

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА G-652 ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГОРНОГО МАССИВА УГОЛЬНЫХ ШАХТ

А.Д. Мехтеев^{1, 2}, А.В. Юрченко², Е.Г. Нешина², А.Д. Алькина²

¹ Карагандинский государственный технический университет,
г. Караганда, Республика Казахстан,

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия

Введение. Актуальность использования волоконно-оптических датчиков для контроля геомеханического состояния массива горных выработок угольных шахт Карагандинского угольного бассейна крайне высока, потому как они относятся к сверхкатегоричным и опасным по внезапному взрыву угольной пыли и газа метана при проведении горных работ в опасных условиях шахт. Волоконно-оптические датчики обладают рядом достоинств: взрывобезопасностью, высокой точностью, скоростью измерения и имеют хорошую линейность характеристик. **Цель исследования.** Использование оптического волокна стандарта ITU-T G.652.D как датчика для контроля геомеханического состояния массива горных выработок угольных шахт, что является весьма перспективным в плане создания распределенной системы мониторинга, способной своевременно сигнализировать персонал об опасности внезапного обрушения выработки. **Материалы и методы.** Для отработки методов контроля и измерения геотехнических параметров выработок был разработан имитационный лабораторный стенд на основе волоконно-оптических датчиков. Авторами использовалось кварцевое одномодовое оптическое волокно 9/125 мкм (OS2) Corning SMF-28e+®. В статье предложены системы в двух вариантах исполнения в зависимости от поставленных задач и функциональности. В первом варианте используется известный метод оптической рефлектометрии OTDR (Optical time domain reflectometer). Во втором варианте контролируются значения дополнительных потерь, вызванные механическим воздействием на оптическое волокно. **Результаты.** При механическом воздействии на оптическое волокно возникают микротрещины, приводящие к изменению свойств света и увеличению дополнительных потерь световой волны, проходящей по нему. Указанные потери можно измерить и установить значения давления на оптическое волокно, также можно определить величину смещения. **Заключение.** Использование оптического волокна стандарта ITU-T G.652.D для контроля геомеханического состояния массива горных выработок угольных шахт является весьма перспективным, так как разработанные на его основе волоконно-оптические датчики обладают достаточно высокой точностью, скоростью измерения и имеют хорошую линейность характеристик.

Ключевые слова: затухание, потери, информационно-измерительная система, оптическое волокно, безопасность, горные работы, дефекты массива, волоконно-оптический датчик.

Введение

Проектирование и планирование подземной шахты нацелено на создание интегрированной системы, в которой добыча и переработка полезных ископаемых осуществляется для определенного рынка при минимальных эксплуатационных расходах и высоких требованиях безопасности. Горная система требует междисциплинарной инженерной структуры и координации его работы [1–9]. Одним из важных аспектов функционирования сложной системы шахты является безопасность проведения горных работ. Несомненно, подземные шахты представляют собой одну из самых сложных и жестких сред для работы людей. Несмотря на то, что безопасность рассматривается как одна из ключевых проблем, ограничения в возможности технологического решения, стоимости и самой природы подземных шахт ограничивают возникновение единого механизма обеспечения полной безопасности для горнорабочих в любой области, что очень важно для высококачественной работы.

1. Постановка задачи

С учетом проведенного анализа необходимо тщательное исследование, чтобы лучше понять геомеханическое поведение горных пород и обеспечить более высокую производительность совместно с безопасной рабочей средой для рабочих и механизмов. Одним из важных моментов является контроль горного давления на стенки выработок и прогнозирование их внезапного обрушения. В качестве объекта исследования рассмотрена модель горной выработки шахты Карагандинского угольного бассейна. Актуальность использования волоконно-оптических датчиков (ВОД) для контроля технического состояния горных машин угольных шахт Карагандинского угольного бассейна крайне высока, потому что при проведении горных работ в опасных условиях шахт, относящихся к сверхкатегоричным, опасным по внезапному взрыву угольной пыли и газа метана, требуются надежные системы измерения, контроля и мониторинга состояния горных выработок и оборудования с повышенными требованиями к искро- и взрывоопасности. Пренебрежение этими факторами может привести к возникновению серьезных аварий со значительными человеческими жертвами. Информационно-измерительные системы на основе волоконно-оптических датчиков отвечают всем правилам безопасности и могут быть использованы на шахтах Карагандинского угольного бассейна [10].

2. Лабораторные испытания

Первым этапом разработки информационно-измерительной системы на основе волоконно-оптических датчиков (ИИС ВОД) является проведение аналитического исследования имеющихся достижений в данной области на основе системного подхода и решения задачи в целом. Результаты анализа литературы позволили использовать накопленный опыт для разработки информационно-измерительной системы на основе волоконно-оптических датчиков, способных эффективно работать в условиях шахт, опасных по внезапному выбросу метана и пыли. Для отработки методов контроля и измерения геотехнических параметров выработок была разработана лабораторная модель для проведения исследований, представленная на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид лабораторного стенда для практической апробации теоретических результатов исследования
Fig. 1. Appearance of laboratory stand for practical testing of theoretical results of research

Краткие сообщения

В реальных условиях желательно иметь программу интенсивного мониторинга давления поддержки с использованием современных систем непрерывного мониторинга на электронном гаджете, чтобы осуществлять оценивание и хранение данных через требуемые интервалы времени.

Современная система связи для подземных шахт может быть проводной или беспроводной. Оба типа систем могут выйти из строя, когда сталкиваются с пожарами, падением крыши, взрывом и сбоем питания.

Реализация миниатюрных интегральных схем, подходящая конструкция безопасных систем электропитания и микроэлектроники для хранения и передачи данных могут быть полезны при разработке экономически эффективных систем непрерывного мониторинга.

Оптическое волокно является искробезопасным, если световая энергия, передаваемая по волокну, находится на уровне или ниже определенного уровня мощности. Они не подвержены влиянию шума, молнии, помех от ВЧ, ЭДС, электромагнитных помех, распространенных в горной промышленности [11–15]. Использование волоконной оптики для надежной связи при мониторинге, анализе и управлении оборудованием и объектами в ходе горного процесса повысит безопасность и эффективность производства. Волоконно-оптическая связь уникально подходит для подключения данных в режиме реального времени от датчиков окружающей среды и оборудования для обеспечения максимальной производительности при соблюдении самых высоких стандартов безопасности. Волоконно-оптические кабели должны быть соответствующим образом бронированы, чтобы они оставались работоспособными при следующих условиях: движение подземных транспортных средств, обрушение подземной крыши, затопление подземных вод, воздействие волны давления, возникающей в результате подземных взрывов.

Нами разработан имитационный лабораторный стенд для отработки конструкции информационно-измерительной системы на основе волоконно-оптических датчиков (см. рис. 1). Использовалось кварцевое одномодовое оптическое волокно 9/125 мкм (OS2) Corning SMF-28e+® с низким «водным пиком» (стандарт ITU-T G.652.D). Не желательно использование волокна серии Ultra, так как оно имеет более низкую чувствительность к изгибу. Оптоволокно имеет первичное покрытие 245 мкм (с внешней оболочкой). Для определения значений мощности оптического излучения и потерь использовался измеритель оптической мощности VIAVI (JDSU) SmartPocket OLP-38, работающий в динамическом диапазоне от –50 до +26 дБм, с диапазоном длины волны 780–1650 нм. В качестве источника излучения использовался SmartPocket OLS-34/35/36 со встроенными опциями Auto-λ и Multi-λ, SmartPocket OLP-38 может автоматически измерять уровень мощности и вносимые потери в одномодовом и многомодовом оптическом кабеле. Подключение к оптическому волокну производилось через универсальный UPP 2.5 мм адаптер и оптические коннекторы типа FC. Длина компенсационной катушки составляет 2 км оптического волокна (стандарт ITU-T G.652.D) (рис. 2а).

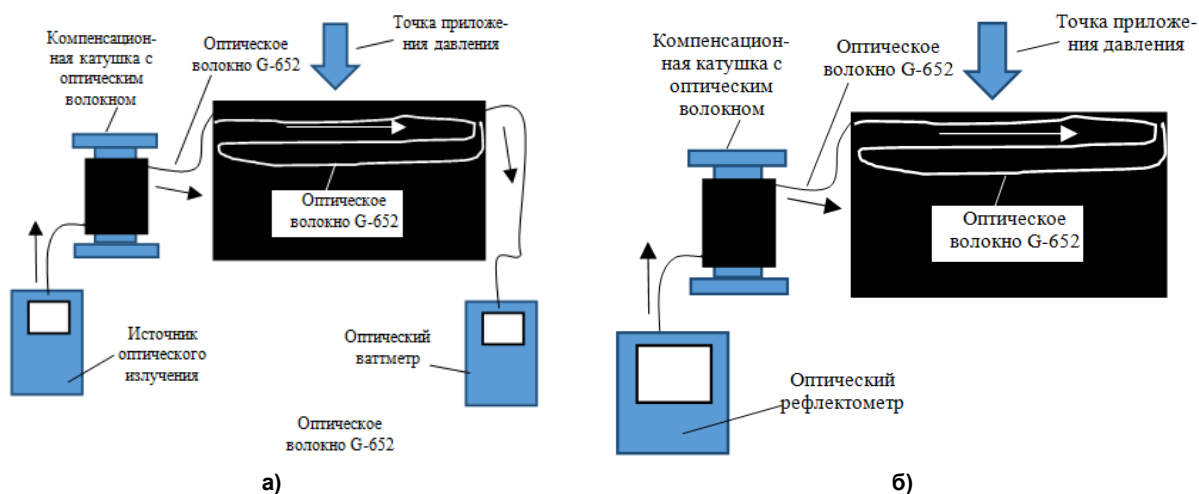


Рис. 2. Структурная схема лабораторного стенда информационно-измерительной системы на основе волоконно-оптических датчиков: а – с оптическим ваттметром; б – с оптическим рефлектометром
Fig. 2. Structural diagram of the laboratory stand of the information-measuring system based on fibre-optic sensors: a – with optical wattmeter; b – with optical reflectometer

Второй эксперимент проводился с использованием оптического рефлектометра Yokogawa AQ1200E (рис. 2б).

3. Результаты численного моделирования

С помощью разработанного лабораторного стенда был проведен ряд экспериментов по определению потерь оптического волокна при различном значении давления.

Численное исследование модели ВОД системы проведено с помощью программы Wolframalpha, которая является интерактивной системой для выполнения обработки результатов экспериментов и ориентирована на работу с массивами данных.

Граничное условие: энергия давления на волокно от 0 до 15 Н·м, интервал шага 2,4 Н·м, всего 7 шагов, температура в помещении лаборатории 25 °С. Перемещение по осям до приложения давления $OX = 0$ м; $OY = 0$ м; $OZ = 0$ м. В результате автоматизированной аппроксимации данных получены однофакторные математические модели. Каждое измерение проводилось 10 раз.

Исследовались оптические волокна с длиной волны 1310 и 1550 нм. График зависимости значения потерь оптического волокна с длиной волны 1310 нм при пошаговом увеличении давления представлен на рис. 3.

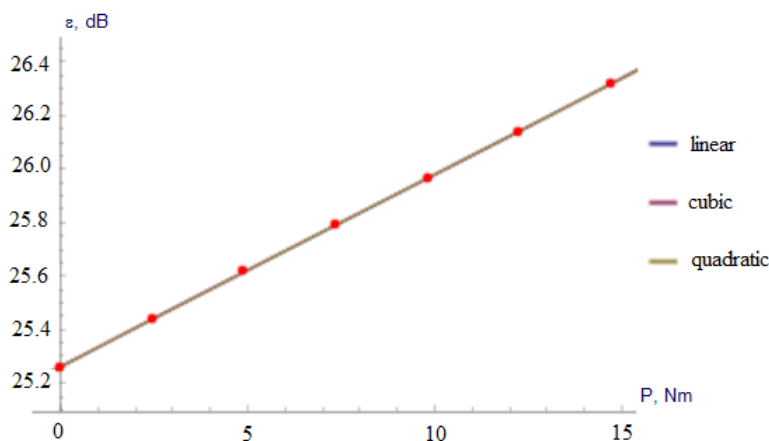


Рис. 3. Значение потерь оптического волокна с длиной волны 1310 нм при пошаговом увеличении давления
Fig. 3. Value of optical fiber loss with wavelength 1310 nm at step-by-step pressure increase

При проведении автоматической аппроксимации были получены следующие результаты:

- 1) $0,0718438P + 25,2616 = \epsilon$ аппроксимация линейная;
- 2) $0,000022611P^3 - 0,000522694P^2 + 0,0749118P + 25,2589 = \epsilon$ аппроксимация третьей степени (кубическая);
- 3) $0,0000237653P^2 + 0,0721934P + 25,2609 = \epsilon$ аппроксимация второй степени (квадратичная).

Так как наилучшей математической моделью считается модель с наименьшим значением критерия АИС (Информационный критерий Акаике), зависимость значений потерь в оптическом волокне лучше представить квадратичной аппроксимацией, при которой информационный критерий Акаике составляет $-53,6639$.

График зависимости значения потерь оптического волокна с длиной волны 1550 нм при пошаговом увеличении давления представлен на рис. 4.

При проведении автоматической аппроксимации были получены следующие результаты:

- 1) $0,109018P + 22,1951 = \epsilon$ аппроксимация линейная;
- 2) $-0,0000395923P^3 + 0,00181238P^2 + 0,0904493P + 22,2269 = \epsilon$ аппроксимация третьей степени (кубическая);
- 3) $0,000938742P^2 + 0,0952092P + 22,2234 = \epsilon$ аппроксимация второй степени (квадратичная).

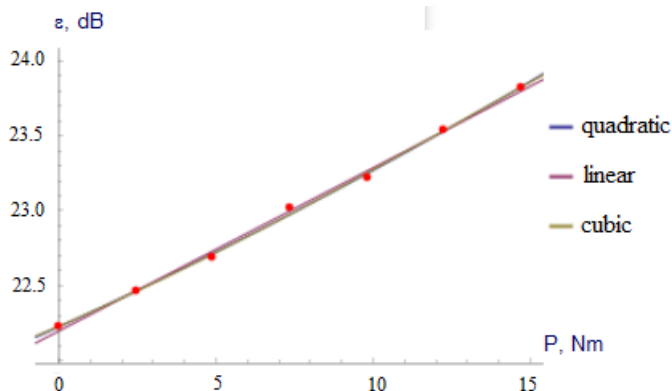


Рис. 4. Значение потерь оптического волокна с длиной волны 1550 нм при пошаговом увеличении давления
Fig. 4. Value of optical fiber loss with wavelength 1550 nm at step-by-step pressure increase

Оценивая результаты, можно сделать вывод, что зависимость значений потерь в оптическом волокне лучше представить квадратичной аппроксимацией, при которой информационный критерий Акаике составляет $-24,11$.

Для определения расстояния до места нарушения охраны периметра использовался рефлектометр YOKOGAWA AQ1200 OTDR. На рефлектограмме (рис. 5) четко видно, на каком участке оптического волокна происходит изменение потерь.

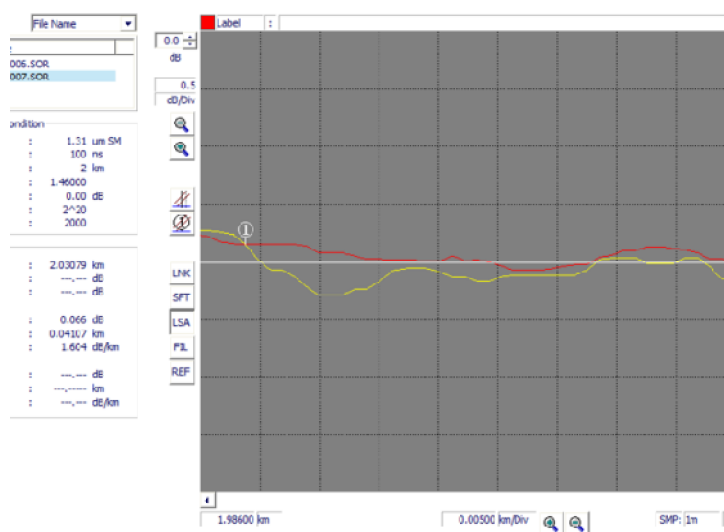


Рис. 5. Рефлектограмма
Fig. 5. Reflectogram

На рефлектограмме показано, что в диапазоне 1,989–2,03079 км возвратные потери оптического волокна составили 0,066 дБ, что свидетельствует о том, что на этом промежутке давление на оптическое волокно выше нормы.

4. Разработка информационно-измерительной системы на основе волоконно-оптических датчиков

При механическом воздействии на оптическое волокно возникают микро- и макроизгибы, приводящие к дополнительным потерям оптического сигнала в волокне. Указанные потери можно измерить и установить значения давления на оптическое волокно, также можно определить величину смещения. Важным преимуществом данной системы измерений будет ее полная искро- и пожаробезопасность. Энергетическая пассивность датчиков позволяет исключить источники питания, непосредственно находящиеся в зоне добычи угля. ИИС ВОД способна круглосуточно

осуществлять мониторинг горной выработки. Система может быть представлена в двух вариантах в зависимости от поставленных задач и функциональности. В первом варианте используется известный метод оптической рефлектометрии OTDR (Optical time domain reflectometer). Во втором варианте контролируются значения дополнительных потерь, вызванные механическим воздействием на оптическое волокно. На основе проведенных лабораторных опытов было предложено две схемы ИИС ВОД (рис. 6).

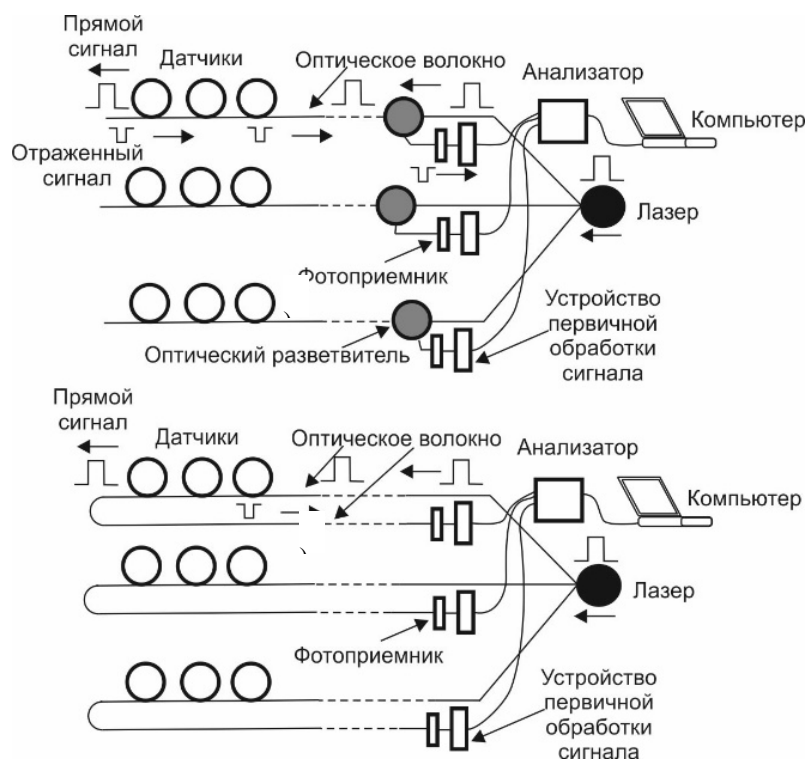


Рис. 6. Структурные схемы информационно-измерительных систем на основе волоконно-оптических датчиков
Fig. 6. Structural diagrams of information-measuring systems based on fibre-optic sensors

Зона действия ИИС ВОД – около 50 км, что вполне достаточно для передачи сигналов в пределах горных выработок и подачи их на поверхность. ИИС ВОД может иметь более ста каналов и точек измерения. ВОД расположены непосредственно в горной выработке. Подключение осуществляется через оптические коннекторы к магистральному оптическому кабелю, а фотоприёмники, лазер и анализатор находятся в безопасной зоне околоствольного двора или на поверхности. ИИС ВОД на рис. 6а работает следующим образом: источник света (полупроводниковый лазер) формирует короткие зондирующие импульсы необходимой длительности (от 5 нс до 20 мкс), длина волны 1310 и 1550 нм. Импульс проходит через разветвитель по оптическому кабелю до ВОД, расположенных в горной выработке. При механическом воздействии на оптическое волокно датчика возникают дополнительные потери, и часть сигнала отражается и по тому же проводнику попадает в фотоприемник. Разветвитель обеспечивает прохождение отражённого в волокне света к приёмнику оптического излучения для его регистрации и измерения. Чувствительный фотоприёмник имеет устройство для первичной обработки сигнала и точно измеряет уровни и задержки по времени всех отражений, появляющихся по мере прохождения зондирующего светового импульса вдоль волокна. Измерение всех отражений от одного зондирующего светового импульса не позволит получить достоверную картину давлений и перемещений пород горной выработки, так как лазер создает импульс малой мощности и при его отражении создается большое количество случайного шума, поэтому необходимо выполнять измерения в течение 10–30 с, отправить в волокно тысячи зондирующих световых импульсов и измерить отражение каждого из них. После чего выполняется усреднение, анализ и отображение результатов при помощи

анализатора и компьютера, на котором будет сохранена вся информация об измерении давления и смещений, происходивших в горной выработке в течение установленного времени (суток, месяцев). Важным моментом является работа анализатора, который рассчитывает время прохождения по оптическому волокну прямого и обратного (отраженного) импульса света, при известной скорости света рассчитывает расстояние до точки приложения давления. По уровню амплитуды отраженного сигнала определяются дополнительные потери и соответственно значения приложения давления к ВОД. ИИС ВОД представлена на рис. 6б, более упрощенная в плане используемого оборудования (фотоприемника, оптического разветвителя) и имеет меньшую стоимость, так как анализатор выполнен более простым с меньшими вычислительными мощностями процессора. Лазерный луч проходит по прямому оптическому волокну до ВОД и возвращается по обратному к фотоприёмнику. При механическом воздействии на ВОД, например, при повышении давления на крепь или смещении пластов, увеличиваются дополнительные потери, которые фиксируются анализатором.

Измерение горного давления и перемещений горных пород – два важнейших параметра, которые могут использоваться для количественной оценки эффективности поддержки кровли горной выработки в заданном состоянии геотехники.

Обсуждение и заключение

Использование оптического волокна стандарта ITU-T G.652.D для контроля горного массива угольных шахт является весьма перспективным, так как разработанные на его основе ВОД обладают достаточно высокой точностью, скоростью измерения и имеют хорошую линейность характеристик. Нежелательно использование волокна серии ITU-T G.652.D Ultra, так как оно имеет более низкую чувствительность к изгибу. ИИС ВОД позволяет обеспечить высокие требования безопасности при проведении горных работ в опасных условиях шахт, относящихся к сверхкатегоричным по внезапному взрыву угольной пыли и газа метана, требуются надежные системы измерения, контроля и мониторинга состояния горных выработок и оборудования с повышенными требованиями к искро- и взрывобезопасности.

Литература

1. Чотчаев, Х.О. Контроль напряженно-деформированного состояния горного массива звукометрическими и геофизическими методами / Х.О. Чотчаев // *Геология и геофизика юга России*. – 2016. – № 3. – С. 129–140.
2. Буймистрюк, Г.Я. Принципы построения интеллектуальных волоконно-оптических датчиков / Г.Я. Буймистрюк // *Фотон-Экспресс*. – 2011. – № 6 (43). – С. 38–39.
3. Буймистрюк, Г. Волоконно-оптические датчики для экстремальных условий / Г. Буймистрюк // *Control engineering*. – 2013. – № 3 (45). – С. 34–40.
4. A Sensor-Type PC Strand with an Embedded FBG Sensor for Monitoring Prestress Forces / S.T. Kim, Y.-H. Park, S.Y. Park et al. // *Sensors*. – 2015. – Vol. 15, no. 1. – P. 1060–1070. DOI: 10.3390/s150101060
5. Advances Of Optical Fiber Sensors For Coal Mine Safety Monitoring Applications / T. Liu, Y. Wei, G. Song et al. // *Proceedings of the 2013 International Conference on Microwave and Photonics*. – 2013. – P. 102–111. DOI: 10.1109/ICMAP.2013.6733455
6. Chunde Application Of Distributed Optical Fiber Sensing Technology in the Anomaly Detection of Shaft Lining in Grouting / Chunde Piao, Jun Yuan, Bin Shi et al. // *Journal of Sensors*. – 2015. – P. 163–169. DOI: 10.1155/2015/678634
7. Fiber Grating Water Pressure Sensor and System for Mine / X. Liu, C. Wang, T. Liu et al. // *ACTA Photonica Sinica*. – 2009. – Vol. 38. – P. 112–114.
8. Optimizing Fibre Optics for Coal Mine Automation / Atul Kumar, Dheeraj Kumar, U.K. Singh et al. // *International Journal of Control and Automation*. – 2011. – Vol. 3. – P. 63–70.
9. Application of a Distributed Fibre Optic Strain Sensing System to Monitoring Changes in the State of an Underground Mine / H. Naruse, H. Uehara, T. Deguchi et al. // *Measurement Science and Technology*. – 2007. – Vol. 18, no. 10. – P. 3202–3210. DOI: 10.1088/0957-0233/18/10/S23

10. Модель волоконно-оптического датчика для мониторинга механического напряжения горных выработок / А.В. Юрченко, А.Д. Мехтиев, Ф.Н. Булатбаев и др. // Дефектоскопия. – 2018. – № 7. – С. 48–56.
11. Бейли, Д. Волоконная оптика. Теория и практика / Д. Бейли, Э. Райт. – М.: Кудлиц-Образ, 2006. – 320 с.
12. Дмитриев, С.А. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и перспективы / С.А. Дмитриев, Н.Н. Слепов. – М.: ООО «Волоконно-оптическая техника», 2005. – 576 с.
13. Соколов, А.Н. Волоконно-оптические датчики и системы: принципы построения, возможности и перспективы / А.Н. Соколов, В.А. Яцеев // Измерительная техника. – 2006. – № 4. – С. 142–153.
14. Горлов, Н.И. Основные задачи мониторинга современных волоконно-оптических линий передачи / Н.И. Горлов, В.И. Эйрих // Труды Международной научной конференции (Сагиновские чтения № 4). – 2012. – № 2. – С. 68–70.
15. Research of the additional losses occurring in optical fiber at its multiple bends in the range waves 1310 nm, 1550 nm and 1625 nm Long / A.V. Yurchenko, N.I. Gorlov, A.D. Mekhtiyev, A.A. Kovtun // IOP Science. Journal of Physics. – 2016. – Vol. 671. DOI: 10.1088/1742-6596/671/1/012001

Мехтиев Али Джаванширович, канд. техн. наук, ассоциированный профессор, Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; barton.kz@mail.ru.

Юрченко Алексей Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; niipp@inbox.ru.

Нешина Елена Геннадьевна, магистр технических наук, аспирант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; 1_neg@mail.ru.

Алькина Алия Даулетхановна, магистр технических наук, аспирант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; alika_1308@mail.ru.

Поступила в редакцию 19 ноября 2019 г.

DOI: 10.14529/ctcr200114

USING G-652 OPTICAL FIBER TO CONTROL MOUNTAIN MASSIFES OF COAL MINES

A.D. Mekhtiyev^{1, 2}, barton.kz@mail.ru,

A.V. Yurchenko², niipp@inbox.ru,

E.G. Neshina², 1_neg@mail.ru,

A.D. Alkina², alika_1308@mail.ru

¹ Karaganda State Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan,

² Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

Introduction. The relevance of using fiber-optic sensors to monitor the geomechanical state of the mine workings of coal mines of the Karaganda coal-mining field is extremely high, because they are super-categorical and dangerous in a sudden explosion of coal dust and methane gas during mining operations in hazardous mines. Fiber optic sensors have several advantages: explosion safety, high accuracy, measurement speed and have good linearity of characteristics. **Aim.** The use of optical fiber of the ITU-T G.652.D standard as a sensor for monitoring the geomechanical state of an ar-

ray of coal mines, which is very promising in terms of creating a distributed monitoring system capable of timely signaling to personnel about the danger of a sudden collapse of a mine. **Materials and methods.** To develop methods for monitoring and measuring the geotechnical parameters of the workings, a simulation laboratory bench based on fiber-optic sensors was developed. The authors used a quartz single-mode optical fiber 9/125 μm (OS2) Corning SMF-28e + $\text{\textcircled{R}}$. The article proposes systems in two variants, depending on the tasks and functionality. In the first variant, the well-known method of optical reflectometry OTDR (Optical time domain reflectometer) is used. In the second variant, the values of the additional losses caused by the mechanical action on the optical fiber are controlled. **Results.** During mechanical action on an optical fiber microcracks occur, leading to a change in the properties of light and an increase in additional losses of the light wave passing through it. **Conclusion.** The use of ITU-T G.652.D standard optical fiber for monitoring the geomechanical state of an array of coal mine workings is very promising, since the VODs developed on its basis have sufficiently high accuracy, measurement speed and good linearity of characteristics.

Keywords: attenuation, loss, information-measuring system, optical fiber, safety, mining, array defects, fiber-optic sensor.

References

1. Chotchaev Kh.O. [Monitoring of the Stress-Strain State of the Rock Mass Using Sound and Geophysical Methods]. *Geology and Geophysics of the South of Russia*, 2016, no. 3, pp. 129–140. (in Russ.)
2. Buymistryuk G.Ya. [Principles of Building Intelligent Fiber Optic Sensors]. *Photon Express*, 2011, no. 6 (43), pp. 38–39. (in Russ.)
3. Buymistryuk G.Ya. [Fiber Optic Sensors for Extreme Conditions]. *Control Engineering*, 2013, no. 3 (45), pp. 34–40. (in Russ.)
4. Kim S.T., Park Y.-H., Park S.Y., Cho K., Cho J.-R. A Sensor-Type PC Strand with an Embedded FBG Sensor for Monitoring Prestress Forces. *Sensors*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 1060–1070. DOI: 10.3390/s150101060
5. Liu T., Wei Y., Song G., Li Y., Wang J., Ning Y., Lu Y. Advances of Optical Fiber Sensors for Coal Mine Safety Monitoring Applications. *Proceedings of the 2013 International Conference on Microwave and Photonics*, 2013, pp. 102–111. DOI: 10.1109/ICMAP.2013.6733455
6. Chunde Piao, Jun Yuan, Bin Shi, Haijun Lu, Guangqing Wei, Chunsheng Gu. Application of Distributed Optical Fiber Sensing Technology in the Anomaly Detection of Shaft Lining in Grouting. *Journal of Sensors*, 2015, pp. 163–169. DOI: 10.1155/2015/678634
7. Liu X., Wang C., Liu T., Wei Y., Lu J. Fiber Grating Water Pressure Sensor and System for Mine. *ACTA Photonica Sinica*, 2009, vol. 38, pp. 112–114.
8. Kumar Atul, Kumar Dheeraj, Singh U.K., Gupta P.S., Shankar Gauri. Optimizing Fibre Optics for Coal Mine Automation. *International Journal of Control and Automation*, 2011, vol. 3, pp. 63–70.
9. Naruse H., Uehara H., Deguchi T., Fujihashi K., Onishi M., Espinoza R., Pinto M. Application of a Distributed Fibre Optic Strain Sensing System to Monitoring Changes in the State of an Underground Mine. *Measurement Science and Technology*, 2007, vol. 18, no. 10, pp. 3202–3210. DOI: 10.1088/0957-0233/18/10/S23
10. Yurchenko A.V., Mekhtiev A.D., Bulatbaev F.N., Neshina E.G., Al'kina A.D. [Model of Fiber Optic Sensor for Monitoring the Mechanical Stress of Mine Workings]. *Flaw Detection*, 2018, no. 7, pp. 48–56. (in Russ.)
11. Beyli D., Rayt E. *Volokonnaya optika. Teoriya i praktika* [Fiber Optics. Theory and Practice]. Kudits-Obraz, 2006, 320 p.
12. Dmitriev S.A., Slepov N.N. *Volokonno-opticheskaya tekhnika: sovremennoe sostoyanie i perspektivy* [Fiber Optic Technology: Current Status and Prospects]. Moscow, Volokonno-opticheskaya tekhnika Publ., 2005, 576 p.
13. Sokolov A.N., Yatseev V.A. [Fiber-Optic Sensors and Systems: Principles of Construction, Capabilities and Prospects]. *Measuring Technique*, 2006, no. 4, pp. 142–153. (in Russ.)

14. Gorlov N.I., Eyrikh V.I. [The Main Tasks of Monitoring Modern Fiber-Optic Transmission Lines]. *Trudy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (Saginovskie chteniya № 4)* [Proceedings of the International Scientific-practical Conference (Saginov's Readings no. 11)], 2012, no. 2, pp. 68–70. (in Russ.)

15. Yurchenko A.V., Gorlov N.I., Mekhtiyev A.D., Kovtun A.A. [Research of the Additional Losses Occurring in Optical Fiber at its Multiple Bends in the Range Waves 1310 nm, 1550 nm and 1625 nm]. *IOP Science. Journal of Physics*, 2016, vol. 671, pp. 1–5. DOI: 10.1088/1742-6596/671/1/012001

Received 19 November 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

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. – Т. 20, № 1. – С. 144–153. DOI: 10.14529/ctcr200114

FOR CITATION

Mekhtiyev A.D., Yurchenko A.V., Neshina E.G., Alkina A.D. Using G-652 Optical Fiber to Control Mountain Massifs of Coal Mines. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 144–153. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200114
