

А. Д. МЕХТИЕВ¹
А. И. СОЛДАТОВ^{2,3}
Е. Г. НЕШИНА⁴
А. Д. АЛЬКИНА⁴

¹Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, г. Нур-Султан, Республика Казахстан

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

⁴Карагандинский технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

В статье рассмотрен волоконно-оптический метод контроля горного давления, а также измерения величины смещения слоев кровли горной выработки. Авторами приведен анализ применяемых методов контроля горного давления. Приведены причины необходимости создания новой системы, основным требованием которой является условие соблюдения всех требований безопасности при проведении горных работ. Разработанная квази-распределенная волоконно-оптическая система способна с высокой точностью измерять изменения горного давления и смещения пород кровли в условиях взрывоопасной среды, также не требующая дорогостоящего оборудования, связанного с использованием спектр анализаторов и рефлектометров. Предложена схема, позволяющая упростить процесс контроля. Получены результаты зависимостей дополнительных оптических потерь от приложенной силы.

Ключевые слова: оптическое волокно, оптический датчик, квазираспределенная система, горное давление, смещение горной выработки.

В настоящее время большая часть шахт Карагандинского угольного бассейна занимается добычей коксующегося угля для нужд металлургического комбината компании АО «АрселорМиттал Темиртау». Отработка месторождения коксующегося угля со временем требует перехода на более глубокие горизонты, и, как следствие, растет горное давление на стенки выработок и крепь. Увеличение горного давления приводит к деформации выработки и ее обрушению. Горное давление формирует очаги концентраторов, которые, в свою очередь, ведут к проседанию кровли и возникновению опасных зон внезапного обрушения, особенно вблизи лавы, где осуществляется добыча угля. Непосредственно в самой лаве данные проблемы уже решены за счет ограждающей и поддерживающей временной крепи с гидростойками, которые передвигаются вслед за добычным комплексом и выдерживают горное

давление более 50 МПа, при этом горняки находятся под надежной защитой, но для прилегающих к лаве выработок данная крепь не используется. На крепление основных и вспомогательных выработок шахты затрачиваются значительные материальные средства, так как при увеличении горного давления увеличивается и стоимость крепи. Прилегающие к очистному забою выработки подвергаются динамическим изменениям напряжения, вызванным продвижением добывающего комплекса и изменению геотехнических параметров призабойного пространства. Можно разделить околозабойное пространство на несколько частей: зону обрушения 1, зону трещин 2, зону прогиба и посадки 3 (рис. 1) [1, 2].

В направлении продвижения очистного забоя блок 1 представляет собой основу горной массы на угольный пласт и является зоной установившихся

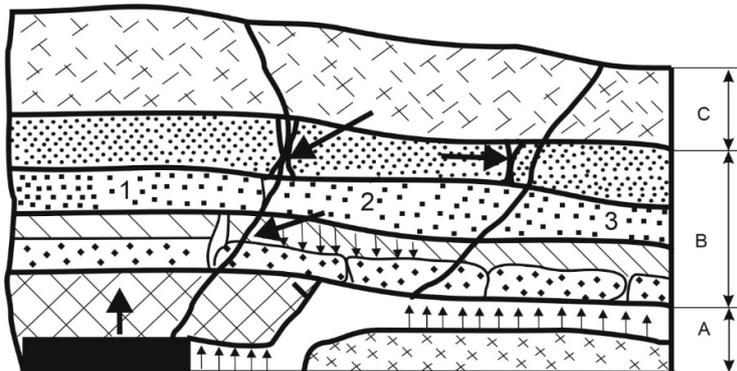


Рис. 1. Разделение движения вышележащих слоев: 1 — зона обрушения; 2 — зона трещиноватости; 3 — криволинейная зона проседания

ся напряжений. Блок 2 является горной массой, которая представляет собой область интенсивного движения пластов горных пород (область развития трещин), а также область интенсивных изменений горного давления, трещин и опускания. Блок 3 является агрегатом горной массы, который является зоной повторного уплотнения. Движение горного слоя снова становится стабильным, и трещина горного слоя закрывается [2].

Поэтому особое внимание необходимо уделить вопросам предотвращения разрушения горных выработок, примыкающих непосредственно к самому забою в пределах 40–50 метров от него. Возникают напряжения в 3–4 раза выше в отдаленных от забоя выработках, находящихся на такой же глубине. В настоящее время на шахтах Карагандинского угольного бассейна используется анкерная или арочная металлическая крепь. Это давно известная технология крепления и хорошо отработанная, способная отлично справляться с горным давлением. Но не всегда возможно предусмотреть величину горного давления и правильно произвести его расчет. Если при расчетах выбрать величину несущей способности крепи с запасом, то потребуются увеличить финансовые затраты на крепление выработки, так как возрастет ее металлоёмкость, а если несущая способность крепи окажется меньшей или крепление выполнено не надлежащем образом, то создается опасность внезапного обрушения кровли в результате чрезмерного проседания и отслоения ее от массива, что создает опасность для работников шахты, находящихся под землей. Указанная проблема может еще больше осложниться при возникновении геологических аномалий в угольных пластах. В настоящий момент на шахтах Карагандинского угольного бассейна, а именно на шахте «Костенко», контроль горного давления осуществляют специалисты службы главного маркшейдера. В их арсенале находится ряд инструментов, позволяющих осуществлять данную деятельность. Одним из инструментов является реперная станция, которая помещается в пробуренный в кровле шпур и может контролировать смещение слоев кровли выработки от 3 до 7 метров. Это механическое средство измерения однократного действия, требующее периодического контроля его шкалы. Для контроля многочисленных реперных станций в службе маркшейдера задействовано 2–3 специалиста, которые выполняют периодический обход для контроля смещений пород кровли горной выработки. Все данные наблюдений заносит в журнал, а расчет смещений определяется по специальной методике. Также для

точности смещения пород выработки и контроля ее геометрических параметров используется теодолит. Учитывая сверхкатегоричность шахты по внезапному выбросу газа и пыли, а также значительного выделения метана из угольных пластов при добыче, использование электрических контрольно-измерительных систем сильно ограничено нормами и правилами техники безопасности. В целях безопасности используются механические реперные станции, не способные создать угрозу взрыва шахтной атмосферы [3].

Анализ зарубежной литературы показал, что в настоящее время оптические волокна (ОВ) активно используются в качестве энергопассивных волоконно-оптических датчиков (ВОД) в различных отраслях промышленности. Датчики на основе оптических волокон обладают уникальными характеристиками: высокой точностью и широким диапазоном измерения, высокой электромагнитной совместимостью. Есть информация о созданных распределенных и квазираспределенных системах измерения на основе технологий выращивания брэгговских решеток (ВБР) в оптических волокнах. Данная технология довольно современная, но есть также сведения о других, более ранних технологиях, например, основанных на методах рефлектометрии и измерении дополнительных потерь. Сведения об использовании информационно-измерительных систем на основе ВОД довольно обширные. Указанные датчики уже применяются в нефтегазовой, аэрокосмической и авиационной промышленности, а также в строительстве [4, 5]. Есть сведения об их использовании в горнодобывающей отрасли [6, 7]. Можно отметить работу группы ученых [8], посвященную созданию волоконно-оптических систем мониторинга на основе ВБР для использования в условиях угольных шахт. Также разработана система, позволяющая измерять горное давление на основе ВОД с решетками Брэгга [9, 10]. Также проводились собственные исследования по разработке датчиков, в том числе для контроля периметра протяженных объектов [11, 12].

Учитывая все обстоятельства, была выдвинута научная идея использования ОВ в качестве датчиков и направляющей системы передачи информации, а систему обработки данных разместить на поверхности в безопасной зоне. Также можно осуществить ряд дополнительных функций измерения, а также передавать необходимую информацию на поверхность по каналам системы контроля геотехнического состояния горных выработок. Предложенная система является энергетически пассивной

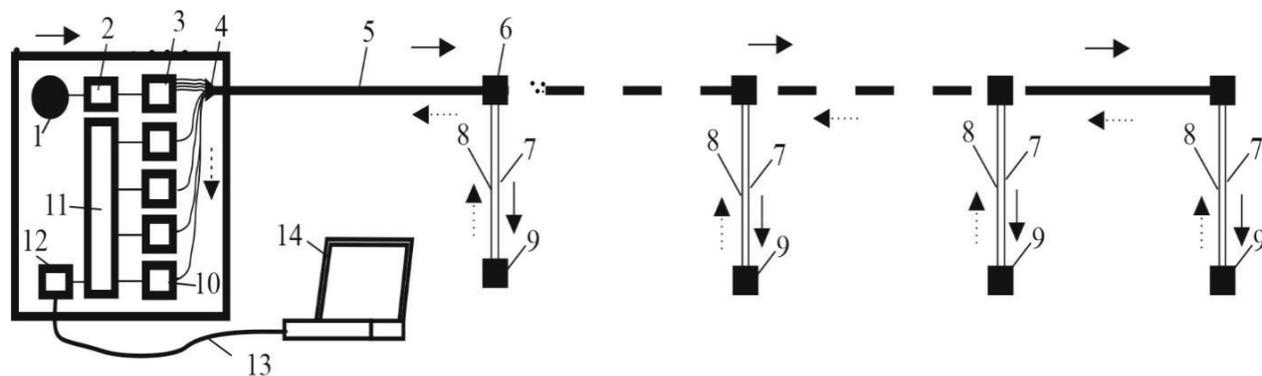


Рис. 2. Структурная схема системы контроля

и не использует для работы датчиков и направляющей системы электрический ток. Использование оптического волокна позволяет построить квазираспределенную систему контроля геотехнического состояния горных выработок, которая будет удовлетворять строгим требованиям техники безопасности проведения горных работ на сверхкатегоричных шахтах. Электрический ток будет присутствовать только в блоке обработки данных и вывода информации, который расположен на поверхности.

Используя накопленный опыт, можно создать эффективную и безопасную волоконно-оптическую систему контроля геотехнических параметров выработки и устойчивости ее кровли. Система позволит повысить безопасность проведения подземных работ, связанных с добычей угля. Система должна в режиме реального времени контролировать смещение слоев кровли и нагрузку на анкерную крепь выработки. Полученная информация от датчиков по волоконно-оптическому кабелю поступает на пульт оператора, находящегося на поверхности. Система должна контролировать одновременно несколько десятков реперных станций без участия человека.

На рис. 2 предложена квазираспределенная волоконно-оптическая система контроля горного давления на основе ВОД, которая основана на методе контроля дополнительных потерь. Отличием является обработка изменения формы светового пятна и его интенсивности, параметры контролируются при помощи фотоматрицы [6]. Разработанный метод позволяет более точно производить измерения горного давления и перемещений горной массы, имеющий ряд усовершенствований и адаптированный под конкретные условия горных выработок. В качестве сенсора используются три оптических одномодовых волокна стандарта G652, которые одновременно используются как датчик и направляющая система связи между датчиком и устройством обработки. При обработке данных об изменении параметров светового пятна на выходе из волокна, падающего на поверхность фото матрицы, используются возможности нейронных сетей. Важным моментом является размещение устройства обработки и вывода информации на поверхности, так как оптический сигнал имеет очень низкие показатели затухания. В отличие от ВОД с решетками Брэгга или ВОД, основанных на методе оптической рефлектометрии Бриллюэна, предложенная схема является более простой и менее затратной. Структурная схема волоконно-оптической системы контроля (ВОСК) представлена на рис. 2.

Предложенная ВОСК содержит источник когерентного излучения 1 с длиной волны в пределах 650 нм, мощностью 30 мВт. В лабораторной версии ВОСК используется видимый диапазон красного света. Теоретическая протяженность направляющей линии ВОСК составляет 30 км, что вполне достаточно для контроля самых удаленных точек практически любой шахты. Для снижения помех от источника излучения используется оптический поляризатор и изолятор 2. Оптическое излучение разделяется в пропорции $1/4$ в оптическом разветвителе 3. Лабораторный образец ВОСК имеет 4 канала, но в реальных условиях предприятия ВОСК могут иметь практически неограниченное количество измерительных каналов, один модуль ВОСК может использовать оптический кросс и разветвитель с числом каналов до 64. ВОСК содержит устройство ввода и вывода оптических волокон 4. В качестве направляющей системы используется стандартный телекоммуникационный одномодовый волоконно-оптический кабель 5, для присоединения используются ответвительные коробки 6. Все присоединения ВОД выполняются при помощи стандартных универсальных адаптеров UPP 2,5 мм и оптических коннекторов типа SC, так как все сварочные работы запрещены в условиях взрывоопасной атмосферы угольной шахты. ВОД подключен при помощи двух оптических волокон прямого и обратного направления движения оптического сигнала, это позиции 7 и 8 соответственно. ВОД на схеме представлен позицией 9, который размещается в шпуре пробуренной в кровле горной выработки. На схеме обозначены направления движения световой волны к ВОД сплошной стрелкой и пунктиром движение волны в сторону фотоприемного устройства 10, которое фиксирует все изменения интенсивности формы светового пятна. ВОСК содержит четыре ВОД соответственно, четыре фотоприемных устройства — по одному на каждый канал. Все четыре фотоприемника подключены в устройство предварительной обработки данных 11. Далее уже электрический сигнал, ВОСК через устройство согласования 12 соединяется с компьютером 14 через соединительный кабель 13.

Важным элементом ВОСК является ВОД, который по своей конструкции отличается простотой, а по себестоимости производства будет не выше типовой реперной станции, что весьма важно. Предложенный ВОД имеет ряд общих элементов с типовой конструкцией реперной станции и не имеет сложных технологических деталей. Его отличием от существующей конструкции является использование одномодового волокна в качестве чувстви-

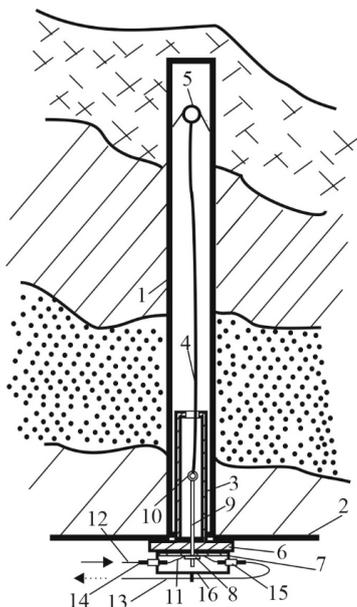


Рис. 3. Конструкция реперной станции с ВОД



Рис. 4. Экспериментальный образец ВОД

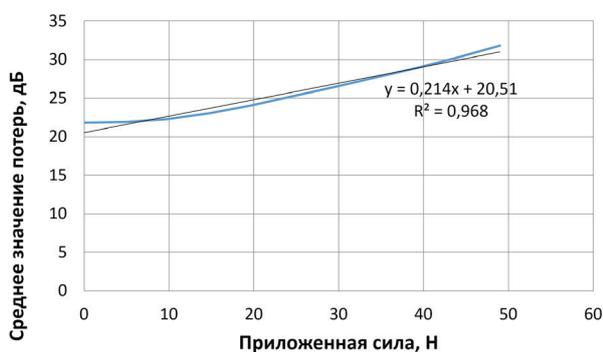


Рис. 5. График зависимости дополнительных потерь от приложенной силы

тельного элемента. Конструкция датчика показана на рис. 3.

При изменении горного давления и возникновения смещений слоев в кровле выработки происходит механическое воздействие на волоконно-

оптический сенсор 11 за счет смещения пружины 5, используемой для фиксации положения троса 4. Трос крепится к шпильке 9 при помощи проушины 10. Волоконно-оптический сенсор 11 расположен между стальной шайбой 6 и упругим элементом 7 с одной стороны и стальной шайбой 8 — с другой. Приходящая по оптическому волокну 12 волна проходит через чувствительный элемент 11 и возвращается к фотоприёмнику по обратному волокну 13. Для присоединения ВОД используются адаптер 15 (UPP 2,5 мм) и оптический коннектор 14 типа SC. При воздействии на оптический сенсор 11 увеличиваются дополнительные потери и изменяется интенсивность, которая фиксируется фотоприёмником и в дальнейшем обрабатывается при помощи программного обеспечения.

Калибровка лабораторного образца выполнена при помощи измерителя оптической мощности VIAVI (JDSU) SmartPocket OLP-38. В качестве источника оптического излучения использовался SmartPocket OLS-34/35/36. Данные приборы используются для контроля параметров дополнительных потерь волоконно-оптических линий передачи. Для измерения нагрузки использован электронный динамометр. Измерение смещения выполнено при помощи линейки (рис. 4).

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.

Проверка ВОД осуществлялась в лабораторных условиях на стенде с параметрами: давление на волокно от 0 до 50 Н, длина волны 650 нм, температура в помещении лаборатории 25 °С. В результате автоматизированной аппроксимации данных получены однофакторные математические модели. Каждое измерение проводилось 20 раз. Численное исследование проведено с помощью программы Wolframalpha, которая является интерактивной системой для выполнения обработки результатов экспериментов и ориентирована на работу с массивами данных. По результатам измерений были рассчитаны абсолютная погрешность 2,486 дБ, относительная погрешность 9,702 и коэффициент Стьюдента 2,228 с доверительной вероятностью 0,95.

Результаты лабораторных измерений представлены на графике зависимости дополнительных потерь от приложенной силы (рис. 5). Также разработан аппаратно-программный комплекс, имеющий элементы машинного обучения и достаточно широкий набор элементов управления, позволяющих изменять его чувствительность. Все тревожные сигналы со встроенной сигнализации автоматически записываются и хранятся на жёстком диске компьютера до востребования. Аппаратно-программный комплекс способен работать в оптическом диапазоне от 470 до 1625 нм. В эксперименте использовался монохроматический когерентный источник света с длиной волны оптического излучения 650 нм.

Из рис. 5 видно, что при увеличении давления практически линейно увеличиваются потери оптического излучения. При изменении внешнего давления от 0 до 50 Н потери увеличились с 22 дБ до 32 дБ.

Выводы. Горное давление представляет собой серьезную проблему при разработке угольного месторождения, и для мониторинга этого явления имеется ряд известных методов и средств, которые своевременно сигнализируют о критической ситуации в горной выработке. Однако существующие системы сложны в эксплуатации и имеют высокую стоимость. Датчик на основе оптического волокна обладает высокой чувствительностью, имеет практически линейную характеристику. Предложенная ВОСК позволяет контролировать горное давление и смещение пород кровли выработки без необходимости выполнять обход реперных станций маркшейдером. ВОД в составе системы способен контролировать состояние движения слоев кровли горной выработки угольной шахты. Лабораторный образец системы показал хорошие результаты и в дальнейшем планируется внедрение системы на одну из шахт АО «АрселорМиттал Темиртау».

Библиографический список

1. Kun P. Statistical analysis of coal mine accidents and its countermeasures // *China Coal*. 2015. 41. P. 114–118.
2. Whittaker B. N. Appraisal of strata control practice // *Minerals Engineering*. 1974. Vol. 134. P. 9–22.
3. Bhalla S., Yang Y. W., Zhao J. [et al.]. Structural health monitoring of underground facilities — Technological issues and challenges // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2005. 20. P. 487–500. DOI: 10.1016/j.tust.2005.03.003.
4. Staveley C. Get smart, go optical: Example uses of optical fibre sensing technology for production optimization and subsea asset monitoring // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2014. Vol. 47, Issue 1. P. 163–169.
5. Pei H.-F., Teng J., Yin J.-H. [et al.]. A review of previous studies on the application of optical fiber sensor in geotechnical health monitoring // *Measurement*. 2014. Vol. 58. P. 207–214. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.08.013.
6. Бурде В. А. Методы и средства локализации дефектов волокна в строительных длинах оптического кабеля // *Вестник связи*. 2010. № 7. С. 19–21.
7. Буймистряк Г. Волоконно-оптические датчики для экстремальных условий // *Control engineering Россия*. 2013. № 3 (45). С. 34–40.
8. Буймистряк Г. Я. Принципы построения интеллектуальных волоконно-оптических датчиков // *Фотон-Экспресс*. 2011. № 6 (94). С. 38–39.
9. Kinet D., Chah K., Gusarov A., Faustov A. Proof of Concept for Temperature and Strain Measurements with Fiber Bragg Gratings Embedded in Supercontainers Designed for Nuclear Waste Storage // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2016. Vol. 63 (3). P. 1955–1962. DOI: 10.1109/TNS.2016.2555337.
10. Kumar M. S. Investigation of hardness and surface roughness in end milling glass fibre reinforced polymer composite // *Metalurgija*. 2019. Vol. 58, no. 1-2. P. 109–112.
11. Yurchenko A., Mekhtiyev A., Neshina Ye. [et al.]. Passive Perimeter Security Systems Based On Optical Fibers Of G 652 Standard // *Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT*. 2019. Vol. 7. P. 31–36.
12. Mekhtiyev A. D., Yurchenko A. V., Neshina Ye. G. [et al.]. Nondestructive Testing for Defects and Damage to Structures in

Reinforced Concrete Foundations Using Standard G.652 Optical Fibers // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. Vol. 56. P. 179–190. DOI: 10.1134/S1061830920020072.

МЕХТИЕВ Али Джаванширович, кандидат технических наук, ассоциированный профессор, профессор кафедры «Эксплуатация электрооборудования» Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина, г. Нур-Султан, Республика Казахстан.

SPIN-код: 9596-8929

AuthorID (РИНЦ): 896194

ORCID: 0000-0002-2633-3976

AuthorID (SCOPUS): 57219935782

ResearcherID: R-2415-2017

Адрес для переписки: barton.kz@mail.ru

СОЛДАТОВ Алексей Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры управления инновациями Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники; профессор отделения электронной инженерии Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск.

SPIN-код: 6731-6134

AuthorID (РИНЦ): 130112

ORCID: 0000-0003-1892-1644

AuthorID (SCOPUS): 24725397500

ResearcherID: D-6232-2014

Адрес для переписки: asoldatof@mail.ru

НЕШИНА Елена Геннадьевна, магистр технических наук, заведующая кафедрой «Энергетические системы» Карагандинского технического университета (КарТУ), г. Караганда, Республика Казахстан.

SPIN-код: 6523-7029

AuthorID (РИНЦ): 895761

ORCID: 0000-0002-8973-2958

AuthorID (SCOPUS): 57191724446

ResearcherID: V-2303-2018

Адрес для переписки: 1_neg@mail.ru

АЛЬКИНА Алия Даулетхановна, магистр технических наук, старший преподаватель кафедры «Информационные технологии и безопасность» КарТУ, г. Караганда, Республика Казахстан.

ORCID: 0000-0003-4879-0593

AuthorID (SCOPUS): 57160184600

Адрес для переписки: alika_1308@mail.ru

Для цитирования

Мехтиев А. Д., Солдатов А. И., Нешина Е. Г., Алькина А. Д. Волоконно-оптическая система контроля геотехнических параметров горной выработки // *Омский научный вестник*. 2021. № 1 (175). С. 64–68. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-175-64-68.

Статья поступила в редакцию 12.01.2021 г.

© А. Д. Мехтиев, А. И. Солдатов, Е. Г. Нешина, А. Д. Алькина