

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 681.586'326 : 622.248.381

РАЗРАБОТКА КВАЗИРАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА СВОД ВЫРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

А. Д. Мехтиев^{1,2}, А. В. Юрченко², С. Г. Ожигин³, Е. Г. Нешина³, А. Д. Алькина³

¹Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина,

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

²Томский политехнический университет,

E-mail: niipp@inbox.ru, просп. Ленина, 30, 634050, г. Томск, Россия

³Карагандинский технический университет,

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

Рассмотрены вопросы, связанные с разработкой метода контроля горного давления с использованием оптических волокон. На основе одномодовых оптических волокон разработан датчик давления, способный с высокой точностью измерять горное давление на стенки выработки. Приведен математический аппарат для расчета интенсивности излучения световой волны, проходящей по оптическому волокну при механическом воздействии и без него. Разработана имитационная модель горной выработки с арочной металлической крепью, оснащенная волоконно-оптической системой мониторинга и датчиками давления, необходимая для практической отработки методов контроля горного давления и измерения геотехнических параметров. Важный элемент имитационной модели — аппаратно-программный комплекс, в интерфейсе которого представлено четыре контролируемые зоны с волоконно-оптическими датчиками давления. Данная система мониторинга взрывобезопасна и пригодна для использования в сверхкатегорийных шахтах по внезапному выбросу газа и пыли.

Волоконно-оптические датчики, система мониторинга, горное давление, шахта, взрывоопасная атмосфера, горная выработка, безопасность, горные работы, Карагандинский угольный бассейн, оптическое волокно

DOI: 10.15372/FTPRPI20210219

Карагандинский угольный бассейн, занимающий площадь около 4000 км², — один из крупнейших в мире и третий по запасам угля после Донецкого и Кемеровского. В настоящее время в эксплуатации находятся восемь шахт, которые заняты добычей коксующегося угля для нужд металлургической промышленности. Энергетический уголь преимущественно добывается открытым способом. Шахты Карагандинского угольного бассейна являются сверхкатегорийными и опасными по внезапному выбросу метана и угольной пыли. В таких условиях возможно использование только специального взрывозащищенного оборудования с искробезопасными цепями.

Идея заключается в создании волоконно-оптической системы мониторинга, способной в режиме реального времени отслеживать десятки различных параметров и хранить их на жестком диске до востребования. Стремительное развитие волоконно-оптической техники и технологий позволило существенно снизить стоимость оптического волокна и сократить затухание распространяющейся световой волны до 0.2 дБ/км, что обеспечивает передачу сигнала на расстояние до 100 км с энергетическими затратами в доли ватта. При помощи оптического волокна можно контролировать горное давление, состояние шахтной атмосферы, температуру угольного пласта, давление воды в подземном водоносном горизонте и многое другое, причем используется множество каналов и один обрабатывающий центр, расположенный в безопасной зоне. Развитие волоконно-оптических технологий породило ряд направлений их практического применения, еще в 70-е годы прошлого века появились первые образцы волоконно-оптических датчиков [1, 2]. Пределы измерения и точность этих датчиков превосходят существующие электронные аналоги, что позволило им получить широкое распространение в авиационной, космической, оборонной промышленности [2–3].

Актуальность развития данного направления науки и техники не вызывает сомнений, все преимущества волоконно-оптических датчиков достаточно подробно описаны [4–5]. Однако имеются нерешенные проблемы, тормозящие их повсеместное применение. Значительный интерес представляет использование волоконно-оптических датчиков для контроля горного давления на стенки выработок шахт, опасных по внезапному взрыву угольной пыли и газа. Научные исследования [5–7] послужили началом настоящей работы, а достигнутый положительный результат позволяет утверждать о возможности создания волоконно-оптических систем мониторинга нового поколения взамен существующих электронных систем с медными контрольными кабелями. Оптическое волокно способно эффективно работать во взрывоопасных условиях, так как измерительные сигналы от датчиков до блока контроля передаются импульсом света, что позволяет существенно сократить затраты электрической энергии. В настоящей работе рассмотрен вопрос разработки системы мониторинга горного давления на стенки выработок и крепи при помощи волоконно-оптических датчиков давления (ВОДД).

Основные запасы коксующего угля лежат на глубинах более 600 м, две шахты уже преодолели 800 м, остальные работают на близких значениях, поэтому возрастает горное давление, что приводит к случаям внезапного обрушения крепи выработок. Существующие методы контроля горного давления и прогнозирования обрушения сводов горных выработок [8–13] не всегда точны, и предлагаемый метод может стать альтернативой, но требует дальнейшего всестороннего изучения, а также практических испытаний. Помимо высоких метрологических характеристик ВОДД должны обладать высокой надежностью, долговечностью, стабильностью и быть совместимыми с микроэлектронными устройствами обработки информации при низкой трудоемкости изготовления и небольшой стоимости. В настоящее время контроль горного давления в окрестности выработок, закрепленных анкерной и арочной крепью, проводится с помощью реперных станций визуальными и инструментальными наблюдениями с участием маркшейдеров. Требуется наличие штатной единицы, отвечающей за периодический обход и контроль всех реперных станций шахты. Влияние на точность контроля оказывает человеческий фактор, также нужно учитывать внезапность изменения картины горного давления на определенных участках и формирование аварийно-опасных зон обрушения. Длительные наблюдения за проявлениями горного давления показали достаточно острую проблему внезапной деформации крепи, приводящую к существенному сокращению проектного сечения выработки. Возникает необходимость в разработке аппаратно-программных средств мониторинга горного давления, а также в проведении упреждающих мероприятий по усилению крепления выработок, предотвращающих случаи об-

рушения и деформации арочной крепи. Система мониторинга горного давления на основе волоконно-оптических технологий не только повысит уровень безопасности горных работ, но и снизит затраты на крепление и поддержание горных выработок благодаря усилению элементов крепи без допущения их выхода из строя за счет необратимых разрушений.

В качестве объекта исследования выбрано кварцевое одномодовое оптическое волокно 9/125 мкм (OS2) Corning SMF-28e+® с низким “водным пиком” (стандарт ITU-T G.652.D), первичное покрытие 245 мкм, на основе которого разрабатывается квазираспределенная система мониторинга горного давления при помощи ВОДД. Использование одномодовых волокон в отличие от многомодовых позволит увеличить длину сенсоров до 30–50 км, что даст возможность разместить устройство обработки сигналов на поверхности или в иной безопасной зоне. ВОДД имеют высокую линейность характеристик увеличения дополнительных потерь и коэффициента преломления при механическом воздействии на оптическое волокно (ОВ), позволяют добиться высокой точности и линейности характеристик при измерениях давления. При механическом воздействии на оптическое волокно формируется микроизгиб, вследствие чего возникает фотоупругий эффект. При этом изменяются свойства света, проходящие через его сердцевину, и в первую очередь его фазы и интенсивности. При снятии нагрузки микроизгиб исчезает и волокно принимает первоначальную форму. ВОДД приходят к первоначальному положению благодаря использованию упругих элементов, которые не позволяют повредить оптическое волокно. ВОДД связываются с реперной станцией через упругий элемент и при изменении положения репера изменяются свойства света, проходящего по ОВ, соответственно датчики распределяются по кровле выработки в местах установки реперных станций. ВОДД подключаются к волоконно-оптической линии связи через стандартные телекоммуникационные коннекторы, что исключает сварку оптического волокна в условиях горной выработки.

На рис. 1 предложенная квазираспределенная волоконно-оптическая система мониторинга горного давления на основе ВОДД, которая имеет классический интерферометр Маха–Цендера [6], усовершенствована и адаптирована к конкретным условиям горных выработок. Отличием является то, что в качестве сенсора используются три оптических одномодовых волокна G652.

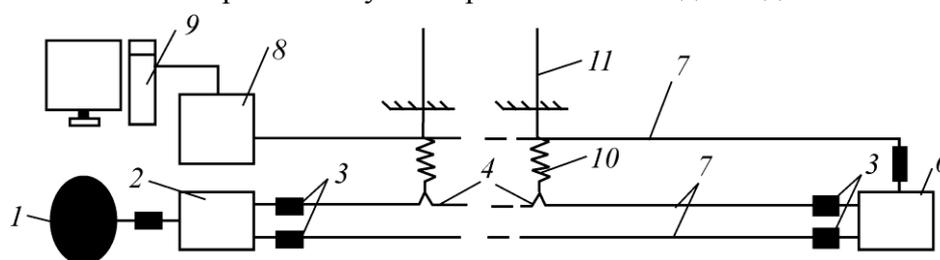


Рис. 1. Структурная схема интерференционной системы

Схема работает следующим образом: источник излучения 1 должен быть когерентным, лазерный луч с длиной волны 1310 или 1550 нм при помощи оптического разветвителя 2 разделяется на две оптические волны в соотношении 1/2. Данные длины волн наиболее оптимальны по величине затухания и оптическим потерям. Через оптические коннекторы 3 типа SC подключаются волоконно-оптические сенсоры 4, которые идентичны по своим параметрам и длине. На рис. 1 показано место механического воздействия 4 на оптическое волокно 5, приводящее к возникновению микроизгиба. В конце волоконно-оптические сенсоры подключены через коннекторы 3 к разветвителю 6 и выходному оптическому волокну 7, соответственно происходит интерференция обоих лучей. Далее оптические волны от обоих сенсоров попадают на фотоприемник устройства обработки данных 8.

Стандартные телекоммуникационные коннекторы типа SC необходимы для коммутации сенсоров, так как сварка оптических волокон в условиях взрывоопасной среды шахты недопустима, также возможно использование квазисоединений, у которых уровень затухания сигнала ниже. Когда оба плеча интерферометра находятся в невозмущенном состоянии в случае отсутствия механического воздействия и возникновения смещения, интерференционная картина остается неизменной. При механическом воздействии интерференционная картина изменяется и наблюдается оптическая разность хода в чувствительных волокнах (т. е. плечах интерферометра). Фотоприемное устройство выполнено на основе телевизионной матрицы. Использована матрица от камеры системы видеонаблюдения стандарта HD. При помощи аппаратно-программного комплекса, установленного на компьютере 9, ведется обработка изображений дифракционных пятен и любых изменений интерференционной картины, при этом можно зафиксировать любые микроизгибы, деформации и перемещения, возникающие в сенсорах, с достаточно высокой точностью в пределах границ нанометров. ВОДД соединяются через упругие элементы 10 к реперной станции 11. Деформации горной породы в слоях кровли вызывают смещение реперов, которые, перемещаясь, создают микроизгибы ОВ. Изменения фиксируются системой мониторинга, программное обеспечение разработано авторами на графическом языке программирования “G”, в среде LabVIEW 2018.

Еще одно достоинство данной интерференционной системы — возможность определения временной задержки регистрируемых сигналов в обоих плечах интерферометра, что позволяет установить место воздействия с точностью до нескольких метров. Следовательно, можно создать волоконно-оптическую систему мониторинга горного давления распределенного типа.

Рассмотрим математическое описание схемы измерения. Две световые когерентные волны, проходя по оптическим волокнам 5, падают на поверхность телевизионной матрицы, при этом их интенсивность выражается как $I \sim E^2$ [11]. Сложим две волны E_1 и E_2 :

$$I(t) = E_1 E_2 \cos[\Delta\Psi + \Delta\Psi(t)], \quad (1)$$

где $\Delta\Psi$ — начальная и имеющая случайный характер разность фаз интерферирующих световых волн; $\Delta\Psi(t)$ — разность фаз, связанная с изменением условий распространения в оптическом волокне под внешним механическим воздействием и деформации волокна, является малой поправкой на фоне первого слагаемого.

Полная разность фаз квазистационарна. Максимум интерференции достигается при $\Delta\Psi(t) = \pm 2\pi n$, где $n \in \mathbb{Z}$, когда $\cos(\Delta\Psi) = 1$ и $E_0 = E_{01} + E_{02}$. Все построенные волоконно-оптические измерительные системы распределенного типа имеют общую схему с интерферометром, а значит, и схожие недостатки. При изменении температуры оптического волокна на 1°C смещается начальное значение $\Delta\Psi$, заданное при настройке измерительного канала. Так как $\Delta\Psi$ большая величина и изменения ее намного больше, чем $\Delta\Psi(t)$, которая изменяется при механическом воздействии на волокно, создается ситуация ложного срабатывания датчика из-за температурных помех и смещения нуля. Для исключения воздействия помех и задержек следования импульсов в режиме автоколебаний, влияющих на нормальную работу системы мониторинга, необходимо использовать температурную коррекцию. Интенсивность I и показатели преломления в оптическом волокне зависят от механического воздействия и температуры:

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{1}{I \left(\frac{dI}{dT} \right) k \Delta T} + \frac{\delta I}{I}, \quad (2)$$

где I — интенсивность излучения на выходе из оптического волокна; ΔI — изменение интенсивности; $(dI/qT)k$ — частная производная температурной зависимости интенсивности; δI — изменение показателя интенсивности за счет фотоупругости.

Зависимость показателя преломления сердцевинны от температуры и деформаций можно выразить формулой

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{1}{n} \left(\frac{dn}{dT} \right) p \Delta T + \frac{\delta n}{n}, \quad (3)$$

здесь n — показатель преломления сердцевинны оптического волокна; Δn — изменение показателя преломления; $(dn/dT)p$ — частная производная по температуре, характеризующая изменение плотности кварцевого стекла; δn — изменение показателя преломления за счет фотоупругости.

Данный математический аппарат позволит определить изменение задержки оптического сигнала в секции измерительного канала. Например, если длина секции ВОД составит 1 км, то за счет его деформации 0.3% изменение задержки сигнала при длине оптического волокна 5 км при максимальном периоде следования импульсов в режиме автоколебаний будет составлять около 50 мкс. Это обеспечивает разницу в числе накопленных импульсов (сектл-картинок): за время накопления 30 накопится 38 импульсов. Следовательно, можно осуществлять температурную корректировку измерительного канала. При изменении температуры относительно калибровочной на 5°C показатель преломления составит $\Delta n = 4.964 \cdot 10^{-6}$. При длине ОВ в пределах 5 км и времени накопления 30 с время задержки в ОВ — около 0.16 нс, разница в числе накопленных импульсов равна 2. Компьютерное моделирование показало, что значения температуры ОВ также влияют на изменение показателя преломления, соответственно оптическое волокно может определять температуру в зоне измерения. Однако в случае использования его для контроля давления необходимо учитывать изменения показателя преломления. Поскольку внешнее изменение температуры может стать серьезным источником помех, планируется использовать в качестве сенсора одномодовое оптическое волокно длиной до 10 км.

Имитационная модель горной выработки с арочной металлической крепью, оснащенная волоконно-оптической системой мониторинга, разработана с помощью измерительной схемы (рис. 2). Имитационная модель необходима для практической отработки методов контроля горного давления и измерения геотехнических параметров выработок, а также для проверки выдвинутых ранее идей.

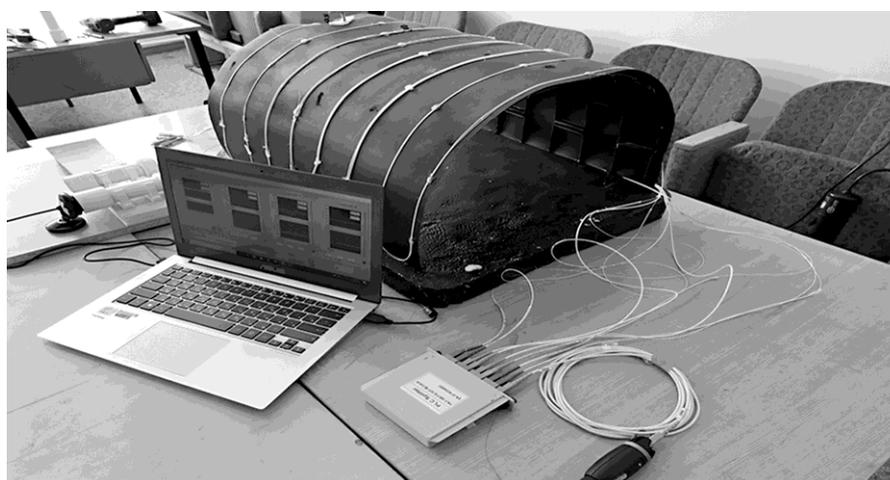


Рис. 2. Имитационная модель горной выработки

Стенки выработки выполнены из плотного электротехнического картона, арочная крепь имитирована стальной проволокой, основанием служил листовая пенополистирол. С внешней стороны приклеены ВОДД, по два на каждый измерительный канал. Воздействие на ВОДД осуществлялось при помощи стального стержня диаметром 2 мм. Использовано четыре измерительных канала, подключенных через оптический ответвитель 1/8; соответственно мощность источника излучения, которым является полупроводниковый лазер, разделяется на 8 равных частей. Для создания ВОДД используется оптическое волокно (стандарт ITU-T G.652.D). На выходе каждый канал имеет свой оптический ответвитель, который объединяет две световые волны и доставляет их к телевизионной матрице.

Имитационная модель имеет четыре телевизионные матрицы, которые подключены к устройству обработки данных. Данное устройство сочетается с персональным компьютером, имеющим программное обеспечение, разработанное авторами. Важным элементом имитационной модели является аппаратно-программный комплекс, в интерфейсе которого представлено четыре контролируемые зоны с ВОДД для измерения давления на свод горной выработки. Контролируемые параметры, устанавливаемые оператором: Event limit — количество событий в течение заданного времени; Event time — время срабатывания или период времени, в течение которого измеряемый параметр превышает верхний лимит; Upper limit — верхний порог срабатывания. Среднее и мгновенное значение амплитуды (количество пикселей дифракционного пятна) указаны в правом верхнем углу окна программы, для каждой зоны высчитываются отдельно.

Аппаратно-программный комплекс работает следующим образом: перед началом работы проводят калибровку устройства — устанавливают начальные параметры, затем камеры фиксируют изменение интенсивности светового пятна на выходе из ОВ до и после приложения давления на оптическое волокно. Изменение интенсивности световой волны пропорционально изменению давления на ВОДД.

Камера фиксирует изменение интенсивности, а обработка результатов осуществляется при помощи программного обеспечения, которое способно оценивать изменение площади дифракционного пятна и сравнивает с образцами пятен до механического воздействия. Все изменения фиксируются в памяти компьютера, и на основе анализа выдается результат изменения смещения ВОДД. К преимуществам аппаратно-программного комплекса можно отнести возможность внесения изменений в настройки диапазона измерения в режиме онлайн, не останавливая процесса управления, а также возможность менять вышедшее из строя оборудование без отключения питания.

ВОДД имеет линейную характеристику, обладает достаточно высокой чувствительностью и реагирует изменением фазы распространения моды оптического излучения при любом вибрационном воздействии в диапазоне частот 1 – 200 кГц. Опыты показали, что система мониторинга четко реагирует по всем четырем зонам как при отдельном воздействии на один ВОДД, так и при одновременном воздействии на несколько ВОДД. Ложные срабатывания исключаются за счет обработки сигнала с помощью программного обеспечения с обязательной температурной коррекцией путем автоматического внесения изменений в начальные значения коэффициента преломления, влияющего на распространение фазы светового излучения. Для наглядности наблюдения изменений световых пятен использован видимый диапазон лазерного излучения 650 нм. Кроме того, проведены опыты с невидимым диапазоном излучения, используемым в телекоммуникации 1310 и 1550 нм. Данный диапазон является оптимальным для протяженных сенсоров, имеющих длину 10 – 50 км от места дислокации пульта оператора, так как в нем отмечены минимальные затухания сигнала в одномодовом ОВ. Видимый диапазон лазерного излучения 650 нм имеет большую величину затухания сигнала и пригоден на более коротких дистанциях до 10 км.

ВЫВОДЫ

Предложенная квазираспределенная система мониторинга горного давления на основе ВОДД эффективна для использования в условиях атмосферы угольных шахт и рудников. Разработанная принципиальная схема и аппаратно-программный комплекс доказали свою работоспособность. Данная система мониторинга является взрывобезопасной и отвечает требованиям, предъявляемым к категории шахт опасных по внезапному выбросу газа и пыли. Работа направлена на решение производственных проблем угольных шахт предприятия АО «Арселор Миттал Темиртау», связанных с контролем горного давления для выбора оптимального способа крепления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Волчихин В. И., Мурашкина Т. И.** Проблемы создания волоконно-оптических датчиков // Датчики и системы. Измерения, контроль, автоматизация. — 2001. — № 7. — С. 54–58.
2. **Osório J. H., Chesini G., and Serrão V. A.** Simplifying the design of microstructured optical fibre pressure sensors, *Scientific Reports*, 2017, No. 7. — P. 1–7.
3. **Poeggel, S., Tosi D., Duraibabu D., Leen G., McGrath D., and Lewis E.** Optical fibre pressure sensors in medical applications, *Sensors*, 2015, No. 15. — P. 17115–17148.
4. **Frantisek U., Urban F., Kadlec J., Vlach R., and Kuchta R.** Design of a pressure sensor based on optical fiber bragg grating lateral deformation, *Sensors*, 2010, No. 10. — P. 11212–11225.
5. **Yurchenko A. V., Mekhtiyev A. D., Bulatbayev F. N., Neshina Y. G., and Alkina A. D.** The model of a fiber-optic sensor for monitoring mechanical stresses in mine working, *Russian J. of Nondestructive Testing*, 2018, Vol. 54, No. 7. — P. 528–533.
6. **Мехтиев А. Д., Юрченко А. В., Нешина Е. Г., Алькина А. Д., Мадиди П. Ш.** Физические основы создания датчиков давления на основе изменения коэффициента преломления света при микроизгибе оптического волокна // Изв. вузов. Физика. — 2020. — Т. 63. — № 2. — С. 129–136.
7. **Yurchenko A. V., Mekhtiyev A. D., Bulatbaev F. N., and Alkina A. D.** The use of optical fiber to control the sudden arch collapse of the mine working, *Int. Conf. on Innovations in Non-Destructive Testing (SibTest) IOP Publishing IOP Conf. Series: J. of Physics*, 2017, No. 881. — P. 1–5.
8. **Чотчаев Х. О.** Контроль напряженно-деформированного состояния горного массива звукометрическими и геофизическими методами // Геология и геофизика юга России. — 2016. — № 3. — С. 129–140.
9. **Абрамович А. С., Пудов Е. Ю., Кузин Е. Г., Кавардаков А. А., Бакин В. А.** Предпосылки создания системы автоматизированного мониторинга и учета смещений кровли подземных выработок с целью повышения безопасности ведения горных работ // *Вестн. КузГТУ*. — 2017. — № 5. — С. 85–90.
10. **Заятдинов, Д. Ф., Лысенко М. В.** Разработка системы электронного мониторинга состояния приконтурного массива пород горных выработок // *Уголь*. — 2017. — № 8. — С. 90–92.
11. **Буялич Г. Д., Тарасов В. М., Тарасова Н. И.** Взаимодействие секции механизированной крепи с боковыми породами как давление сползающих призм по гипотезе П. М. Цимбаревича. Развитие гипотезы до концепции // *Вестн. Науч. центра по безопасности работ в угольной пром-сти*. — 2014. — № 2. — С. 114–120.
12. **Буялич Г. Д., Тарасов В. М., Тарасова Н. И.** Повышение безопасности работ при взаимодействии секций механизированных крепей с кровлей в призабойном пространстве лавы // *Вестн. Науч. центра по безопасности работ в угольной пром-сти*. — 2013. — № 1–2. — С. 130–135.
13. **Гречишкин П. В., Розонов Е. Ю., Клишин В. И., Опрук Г. Ю., Щербаков В. Н.** Управление кровлей для повышения эффективности поддержания выработок, охраняемых податливыми целиками // *Уголь*. — 2019. — № 10. — С. 35–41.

Поступила в редакцию 16/ХП 2020

После доработки 06/П 2021

Принята к публикации 15/Ш 2021