратно-программного комплекса является анализ помех, которые могут генерироваться в волоконно-оптическом датчике при изменении внешней температуры и случайных колебаний, не совпадающих с частотами воздействия массива пород кровли. Помехами являются различные вибрационные воздействия, например, работа технологического оборудования, что не может быть идентифицировано как резкое изменение давления и возникновение опасных смещений. Система способна обучаться, что позволяет распознавать помехи и более точно определять параметры, воспринимать не только затухание оптического сигнала, изменение интенсивности и фазы распространения по оптическому волокну, но и оценивать все изменения интерференционной картины светового пятна, падающего на поверхность фотоприемника, проводя анализ изменения картины пикселей от черного до белого цвета (рис. 4).

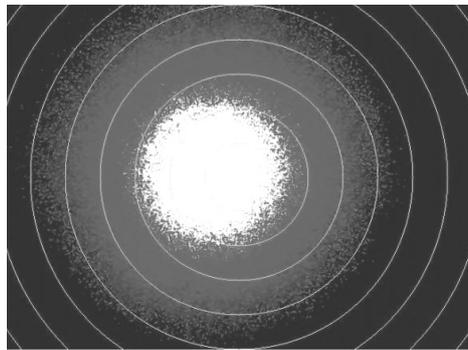


Рис. 4. Интерференционная картина светового пятна, падающего на поверхность фотоприемника

Количество шумов в световом пятне одномодового волокна значительно и зависит от стабильности излучения лазера и температуры окружающей среды. Оптическое волокно имеет ступенчатый профиль светового пятна, подчиняющийся распределению Гаусса. Принцип обработки данных заключается в анализе изменения профиля светового пятна на фоне шума. При механическом воздействии на оптическое волокно картина резко меняется, что и воспринимается программой, при этом все шумовые загрязнения не учитываются. Изображение светового пятна на выходе из оптического волокна имеет более освещенную область в середине и менее освещенную область по краям. На границе образуется область перехода, в которой наиболее

отчетливо наблюдаются шумовые колебания. Данные колебания могут вызвать нарушение адекватности полученных данных измерения и создать значительную погрешность в полученных значениях. Соответственно, огромное значение отводится аппаратно-программному комплексу по обработке данных, который способен исключать временные флуктуации и отслеживать скорость изменения перехода пикселей от черного к белому цвету.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ДАТЧИКА КОНТРОЛЯ СМЕЩЕНИЯ

Лабораторный стенд для испытания датчика контроля смещения представляет собой опытный образец датчика с устройством, имитирующим смещения и горное давление при помощи натяжных муфт (рис. 5). Одновременно контролировались параметры смещений и давления.

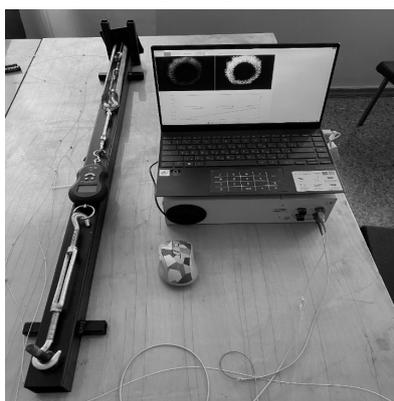


Рис. 5. Стенд для испытаний опытного образца датчика контроля параметров давления смещения

Датчик подключен к блоку обработки данных и содержит источник излучения и телевизионную матрицу. Программное обеспечение установлено на ноутбуке, который размещен на корпусе блока обработки данных и соединен с ним при помощи кабеля USB. Аппаратно-программный комплекс по обработке данных выдает численное значение измеряемой величины, а также визуально представляет изображение светового пятна. При увеличении смещения световое пятно изменяется от практически черного с небольшим количеством белых пикселей в сторону белого. Чем выше уровень механического воздействия на оптическое волокно, а соответственно, и смещения горных пород, тем больше белых пикселей будет содержать изображение светового пятна. Одной из функций программы является подача сигнала тревоги при резком изменении параметров смещения и давления. Это позволит заблаговременно предупредить рабочих об обрушении выработки. Результаты исследования датчика представлены на рис. 6.

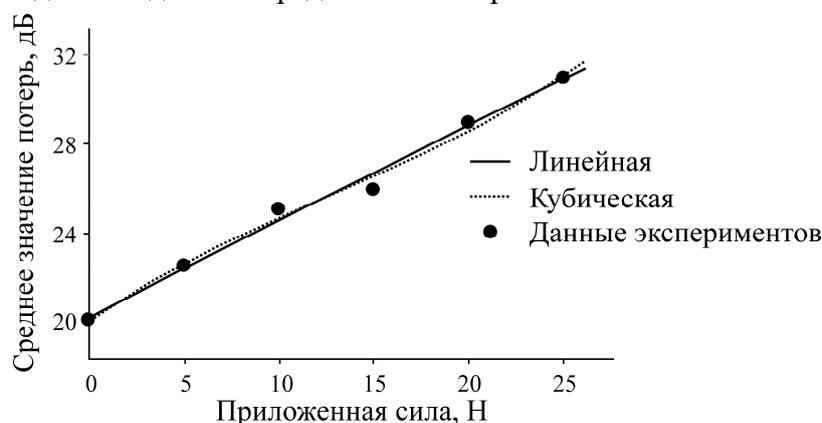


Рис. 6. График зависимости оптических потерь от приложенной силы

Определены дополнительные потери мощности оптического излучения, проходящего по волоконно-оптическому датчику при различной приложенной силе. Измерения осуществлялись многократно с последующей обработкой данных эксперимента и усреднением полученных значений. Результаты экспериментов обработаны с учетом наименьшего значения информационного критерия Акаике (AIC). Получены следующие зависимости:

$A = 0.431429P + 20.1905$ — линейная аппроксимация;

$A = 0.000407407P^3 - 0.015634P^2 + 0.57989P + 20.0079$ — кубическая аппроксимация.

Наилучшим приближением по критерию AIC является линейная аппроксимация. Для нее посчитана абсолютная погрешность — 2.27, относительная погрешность — 8.844 %, коэффициент Стьюдента 2.120 с доверительным интервалом 0.94.

ВЫВОДЫ

Разработана волоконно-оптическая квазираспределенная система мониторинга смещений пластов кровли горной выработки, которая содержит волоконно-оптический датчик и аппаратно-программный комплекс и позволяет в режиме реального времени фиксировать изменения напряженного состояния на контролируемом участке массива горных пород. На основе математического моделирования установлены зависимости изменения потерь мощности оптического излучения в волокне от приложенного давления на волоконно-оптический датчик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu X., Wang C., Liu T., Wei Y., and Lu J. Fiber grating water pressure sensor and system for mine, *ACTA Photonica Sinica*, 2009, Vol. 38. — P. 112–114.
2. Kumar A., Kumar D., Singh U. K., Gupta P. S., and Shankar G. Optimizing fibre optics for coal mine automation, *Int. J. Control Automation*, 2011, Vol. 3. No. 4. — P. 63–70.
3. Naruse H., Uehara H., Deguchi T., Fujihashi K., Onishi M., Espinoza R., and Pinto M. Application of a distributed fibre optic strain sensing system to monitoring changes in the state of an underground mine, *Meas. Sci. Technol.*, 2007, Vol. 18, No. 10. — P. 3202–3210.
4. Dorokhov D. V., Nizametdinov F. K., Ozhigin S. G., and Ozhigina S. B. A technique for surveying of ground surface deformations in mine field, *J. Min. Sci.*, 2018, Vol. 54, No. 5. — P. 874–882.
5. Ozhigin S., Ozhigina S., and Ozhigin D. Method of computing open pit slopes stability of complicated-structure deposits, *Inz. Miner.*, 2018, Vol. 19, No. 1. — P. 203–208.
6. Чотчаев Х. О. Контроль напряженно-деформированного состояния горного массива звукометрическими и геофизическими методами // *Геология и геофизика юга России*. — 2016. — № 3. — С. 129–140.
7. Буймистряк Г. Я. Принципы построения интеллектуальных волоконно-оптических датчиков // *Фотон-Экспресс*. — 2011. — № 6. — С. 38–39.
8. Буймистряк Г. Волоконно-оптические датчики для экстремальных условий // *Control engineering Россия*. — 2013. — № 3. — С. 34–40.
9. Kim S. T., Park Y.-H., Park S. Y., Cho K., and Cho J.-R. A sensor-type PC strand with an em-bedded FBG sensor for monitoring prestress forces, *Sensors (Switzerland)*, 2015, Vol. 15, No. 1. — P. 1060–1070.
10. Liu T., Wei Y., Song G., Li Y., Wang J., Ning Y., and Lu Y. Advances of optical fiber sensors for coal mine safety monitoring applications, *Proc. Int. Conf. Microwave Photonics (ICMAP)*, 2013. — P. 102–111.
11. Zhao Y., Zhang N., and Si G.-Y. A fiber bragg grating-based monitoring system for roof safety control in underground coal mining, *Sensors (Switzerland)*, 2016, Vol. 16, No.10. — P. 112–117. DOI: 10.3390/s16101759.

12. Волчихин В. И., Волчихин В. И., Мурашкина Т. И. Проблемы создания волоконно-оптических датчиков // Датчики и системы. Измерения, контроль, автоматизация. — 2001. — № 7. — С.54–58.
13. Liu J., Chai J., Wei S., Li Y., Zhu L., and Qiu B. Theoretical and experimental study on fiber Bragg grating sensing of rock strata settlement deformation, J. Coal Sci. Eng. (China), 2008, Vol. 14, No. 3. — P. 394–398.
14. Каменев О. Т., Кульчин Ю. Н., Петров Ю. С., Хижняк Р. В. Применение волоконно-оптического интерферометра Маха–Цендера для создания длиннобазовых деформометров // Письма в ЖТФ. — 2014. — Т. 40. — Вып. 3. — С. 49–56.
15. Кульчин Ю. Н., Каменев О. Т., Петров Ю. С., Колчинский В. А. Волоконно-оптические интерферометрические приемники слабых сейсмосигналов // Вестн. ДВО РАН. — 2016. — № 4. — С. 56–59.
16. Шумкова Д. Б., Левченко А. Е. Специальные волоконные световоды. — Пермь: ПНИПУ, 2011. — 178 с.
17. Буймистряк Г. Я. Информационно-измерительная техника и технология на основе волоконно-оптических датчиков и систем. — СПб: ГРОЦ Минатома, 2005. — 191 с.
18. Osório J. H., Chesini G., Serrao V. A., Marcos A. R. Franco, and Cordeiro C. M. B. Simplifying the design of microstructured optical fibre pressure sensors, Scientific Reports, 2017, Vol. 7. DOI: 10.1038/s41598-017-03206-w.
19. Zhao Y., Zhang N., and Si G. A fiber Bragg grating-based monitoring system for roof safety control in underground coal mining, Sensors (Basel), 2016. DOI: 10.3390/s16101759.
20. Yurchenko A. V., Mekhtiyev A. D., Bulatbaev F. N., Neshina E. G., and Al'kina A. D. The model of a fiber-optic sensor for monitoring mechanical stresses in mine workings, Russ. J. Nondestr. Test., 2018, Vol. 54, No. 7. — P. 528–533.
21. Мехтиев А. Д., Юрченко А. В., Ожигин С. Г., Нешина Е. Г., Алькина А. Д. Разработка квазираспределенной системы мониторинга горного давления на свод выработки с использованием оптических волокон // ФТПРПИ. — 2021. — № 2. — С. 192–198.
22. Мехтиев А. Д., Юрченко А. В., Нешина Е. Г., Алькина А. Д. Использование оптического волокна G-652 для контроля горного массива угольных шахт // Вестн. ЮУрГУ: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. — 2020. — № 1. — С. 144–153.

Поступила в редакцию 20/VIII 2021

После доработки 12/IX 2021

Принята к публикации 14/III 2022