

Разработка волоконно-оптического датчика для контроля идентификации геотехнического состояния

^{1*}МЕХТИЕВ Али Джаванширович, к.т.н., профессор, barton.kz@mail.ru,

²НЕШИНА Елена Геннадьевна, к.т.н., зав. кафедрой, 1_neg@mail.ru,

³АЙМАГАМБЕТОВА Раушан Жанатовна, магистр, зам. руководителя департамента, rauwan2012@mail.ru,

²КАЛИАСКАРОВ Нурбол Балтабаевич, PhD, и.о. зав. кафедрой, 90nurbol@mail.ru,

⁴ЮРЧЕНКО Алексей Васильевич, д.т.н., профессор, niipr@inbox.ru,

¹НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», Казахстан, Астана, пр. Женис, 62,

²НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Казахстан, Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56,

³Казахстанский институт стандартизации и метрологии, Казахстан, Астана, пр. Мәңгілік Ел, 11,

⁴Томский политехнический университет, Россия, Томск, пр. Ленина, 30,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Применение волоконно-оптических технологий в условиях предприятий угольной промышленности обоснованно, так как оптоволоконные датчики наиболее чувствительны, без влияния электромагнитного поля, взрывобезопасны, обладают коррозионной стойкостью. Оптоволоконная технология также была внедрена в горнодобывающей промышленности для обнаружения деформации, обнаружения подземных газов, таких как метан, и мониторинга подземной выработки. Влияние на точность контроля оказывает человеческий фактор, также нужно учитывать внезапность изменения картины горного давления на определенных участках и формирования аварийно-опасных зон обрушения. Длительные наблюдения за проявлениями горного давления показали достаточно острую проблему внезапной деформации крепи, приводящую к существенному сокращению ее сечения, соответственно, возникает необходимость в разработке аппаратно-программных средств мониторинга горного давления, что позволит получить более точный инструмент и при первоначальных его изменениях проводить упреждающие мероприятия по усилению крепления выработок, предотвращая случаи обрушения и деформации арочной крепи. Целью настоящей работы является разработка волоконно-оптического датчика для контроля идентификации геотехнического состояния и повышения эффективности контроля и обеспечения безопасности ведения горных работ в условиях повышенной опасности по внезапному взрыву газа и пыли.

Ключевые слова: волоконно-оптические датчики, деформация, мониторинг, идентификация, удаленный контроль.

Введение. Волоконно-оптические линии передачи информации, являющиеся достижением конца XX века, благодаря своей пропускной способности нашли применение в информационно-измерительных системах (ИИС). При этом оптическое волокно (ОВ) может быть использовано в качестве датчиков при построении ИИС для измерения электрических и неэлектрических величин [1]. Помимо высоких метрологических характеристик датчики должны обладать высокой надёжностью, долговечностью, стабильностью и быть совместимыми с микроэлектронными устройствами обработки информации при низкой трудоёмкости изготовления и небольшой

стоимости. Данным требованиям в максимальной степени удовлетворяют современные волоконно-оптические датчики [2-4]. Отличительной особенностью ИИС с использованием ВОД является то, что в качестве датчика используется оптическое волокно, источник оптического излучения и светоприемное устройство. Вместо контрольного кабеля с электрическими сигналами используется световод, по которому передается свет. Световод одновременно является измерительным органом и транспортной магистралью для передачи информации к устройствам контроля и сравнения данных. Данное обстоятельство весьма важно для использования в подземных горных выработках,

опасных по внезапному выбросу газа и пыли.

Актуальность работы. Строительство предприятий, которые будут производить и перерабатывать полезные ископаемые для конкретного рынка с минимальными эксплуатационными расходами и высокими требованиями к безопасности, требует создания единой системы безопасности. Главным аспектом работы любой шахты или рудника является безопасность проведения работ.

Горнодобывающее предприятие – это производственная среда, характеризующаяся большой протяженностью с риском возникновения пожара и взрыва. В связи с этим необходима для применения надежная и безопасная информационно-измерительная система. Актуальность работы обусловлена важностью вопроса предупреждения о внезапных изменениях параметров, влияющих на прочность горной выработки и обеспечивающих защиту персонала от внезапного обрушения.

Надежная работа любого горнодобывающего предприятия зависит от строгого соблюдения требований безопасности, для чего необходимо иметь достоверные сведения о геотехническом состоянии горной выработки. Поэтому сбор необходимой информации и своевременная передача лицу, принимающему решение, – одна из важных проблем, требующая внимания.

Волоконно-оптические датчики (ВОД) способны с высокой точностью измерять следующие параметры: температура воздуха, напряжение деформации состояния выработки, загазованность. В отличие от традиционных электронных датчиков, волоконно-оптические не могут создавать ситуации, повлекшие за собой взрыв или пожар в горной выработке, т.к. не чувствительны к перепадам напряжения, и не могут создать короткое замыкание. На сегодняшний день стоимость 1 км оптического волокна составляет около 9 долларов США за км, что позволяет создать отечественные системы. Благодаря уникальным свойствам оптических волокон свет распространяется на 100-150 км практически без потерь. К тому же в отличие от традиционных систем контроля нет необходимости использования цветных металлов (меди).

Шахты должны быть оборудованы системой или комплексом средств, которые способны осуществлять безопасное производство, а также информационную поддержку контроля и управления технологическими и производственными процессами в нормальных и аварийных условиях. На первом месте в горном производстве стоит его безопасность, на что указывают все нормативные документы. Поэтому требуется разработка методов и средств, обеспечивающих или отвечающих всем требованиям.

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

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

Объектом исследования является предупреждение о внезапных изменениях параметров, влияющих на прочность горной выработки и обеспечивающих защиту персонала от внезапного обрушения. Использование энергоэффективной распределенной системы волоконно-оптических сенсоров и направляющей системы связи с низкими показателями затухания сигнала и высоким уровнем помехозащищенности, а также аппаратно-программного комплекса для обработки данных позволит с высокой точностью идентифицировать любые механические воздействия на горный массив выработки с целью своевременного предупреждения обрушения ее стенок. Вопросы исследования применения оптического волокна для создания датчиков либо разработки информационно-измерительных систем посвящены работы: В.Д. Буркова, В.И. Бусурина, М.М. Бутусова, В.М. Гречишникова, В.Г. Жилина, Е.А. Зак, Н.Е. Конюхова, Я.В. Малкова, Т.И. Мурашкиной, А.Л. Патлах, В.Т. Потапова, Н.П. Удалова, Т. Ли, Ч. Ванг, Ю. Чао и Ю. Нинг. Несмотря на проведенные исследования, разработанные датчики недостаточно безопасны, так как чувствительны к перепадам напряжения. Оптоволоконная технология внедряется в горнодобывающую промышленность для обнаружения деформации с 2006 г. [5]. Мировыми производителями ВОД являются компании: Siemens, ABB, Roctest, Weterford, BackerHughes, Halliburton, Schlumberger и российские предприятия «Омега», «Оптолинк», «Интел-Системы».

Проанализировав мировой опыт развития направления ВОД в странах западной Европы и США, а также разработки ученых России, работающих в направлении развития волоконно-оптических датчиков (В.Д. Бурков, В.И. Бусурин, М.М. Бутусов, В.М. Гречишников, В.Г. Жилин, Е.А. Зак, Н.Е. Конюхов, Я.В. Малков, Т.И. Мурашкина, А.Л. Патлах, В.Т. Потапов, Н.П. Удалов и др.), можно сказать, что их работы направлены на совершенствование и создание различных волоконно-оптических систем контроля, мониторинга и измерений. Вопросы по изготовлению оптического волокна рассматривались в источниках [6-7]. Проводятся научные работы в направлении использования ВОД для создания внутренних волоконно-оптических сетей сбора информации в условиях повышенной искро- и взрывоопасности. Особенно много работ посвящено использованию оптоволоконных датчиков в оборонной, авиакосмической, авиационной, транспортной, нефтегазовой сферах, а также в строительстве и медицине как перспективных средств мониторинга, измерения и контроля параметров, при этом спрос на

данные датчики ежегодно растет [7].

Проведенные исследования. Система идентификации геотехнического состояния на основе волоконно-оптических технологий позволит не только повысить уровень безопасности проведения горных работ, но и снизить затраты на крепление и поддержание горных выработок в целом. Оптическое волокно может контролировать не только параметры горного давления, но и шахтную атмосферу, температуру угольных пластов и другие параметры, можно существенно расширить функции системы идентификации. В настоящий момент времени контроль горного давления выработок, закрепленных анкерной и арочной крепью, проводится с помощью реперных станций двойной или тройной высоты, а также визуальным и инструментальными наблюдениями с участием маркшейдеров. Влияние на точность контроля оказывает человеческий фактор, также нужно учитывать внезапность изменения карти-

ны горного давления на определенных участках и формирования аварийно-опасных зон обрушения. Длительные наблюдения за проявлениями горного давления показали достаточно острую проблему внезапной деформации крепи, приводящую к существенному сокращению ее сечения, соответственно, возникает необходимость в разработке аппаратно-программных средств мониторинга горного давления, что позволит получить более точный инструмент и при первоначальных его изменениях проводить упреждающие мероприятия по усилению крепления выработок, предотвращая случаи обрушения и деформации арочной крепи. На рисунках 1 и 2 показаны изменения, зафиксированные при разной глубине установки репера (2,1 м, 4 м, 7 м) в течение 60 суток. Измерения проводились на разных участках забоя, что дает статистическую картину по деформации арочной крепи.

Можно сделать вывод, что особое внимание

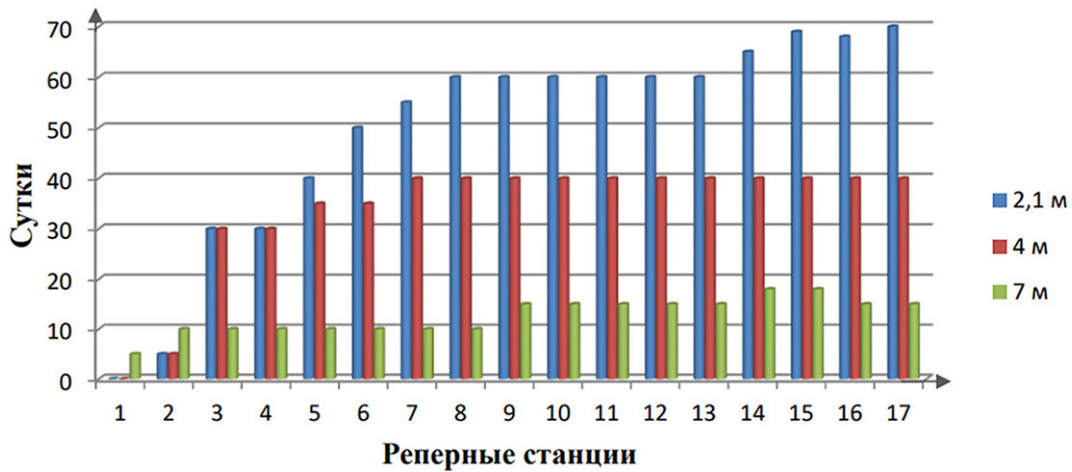


Рисунок 1 – Изменения на реперных станциях, установленных в выработке на сопряжении с очистным забоем

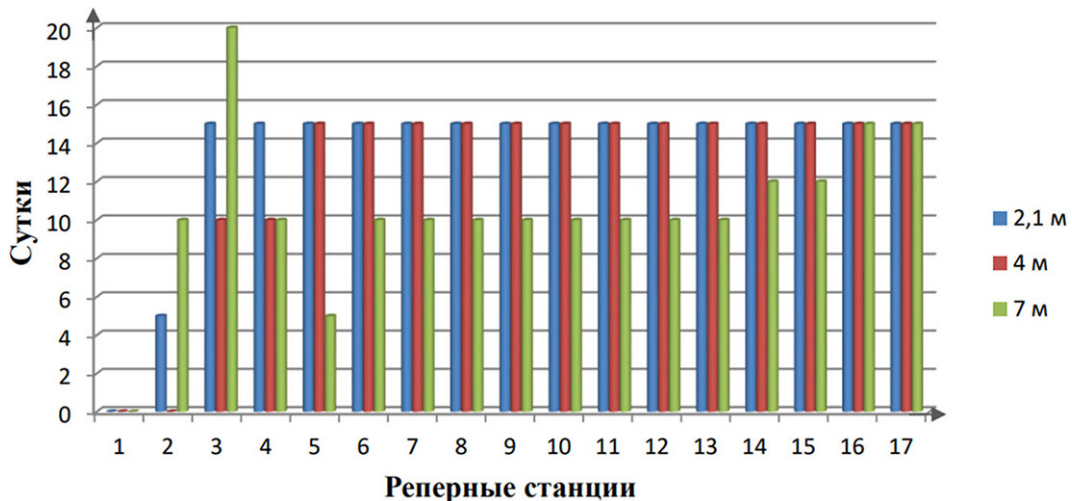


Рисунок 2 – Изменения на реперных станциях, установленных в выработке на очистительных сооружениях

необходимо уделить контролю за горным давлением в местах сопряжения, на выработках с анкерным креплением. Система идентификации геотехнического состояния на основе волоконно-оптических технологий позволит не только повысить уровень безопасности проведения горных работ, но и снизить затраты на крепление и поддержание горных выработок в целом. Оптическое волокно может контролировать не только параметры горного давления, но и шахтную атмосферу, температуру угольных пластов и другие параметры, можно существенно расширить функции системы идентификации [8].

Конструкция разработанного волоконно-оптического датчика представлена на рисунке 3 [8].

К оптическому ваттметру 1 и источнику оптического излучения 2 подсоединяется оптическое волокно 3, помещенное в корпус 10. Волокно проходит между держателем 4 и уплотнительным элементом 6. С помощью держателя уплотнительный элемент соединен со стальной пластиной 5, которая закрепляется с элементом крепления троса 7, к которому присоединен трос 8, с распором 9 на конце. Смещение горной породы в слоях кровли вызывает смещение распора датчика, который, перемещаясь, вызывает микроизгибы ОВ. Все изменения фиксируются системой идентификации, а программное обеспечение переводит все изменения свойств света в единицы измерения давления. При изменении положения репера изменяются и свойства света, проходящего по ОВ, соответственно датчики будут распределены по кровле выработки в местах установки реперных станций. Чувствительность разработанного датчика в 5 раз превышает чувствительность применяемых реперных станций, что было рассмотрено в [8]. При этом необходимо учитывать, что оператор осуществляет контроль параметров реперной станции визуально, уверенно может заметить смещение уровня репера не менее чем на 5 мм, что является ценой деления. В то время как датчик способен фиксировать изменения в 1 мм дистанционно и непрерывно в режиме реального времени. Диапазон измерений датчика составляет 0-100 мм смещения. Порог чувствительности составляет 1 мм.

Был проведен ряд экспериментов по определению потерь мощности оптического излучения, проходящего по плечам ВОД при различном значении смещения датчика. Измерение значений перемещений датчика осуществлялось многократно с последующей обработкой данных эксперимента и усреднением полученных значений при помощи линейки. Для измерения потерь мощности оптического излучения использовался измеритель оптической мощности VIAVI (JDSU) SmartPocket OLP-38, работающий в динамическом диапазоне от -60 до +26 дБ, с диапазоном длины волны 780-1650 нм. В качестве источника оптического излучения использовался SmartPocket OLS-34/35/36. Результаты экспериментов представле-

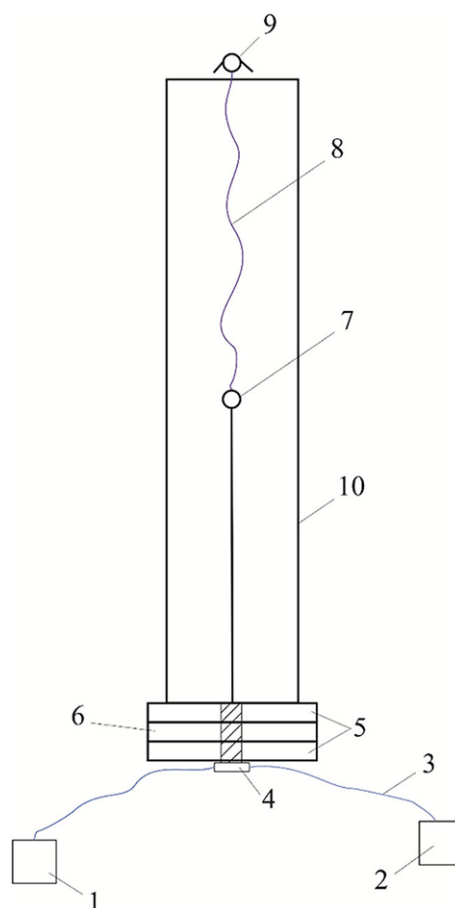


Рисунок 3 – Конструкция волоконно-оптического датчика

ны графиком зависимости оптических потерь от значения смещений датчика, представлены на рисунке 4.

Результаты работы. Результаты экспериментов обработаны с учетом наименьшего значения информационного критерия Акаике, выбран лучший вариант аппроксимации, при которой коэффициент детерминации $R^2 = 0,982$. Лабораторный образец ВОД на основе интерферометра Маха-Цендера показал линейность и точность при проведении измерений и может быть использован для контроля деформации массива после соответствующей доработки его конструкции.

Аналогом разработанного датчика является ВОД интерферометрического типа на двух одномодовых волокнах, работающий по принципу Маха-Цендера. В его состав входят: источник оптического излучения (лазер), коллимирующая система с линзами, делители светового потока, микрообъективы, измеритель разности фаз. Условием работы данной схемы является обязательное соблюдение принципа квадратур, откуда вытекает необходимость в стабилизации фазы волны в опорном волокне, используется изоляция от воздействия внешних факторов, для этого используются различные методы стабилизации рабочей точки интерферометра, не приводящие к компактности.

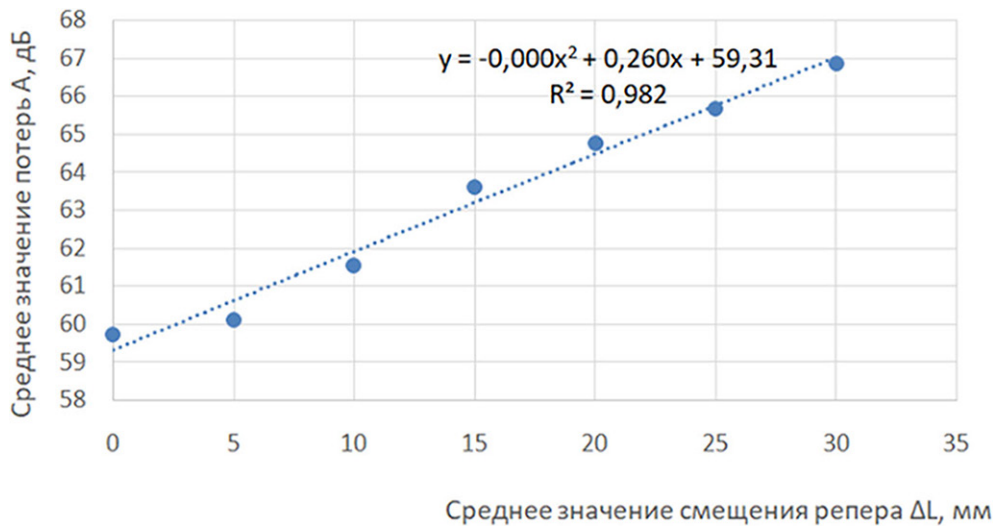


Рисунок 4 – График зависимости оптических потерь от значения смещений репера

Выводы. Смоделированный датчик на основе оптического волокна имеет достаточную линейность. При приложенном давлении на стальные стержни от 1 до 10 МПа сохраняется его стабильная линейная характеристика, что создает возможность использования его в качестве измерительного органа со стороны массива горных пород для контроля и горного давления внезапного обрушения свода выработки из-за образовавшихся дефектов. Физические основы создания датчиков давления на основе изменения коэффициента преломления при микроизгибе оптиче-

ского волокна типа G.652 можно выразить через изменение дифракционного пятна, падающего на поверхность фотоприемника.

Данная научная работа является результатом, полученным в ходе реализации проекта ИРН № BR19980899 «Разработка системы мониторинга геотехнического состояния горных выработок шахт и карьеров на основе интеллектуальных волоконно-оптических датчиков», в рамках программно-целевого финансирования Министерства торговли и интеграции Республики Казахстан.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. на полезную модель РК 4220. Волоконно-оптический датчик измерения деформации металлических и неметаллических поверхностей / Мехтиев Р.А., Нешина Е.Г., Мехтиев А.Д., Алькина А.Д., Югай В.В.; заявл. 28.03.19; Опубл. 01.08.2019.
2. Буймистряк, Г. Волоконно-оптические датчики для экстремальных условий / Г. Буймистряк // Control Engineering Россия. – 2013. – № 3 (45). – С. 34-40.
3. Kumar, V. Fiber optic methane and strain sensors for mines / V. Kumar // Photonics (ICP) International Conference. – 2010. – Pp. 79-84.
4. Ding, M. Basics of Optical Fiber Measurements / M. Ding, D. Fan, W. Wang, Y. Luo, G.-D. Peng // Handbook of Optical Fibers. – 2018. – 39 p.
5. Твердов, А.А. Инновации в горном деле / А.А. Твердов, А.В. Жура, С.Б. Никишичев // Горная промышленность. – 2013. – № 2 (108). – С. 48.
6. Коробейников, А.Г. Проблемы производства высокопрочного оптического волокна / А.Г. Коробейников, Ю.А. Гатчин, К.В. Дукельский, Е.В. Тер-Нерсесянц // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 2 (84). – С. 18-23.
7. Liu, T. Advances of optical fiber sensors for coal mine safety monitoring applications / T. Liu, Y. Wei, G. Song, Y. Li, J. Wang, Y. Ning, Y. Lu // Proceedings of the 2013 International Conference on Microwave and Photonics. – 2013. – Pp. 102-111.
8. Нешина Е.Г. Волоконно-оптическая система контроля идентификации геотехнического состояния: Дис. ... канд. техн. наук, 05.11.13. – Томск, 2021. – 149 с.

Геотехникалық жағдайды сәйкестендіруді бақылау үшін талшықты-оптикалық датчикті әзірлеу

¹*МЕХТИЕВ Али Джаванширович, т.ғ.к., профессор, barton.kz@mail.ru,

²НЕШИНА Елена Геннадьевна, т.ғ.к., кафедра меңгерушісі, 1_neg@mail.ru,

³АЙМАГАМБЕТОВА Раушан Жанатовна, магистр, департамент басшысының орынбасары, rauwan2012@mail.ru,

²КАЛИАСКАРОВ Нурбол Балтабаевич, PhD, кафедра меңгерушісі м.а., 90nurbol@mail.ru,

⁴ЮРЧЕНКО Алексей Васильевич, т.ғ.д., профессор, niipr@inbox.ru,

¹«С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Қазақстан, Астана, Жеңіс даңғылы, 62,

²«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Қарағанды, Н. Назарбаев даңғылы, 56,

³Қазақстан стандарттау және метрология институты, Қазақстан, Астана, Мәңгілік Ел даңғылы, 11,

⁴Томск политехникалық университеті, Ресей, Томск, Ленин даңғылы, 30,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Көмір өнеркәсібі кәсіпорындары жағдайында талшықты-оптикалық технологияларды қолдану негізделген, өйткені талшықты-оптикалық датчиктер электрмагниттік өрістің әсерінсіз, жарылысқа төзімді, коррозияға төзімді болады. Талшықты-оптикалық технология деформацияны, метан сияқты жер асты газдарын және жерасты мониторингін анықтау үшін тау-кен өнеркәсібіне де енгізілді. Бақылаудың дәлдігіне адами фактор әсер етеді, сонымен қатар белгілі бір жерлерде тау қысымының көрінісінің кенеттен өзгеруін және апатты-қауіпті құлау аймақтарының пайда болуын ескеру қажет. Тау қысымының көріністерін ұзақ мерзімді бақылау бекіткіштің кенеттен деформациясының айтарлықтай өткір проблемасын көрсетті, бұл оның қимасының айтарлықтай қысқаруына әкеледі, сәйкесінше тау қысымын бақылаудың аппараттық-бағдарламалық құралдарын әзірлеу қажеттілігі туындайды, бұл дәлірек құралды алуға және оның алғашқы өзгерістері кезінде қазбаларды бекітуді күшейту бойынша алдын-ала іс-шаралар жүргізуге мүмкіндік береді, доғалы қысымның құлауы мен деформациясының алдын алады. Осы жұмыстың мақсаты геотехникалық жай-күйді сәйкестендіруді бақылау және бақылаудың тиімділігін арттыру және газ бен шаңның кенеттен жарылуы бойынша қауіптілігі жоғары жағдайларда тау-кен жұмыстарын жүргізу қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін талшықты-оптикалық датчикті әзірлеу болып табылады.

Кілт сөздер: талшықты-оптикалық датчиктер, деформация, бақылау, сәйкестендіру, қашықтықтан басқару.

Development of a Structural and Functional Scheme of a Distributed Wi-Fi Monitoring System for Bridge Structures and Construction Buildings

¹*МЕКHTИYEV Али, Cand. of Tech. Sci., Professor, barton.kz@mail.ru,

²NEШИНА Yelena, Cand. of Tech. Sci., Head of Department, 1_neg@mail.ru,

³AIMAGAMBETOVA Raushan, Master, Deputy Head of Department, rauwan2012@mail.ru,

²KALIASKAROV Nurbol, PhD, Acting Head of Department, 90nurbol@mail.ru,

⁴YURCHENKO Aleksey, Dr. of Tech. Sci., Professor, niipr@inbox.ru,

¹NCJSC «S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University», Kazakhstan, Astana, Zhenis Avenue, 62,

²NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University», Kazakhstan, Karaganda, N. Nazarbayev Avenue, 56,

³Kazakhstan Institute of Standardization and Metrology, Astana, Mangilik El Avenue, 11,

⁴Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin Avenue, 30,

*corresponding author.

Abstract. The use of fiber-optic technologies in the conditions of coal industry enterprises is justified, since fiber-optic sensors are the most sensitive, without the influence of an electromagnetic field, explosion-proof, and corrosion resistant. Fiber optic technology has also been introduced in the mining industry to detect deformation, detect underground gases such as methane, and monitor underground. The human factor has an impact on the accuracy of control, it is also necessary to take into account the suddenness of changes in the picture of mountain pressure in certain areas and the formation of emergency-hazardous collapse zones. Long-term observations of the manifestations of rock pressure have shown a rather acute problem of sudden deformation of the support, leading to a significant reduction in its cross-section, respectively, there is a need to develop hardware and software for monitoring rock pressure, which will allow you to get a more accurate tool and, with its initial changes, carry out proactive measures to strengthen the fastening of workings, preventing cases of collapse and deformation of the arch support.. The purpose of this work is to develop a fiber-optic sensor for monitoring the identification of the geotechnical condition and improving the efficiency of monitoring and ensuring the safety of mining operations in high-risk conditions due to a sudden explosion of gas and dust.

Keywords: fiber-optic sensors, deformation, monitoring, identification, remote control.

REFERENCES

1. Pat. na poleznuju model' RK 4220. Volokonno-optičeskij datchik izmerenija deformacii metallicheskih i nemetallicheskih poverhnostej / Mehtiev R.A., Neshina E.G., Mehtiev A.D., Al'kina A.D., Jugaj V.V.; zajavl. 28.03.19; Opubl. 01.08.2019.
2. Bujmistrjuk, G. Volokonno-optičeskie datchiki dlja jekstremal'nyh uslovij / G. Bujmistrjuk // Control Engineering Russia. – 2013. – No. 3 (45). – Pp. 34-40.
3. Kumar, V. Fiber optic methane and strain sensors for mines / V. Kumar // Photonics (ICP) International Conference. – 2010. – Pp. 79-84.
4. Ding, M. Basics of Optical Fiber Measurements / M. Ding, D. Fan, W. Wang, Y. Luo, G.-D. Peng // Handbook of Optical Fibers. – 2018. – 39 p.
5. Tverdov, A.A. Innovacii v gornom dele / A.A. Tverdov, A.V. Zhura, S.B. Nikishichev // Gornaja promyshlennost'. – 2013. – No. 2 (108). – 48 p.
6. Korobejnikov, A.G. Problemy proizvodstva vysokoprochnogo optičeskogo volokna / A.G. Korobejnikov, Ju.A. Gatchin, K.V. Dukel'skij, E.V. Ter-Nersesjanc // Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki. – 2013. – No. 2 (84). – Pp. 18-23.
7. Liu, T. Advances of optical fiber sensors for coal mine safety monitoring applications / T. Liu, Y. Wei, G. Song, Y. Li, J. Wang, Y. Ning, Y. Lu // Proceedings of the 2013 International Conference on Microwave and Photonics. – 2013. – Pp. 102-111.
8. Neshina E.G. Volokonno-optičeskaja sistema kontrolja identifikacii geotehnicheskogo sostojanija: Dis. ... kand. tehn. nauk, 05.11.13. – Tomsk, 2021. – 149 p.