

П. Ш. МАДИ<sup>1,2</sup>  
А. Д. АЛЬКИНА<sup>2</sup>  
А. В. ЮРЧЕНКО<sup>1</sup>  
А. Д. МЕХТИЕВ<sup>3</sup>  
Р. Ж. АЙМАГАМБЕТОВА<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет,  
г. Томск

<sup>2</sup>Карагандинский технический  
университет имени Абылкаса Сагинова,  
г. Караганда, Республика Казахстан

<sup>3</sup>Казахский агротехнический  
университет им. С. Сейфуллина,  
г. Нур-Султан, Республика Казахстан

<sup>4</sup>Казахстанский институт  
стандартизации и метрологии,  
г. Нур-Султан, Республика Казахстан

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ

В данной работе представлены вопросы, связанные с разработкой системы контроля смещения горного массива, приводящего к обрушению бортов карьера. Система контроля использует точечные волоконно-оптические сенсоры. Волоконно-оптические сенсоры выполнены на основе Single Mode оптических волокон. Разработан лабораторный образец точечного волоконно-оптического сенсора, выполненного на основе двухплечевого интерферометра Маха—Цендера с использованием Single Mode оптического волокна для контроля смещений. Имитационный стенд лабораторного образца волоконно-оптического сенсора показал высокую точность измерений, линейность и может применяться для контроля устойчивости бортов карьера после усовершенствования конструкции. Полученные экспериментальные данные обрабатывались с помощью компьютерной программы Wolfram Alpha. Также разработан комплекс контроля программно-аппаратный с широким набором элементов, позволяющий регулировать чувствительность и имеющий элементы машинного обучения.

**Ключевые слова:** оптическое волокно, сенсор, контроль, карьер, безопасность, откосы.

**Введение.** Республика Казахстан входит в десятку крупнейших производителей угля на мировом рынке, занимает 3-е место по запасам, 1-е место — по добыче угля на душу населения среди стран СНГ, а также после России занимает 2-е место среди стран СНГ по объемам добычи полезных ископаемых. Страна активно разрабатывает полезные ископаемые открытым способом, а именно карьеры: меднорудные — 12, полиметаллические — 6, золоторудные — 7, железорудные — 7, угольные — 10 и более, марганцевые — 5, бокситовые, нерудные и другие. Открытые горные работы ведутся на более 50 крупных и средних месторождениях.

Открытые разработки по глубине карьеров на некоторых месторождениях достигают до 400–600 м, а некоторые в пределах от 100–300 м. С ростом глубины карьера растет и срок службы бортов карьера. Все открытые разработки характеризуются

наличием карьеров с огромным сроком службы, которые превышают 60-летний рубеж и более, когда в среднем расчетный срок колеблется в пределах от 20 до 30 лет. В связи с ростом глубины карьера, как правило, ухудшаются геотехнические и геомеханические параметры устойчивости бортов карьеров.

В настоящее время развитие карьеров характеризуется усовершенствованием новых процессов и приобретением новых средств, новейших технологических решений при добыче месторождений полезных ископаемых для безопасной и бесперебойной работы в горнодобывающей промышленности. Особая роль отведена надежному обоснованию и обеспечению контроля устойчивости бортов карьера. Масштабы горных предприятий требуют постоянного контроля за происходящими геотехническими, геомеханическими процессами устой-

чивости бортов карьеров в период эксплуатации. В связи с этим карьеры должны быть снабжены автоматизированными системами для дистанционного контроля устойчивости бортов карьеров [1].

В настоящее время активно развивается волоконная оптика. Интерес ученых к разработке и созданию автоматизированных систем измерения на основе волоконно-оптической технологии [2] значительно возрос. Это можно объяснить некоторыми существенными преимуществами, такими как высокая чувствительность к внешним воздействиям, защита от электромагнитных помех, а также возможность создания комплекса контроля на основе волоконно-оптических технологий с четкими физическими принципами. С точки зрения масштабного внедрения, это очень важно.

В области контроля устойчивости откосов особенно важно измерять параметры поля деформации. Способ решения этих проблем заключается в использовании физико-технических основ волоконно-оптических датчиков физических величин как главных чувствительных элементов измерительных изделий нового поколения — интеллектуальных информационно-измерительных приборов и систем [3].

**1. Анализ проблемы исследования.** Анализ мониторинга устойчивости карьерных откосов показывает, что в настоящее время стабильное состояние бортов карьера является одной из основных проблем при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом. Ученые в стране и за рубежом внесли значительный вклад в решение этой проблемы, создали научные школы и заложили основу для решения проблемы устойчивости карьерного склона. Однако вопрос обеспечения безопасности устойчивости бортов карьера, обусловленный разнообразием и сложностью горных работ, нуждается в дальнейшем совершенствовании решений [4–7]. Своевременная разработка мер по контролю устойчивости бортов карьера во многом зависит от достоверности понимания условий и причин деформации. Прогнозирование и обеспечение безопасной устойчивости бортов карьера является одним из важных и основных вопросов при работе на горных предприятиях.

Для глубоких карьеров особенно важной задачей является обеспечение устойчивости бортов и берм карьера. В работе авторов представлено совершенствование методов съемки склонов с помощью наземной фотограмметрии, установление значений основных погрешностей позиционирования камер в локальной геодезической сети, что улучшает качество геомеханического мониторинга на горных предприятиях [8]. Предлагаемый способ съемки заключается в позиционировании изображений в системе геодезической опорной сети путем измерений электронным тахеометром. Электронная тахеометрия сокращает время на ведение полевых работ и лабораторную обработку данных измерений [9]. Однако этот метод наблюдения имеет некоторые недостатки: невозможно полностью охватить наблюдением труднодоступные и опасные участки деформации карьера; в опасных зонах есть наблюдатели; контролируется локальный, систематический характер стабильного состояния горного массива. Работа [8] также дополнена теоретическим анализом применения БЛА (беспилотный летательный аппарат) при проведении работ по определению устойчивости откосов в карьере, который основан на опыте авторов по применению

беспилотного летательного аппарата в карьерах. В данном теоретическом сравнении акцент делается в основном на работоспособность применения беспилотного летательного аппарата, который в случае открытых горных работ создает практически устойчивый ветровой вихрь со скоростью, превышающей допустимую скорость работы роторов беспилотного летательного аппарата. Однако наряду с достоинствами беспилотного летательного аппарата имеются следующие недостатки: зависимость от погодных условий; зависимость о скорости интернета; птицы; опасность травм и солнечных ожогов; дорогое программное обеспечение и аппаратная часть; длительность сбора необходимой информации.

Анализ проблемы исследования показывает, что существующие методы имеют достоинства и эффективны, однако возникает вопрос разработки нового метода, основанный на технологии оптического волокна, который обладает преимуществами, описанными ранее в [10, 11], где предложенная конструкция волоконно-оптических сенсоров в работе посвящена вопросам разработки физических основ создания сенсоров, которые могут быть использованы для контроля геотехнического состояния горных выработок.

Также авторами [12] рассмотрены пути решения проблемы разработки системы контроля перемещений в карьерах, которые являются основной причиной обрушения бортов и берм в карьерах. Работа направлена на создание средств управления процессом деформации и смещения горного массива, а результаты исследования помогут предотвратить несчастные случаи, связанные с обрушением бортов. Поскольку рост трещин в породах горного массива приводит к его внезапному обрушению, создающему значительную опасность для персонала и выходу из строя горного оборудования.

Представлен [13] разработанный лабораторный испытательный стенд, имитирующий горную выработку и элементы арочной опоры, на которых установлены волоконно-оптические сенсоры, подключенные к автоматизированной измерительной системе. В работе разработанный программно-аппаратный комплекс обеспечивает обработку светового пятна, падающего на поверхность телевизионной матрицы, которая установлена на выходе из оптического волокна. Результаты визуальной обработки преобразуются в числовые значения, которые используются для принятия решения о состоянии рассматриваемого объекта. Помимо автоматического контроля состояния структурной целостности рассматриваемого объекта, система оснащена функцией визуального отображения результатов мониторинга, позволяющей отслеживать резкие колебания и всплески параметров давления, на основе которых выполняется прогнозирование предаварийных и аварийных ситуаций.

Ведущие ключевые компании на мировом рынке оптоволоконных фотозлектрических сенсоров являются Telco Sensors, SensoPart Industriesensorik GmbH, Elco, Pepperl+Fuchs, Banner, Namco, Panasonic, Keyence, Sick, Autonics, IFM, Rockwell Automation Inc., Contrinex, Eaton, Schneider Electric., Lanbao, Balluff, Omron, OPTEX FA Co.Ltd., Di-soric, Sagatc, Baumer, Leuze electronic GmbH + Co. KG. По результатам исследований рынок волоконно-оптических технологий непрерывно растет, иллюстрируя последние разработки зарубежных ученых. Выполненный научный анализ аналогичных работ

зарубежных авторов показывает, что в работе [14] предложен высокочувствительный оптоволоконный сенсор затухающего поля с демодуляцией интенсивности для измерения векторного магнитного поля. Благодаря простой конструкции, высокой чувствительности и низкой стоимости предлагаемый волоконно-оптический сенсор имеет потенциальное применение в автомобильной навигации, авиации и биомедицинских областях. Сенсоры давления [15] имеют важные перспективы в мониторинге давления ветра на опорах линий электропередачи. В исследовании авторов представлен разработанный компактный оптический сенсор давления Фабри–Перо для измерения давления ветра. Сенсор давления состоит из чувствительной микросхемы, лазера с вертикальным резонатором, излучающей поверхности, и фотодиода. Нелинейность, повторяемость и гистерезис сенсора давления обеспечивают точность измерения давления.

Сенсор вибрации [16] распределенного оптического волокна может измерять информацию о вибрации вместе с оптическим волокном. Точная классификация вибрационных явлений является ключевой проблемой при практическом применении распределенного оптического волокна. В этой работе авторами предложена сверточная нейронная сеть для анализа данных распределенного оптического волокна и достижения высокой точности полного распознавания событий. Точность распознавания достигает 99 % на основе пространственно-временных данных, что выше, чем используемые данные во временной, частотной и частотно-временной областях.

Разработан распределенный акустический сенсор Бриллюэна [17], основанный на оптической рефлектометрии во временной области, демонстрирующий максимальную обнаруживаемую деформацию 8,7  $\mu\text{ε}$  и низкое затухание сигнала. Волны деформации с частотой до 120 Гц измеряются с точностью 12  $\mu\text{ε}$  при частоте дискретизации 1,2 кГц и пространственном разрешении 4 м в диапазоне измерения 8,5 км. Диапазон измерения дополнительно расширяется за счет использования модифицированной конфигурации встроеного рамановского усилителя. При использовании импульсов рамановской накачки 80 нс отношение сигнал/шум улучшается на 3,5 дБ, в то время как точность измерения повышается в 2,5–62 раза на дальнем конце 20-километрового волокна.

Инновационный метод контроля температуры ограждающей конструкции здания с использованием сенсоров температуры представлен в работе [18]. Четко описаны результаты испытаний измерений температуры, проведенных в зимний сезон для двух многослойных наружных стен здания, в зависимости от условий окружающей среды, зарегистрированных в то время, т.е. температуры наружного воздуха, относительной влажности и скорости ветра. Учитывая новейший технологический прогресс в области оптических опросников, стоимость сопоставима с классическими методами измерения температуры в стене здания. Фактически его даже можно включить в группу недорогих, в то время как вычислительная стоимость приемлема для крупных объектов. В будущем система, представленная в работе, позволит осуществлять комплексный тепловой и структурный мониторинг строительных конструкций.

Мониторинг активности кровли является основной мерой, принятой для предотвращения несчаст-

ных случаев с обрушением кровли, и служит для оптимизации и поддержки проектирования дорог в подземных угольных шахтах. Однако традиционные меры мониторинга, такие как использование механических экстензометров или электронных сенсоров, либо требуют тяжелого подземного труда, либо не могут должным образом функционировать в суровых подземных условиях. Поэтому в работе [19] разработана новая система мониторинга для контроля безопасности кровли при подземной добыче угля с использованием волокнистой решетки Брэгга в качестве воспринимаемого элемента и среды передачи. По сравнению с традиционным оборудованием для мониторинга, данная система мониторинга обладает такими преимуществами, как обеспечение точного, надежного онлайн мониторинга в деятельности карьера.

Пробная попытка изучения всего процесса динамического перемещения деформационных слоев кровли представлена в работе [20]. Итоги, полученные в ходе исследования, помогут на горных предприятиях оптимизировать проектирование горных работ, предотвратить аварии и обеспечить подробную тестовую основу для метода мониторинга движения слоев кровли.

По вопросам безопасности на производстве авторами [21] представлены некоторые результаты инновационных методов анализа, основанных на сочетании распределенных волоконно-оптических сенсоров, цифровой фотограмметрии с использованием беспилотных летательных аппаратов, топографии и геотехнических систем мониторинга. Полученные результаты могут дать полезные фундаментальные указания относительно стабильности массива горных пород для обеспечения безопасности работ и долгосрочного планирования горных работ.

В связи с этим контроль и мониторинг состояния устойчивости бортов и бермы на карьере являются практическим научным актуальным вопросом. И работа преследует цель — создание нового метода комплекса контроля устойчивости бортов карьера с помощью волоконно-оптических сенсоров.

**2. Методы систем измерения.** На основе двухплечевого оптического интерферометра, являющегося простым в построении и обработке сигналов, рассмотрены волоконно-оптические сенсоры. В ходе рассмотрения отмечено, что имеются некоторые недостатки сенсоров на основе интерферометра. Другими словами, при возможном изменении чувствительности, а также при том факте, что имеет место влияние температурных помех и изменение показателя преломления, сигнал затухает из-за дрейфа начальной фазы световой волны, распространяющейся по сердцевине оптического волокна. Этот недостаток характерен для Single Mode оптических волокон, используемых для мониторинга протяженных объектов на расстоянии 30–50 км, в то время как Multi Mode оптические волокна оказывают меньшее влияние на температурные помехи и могут работать на небольшом расстоянии 500–1000 м. Существующие недостатки двухплечевого волоконно-оптического интерферометра практически полностью исключаются решением создания комплекса контроля, имеющего программное обеспечение с алгоритмами искусственного интеллекта для обработки сигналов.

Представлена схема измерения смещения при помощи волоконно-оптических сенсоров (рис. 1). Волоконно-оптический сенсор основан на хорошо

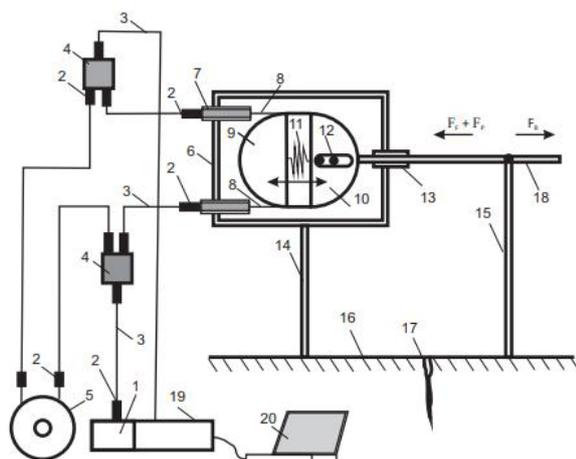


Рис. 1. Схема измерения смещения:

1 — источник света, 2 — коннекторы, 3 — патч-корды, 4 — оптический разветвитель, 5 — компенсационная катушка, 6 — корпус сенсора, 7 — муфта, 8 — плечи интерферометра, 9 — полудиск неподвижный, 10 — полудиск подвижный, 11 — пружина, 12 — ось перемещения, 13 — уплотнитель, 14, 15 — реперы, 16 — исследуемый массив, 17 — трещина, 18 — ригель, 19 — фотоприемное устройство, 20 — персональный компьютер с встроенным программно-аппаратным комплексом контроля (ПАКК)

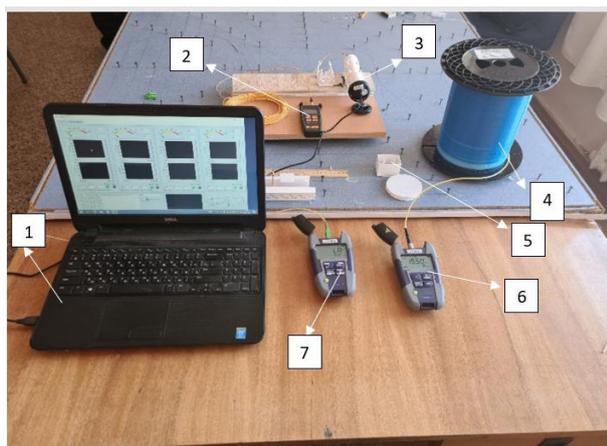


Рис. 2. Лабораторный образец:

1 — ноутбук с АПКК, 2 — источник излучения 650 нм, 3 — фотоприемное устройство, 4 — компенсационная катушка, 5 — сенсор смещения, 6 — источник излучения SmartPocket OLS-34/35/36, 7 — оптический ваттметр VIAVI (JDSU) SmartPocket OLP-38

известном интерферометре Маха–Цендера. Источником излучения является полупроводниковый лазер типа InGaAs, Laser launcher level CLASS IIB,  $650 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ . Мощность лазера составила 20 мВт. Он подключается к оптическому разветвителю с помощью телекоммуникационного патч-корда с коннектором типа SC, ферулла диаметром 2,5 мм и суперфизическим контактным разъемом для шлифования UPC Ultra Physical Contact. Луч света равномерно разделяется на две волны и распространяется вдоль двух плеч интерферометра. Использовано кварцевое Single Mode оптическое волокно стандарта G.652 (Corning, США) диаметром 9/125 мкм. Волоконно-оптический сенсор помещен в пластиковый корпус. В корпусе расположены два полудиска диаметром 2 см. На два полудиска намо-

тано оптическое волокно, один из которых не подвижен. Полудиск, перемещаясь на оси с помощью пружины, возвращается в исходное положение. Single Mode оптическое волокно фиксируется с помощью муфт. Подвижный полудиск жестко соединен с ригелем. Направление перемещения ригеля с подвижным полудиском показано двойной стрелкой (рис. 1).

В массив погружаются реперы, которые расположены по обеим сторонам, раскрывая трещины. При росте трещины расстояние между закрепленными точками будет меняться, соответственно, ригель перемещается в параллельной плоскости массива. Когда ригель и полудиск жестко соединены с оптическим волокном и происходит механическое воздействие, их длина изменяется, и, соответственно, интенсивность излучения, падающего на поверхность фотоматрицы, также изменяется. В конце канала от двух плеч интерферометра используется разветвитель для соединения световых волн, и световые волны поступают в устройство предварительной обработки данных с фотоматрицей. Окончательная обработка данных осуществляется с помощью программно-аппаратного комплекса контроля (ПАКК), который устанавливается на персональный компьютер. Программно-аппаратный комплекс контроля (ПАКК) работает на основе алгоритмов искусственного интеллекта. Весь физический смысл и основы, связанные с изменением расстояния между точками крепления, представлены в ранее опубликованной работе [22].

В ходе эксперимента был создан имитационный стенд лабораторного образца оптоволоконного датчика перемещения на основе интерферометра Маха–Цендера (рис. 2). Установлено, что чем больше число витков волокна, тем меньше коэффициент упругости. Использован VIAVI SmartPocket OLS-34/35/36 лазерный источник излучения, выполненный в трех вариантах, позволяющих работать на длинах волн 850, 1300, 1310, 1550 нм. Совместно с измерителем оптической мощности SmartPocket OLP-34/35/38 и благодаря встроенным опциям Auto-λ и Multi-λ, SmartPocket OLS-34/35/36 автоматически измерены вносимые потери в Single Mode оптическом волокне. Вместо фотоприемного устройства на выходе из оптического волокна установлена фотоматрица КМОП (CMOS) с графическим процессором одного измерительного канала для предварительной обработки сигналов высокого разрешения.

При приложении силы к оптическому волокну формировалось натяжение, что приводит к возникновению эффекта фотоупругости. Соответственно, чем выше значения приложенной силы, тем большшему смещению подвергается оптическое волокно, и тем выше значение дополнительных потерь проходящей световой волны. Волоконно-оптический сенсор имеет достаточно высокую линейность и способен с высокой точностью контролировать изменение горного массива.

При проведении эксперимента использовались следующие методы. Первый метод спектрального анализа светового пятна при воздействии дополнительных потерь на оптическое волокно, которое является собственной разработкой и проходит практическую апробацию [13]. Второй метод представляет собой хорошо известный метод измерения дополнительных потерь световых волн в оптическом волокне при механическом воздействии на него. Данный метод подробно описан в работах

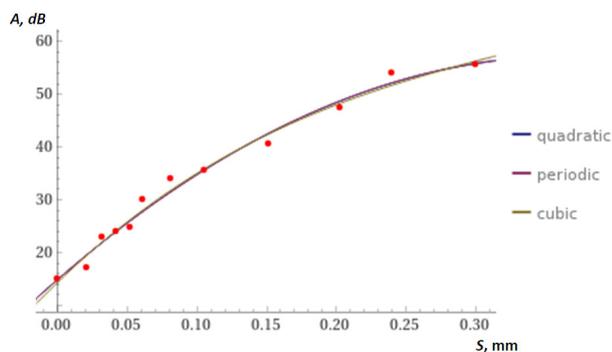


Рис. 3. График зависимости

[13], для его реализации использовался источник лазерного излучения и оптический ваттметр. Данные приборы использованы для калибровки предлагаемого ранее сенсора и программно-аппаратного комплекса контроля.

**3. Результаты проведенных экспериментов.** Полученные экспериментальные данные обрабатывались с помощью компьютерной программы Wolfram Alpha (computational knowledge engine), построен график зависимости изменения дополнительных потерь световой волны в зависимости от приложенной силы (рис. 3).

Также разработан ПАКК, который имеет элементы машинного обучения и обширный набор элементов управления, которые позволяют изменять его чувствительность. ПАКК может работать в оптическом диапазоне от 470 до 1625 нм, и в эксперименте используется монохроматический когерентный источник света с оптической длиной волны 650 нм. Все сигналы тревоги встроеной системы сигнализации автоматически записываются и сохраняются на жестком диске компьютера по мере необходимости. При помощи компьютерной программы Wolfram Alpha были получены математические выражения различных аппроксимаций, где наименьшие квадраты лучше всего подходят

$$-312.403 x^2 + 230.224 x + 14.8778 \text{ (quadratic)}$$

$$228.901 \sin(x) + 598.737 \cos(x) - 583.831 \text{ (periodic)}$$

$$490.737 x^3 - 530.56 x^2 + 254.732 x + 14.3489$$

(cubic) и соответствует диагностике

	AIC	BIC	R <sup>2</sup>	adjusted R <sup>2</sup>
cubic	52.7495	54.6891	0.986273	0.983223
quadratic	52.8025	54.7422	0.986212	0.983149
periodic	54.6647	57.0892	0.986831	0.981893

Проведен ряд экспериментов по определению дополнительных потерь мощности оптического излучения, проходящего через сенсор при различных напряжениях. В результате лабораторный образец волоконно-оптического сенсора показал довольно высокую линейность. Для достижения точности полученных результатов количество необходимых раз проведения измерений выбрано из расчета коэффициента Стьюдента 2,060 с доверительным интервалом 0,95. Оценка полученных результатов выполнена с учетом наименьшего значения информационного критерия Акаике. Результаты измерений показали погрешности: абсолютную — 7,78, относительную — 22,58 %.

По результатам испытаний видно, что при увеличении давления практически линейно увеличиваются потери оптического излучения. При изменении внешнего давления от 0 до 3 мм потери увеличились с 15,08 дБ до 55,64 дБ. Эксперименты проводились в лабораторных условиях при температуре воз-

духа от 22 до 23 °С при относительной влажности в пределах 75 %.

**Заключение.** Работа направлена на развитие цифровых технологий и внедрение их в горное производство. Своевременное предупреждение о предстоящей угрозе обрушения повысит уровень безопасного проведения горных работ. Волоконно-оптические сенсоры имеют достаточно высокую линейность характеристик и полностью отвечают требованиям взрывобезопасности. В отличие от существующих конструкций, волоконно-оптические сенсоры на основе оптического интерферометра с аппаратно-программным комплексом контроля отличаются меньшей зависимостью в плане возникновения помех при изменении температуры, так как отсутствует интерферентное пятно. Главным достоинством ПАКК является ее взрывобезопасность, так как в измерительных каналах не используются электрические сигналы. Это позволяет рассчитывать на ее внедрение в производственный процесс согласно требованиям промышленной безопасности. Также важным моментом является простота конструкции и невысокая стоимость одной точки измерения. Преимуществом данной системы является то, что волоконно-оптические сенсоры находятся во взрывоопасной среде, а блок обработки данных располагается на поверхности. Это обеспечивается за счет свойств оптического волокна, способного передавать световые сигналы на значительное расстояние с минимальными потерями по сравнению с информационно-измерительными системами, использующими электрические сигналы.

#### Библиографический список

- Ожигина С. Б., Сашурин А. Д., Ожигин С. Г. [и др.]. Мониторинг состояния устойчивости карьерных откосов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. Т. 1, № 2. С. 161–166.
- Glisic B., Inaudi D. Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2007. 276 p.
- Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / Под ред. Э. Удда. Москва: Техносфера, 2008. 520 с. ISBN 978-5-94836-191-8.
- Низаметдинов Ф. К., Мустафин М. Г., Ожигин С. Г. [и др.]. Геомониторинг состояния устойчивости карьерных откосов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2020. Т. 1, № 1. С. 176–185. DOI: 10.33764/2618-981X-2020-1-1-176-185.
- Ситникова Е. В., Ожигин С. Г., Кулыгин Д. А. Анализ деформаций прибортовых массивов на разрезе «Каракомир» и разработка проекта наблюдательных станций для мониторинга их состояния // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 1, № 1. С. 279–288.
- Dorokhov D. V., Nizametdinov F. K., Ozhigin S. G., Ozhigina S. B. A Technique for Surveying of Ground Surface Deformations in Mine Field // Journal of Mining Science. 2018. Vol. 54. P. 874–882. DOI: 10.1134/S1062739118055011.
- Ozhigin S., Ozhigina S., Ozhigin D. Method of Computing Open Pit Slopes Stability of Complicated-Structure Deposits // Inzynieria Mineralna. 2018. Vol. 41 (1). P. 203–207. DOI: 10.29227/IM-2018-01-32.
- Ozhygin D., Šafář V., Dorokhov D. [et al.] Terrestrial photogrammetry at the quarry and validating the accuracy of slope models for monitoring their stability // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 906. DOI: 10.1088/1755-1315/906/1/012062.
- Попов И. И., Низаметдинов Ф. К., Окатов Р. П. [и др.]. Природные и техногенные основы управления устойчивостью уступов и бортов карьеров. Алматы, 1997. 216 с.

10. Мехтиев А. Д., Юрченко А. В., Нешина Е. Г., Алькина А. Д., Мади П. Физические основы создания датчиков давления на основе изменения коэффициента преломления света при микроизгибе оптического волокна // Известия высших учебных заведений: Физика. 2020. № 2. DOI: 10.17223/00213411/63/2/129.
11. Madi P. Sh., Kalytka V. A., Alkina A. D., Nurmaganbetova M. T. Development of a model fiber-optic sensor of the external action on the basis of diffraction gratings with variable parameters of the system // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2019. Vol. 1327. 012036. DOI: 10.1088/1742-6596/1327/1/012036.
12. Yugay V. V., Madi P. Sh., Ozhigina S. B., Gorokhov D. A., Alkina A. D. Questions of application of fiber-optic sensors for monitoring crack growth during rock deformations // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2140. 012037. DOI: 10.1088/1742-6596/2140/1/012037.
13. Yugay V., Mekhtiyev A., Madi P., Neshina Y., Alkina A., Gazizov F., Afanaseva O., Ilyashenko S. Fiber-Optic System for Monitoring Pressure Changes on Mine Support Elements // Sensors. 2022. Vol. 22. 1735. DOI: 10.3390/s22051735.
14. Zhu L., Lin Q., Yao K. [et al.]. Intensity-demodulated fiber-optic vector magnetic field sensor based on fiber-optic evanescent field // Optics & Laser Technology. 2022. Vol. 152. 108087. DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.108087.
15. Qi Y., Zhao M., Li B. [et al.]. A Compact Optical MEMS Pressure Sensor Based on Fabry-Pérot Interference // Sensors. 2022. Vol. 22. 1973. DOI: 10.3390/s22051973.
16. Ge Z., Wu H., Zhao C. [et al.]. High-Accuracy Event Classification of Distributed Optical Fiber Vibration Sensing Based on Time-Space Analysis // Sensors. 2022. Vol. 22. 2053. DOI: 10.3390/s22052053.
17. Bakhtiari Gorajooobi S.; Masoudi A., Brambill G. Long Range Raman-Amplified Distributed Acoustic Sensor Based on Spontaneous Brillouin Scattering for Large Strain Sensing // Sensors. 2022. Vol. 22. 2047. DOI: 10.3390/s22052047.
18. Juraszek J., Antonik-Popiołek P. Fibre Optic FBG Sensors for Monitoring of the Temperature of the Building Envelope // Materials. 2021. Vol. 14. 1207. DOI: 10.3390/ma14051207.
19. Zhao Y., Zhang N., Si G. A Fiber Bragg Grating-Based Monitoring System for Roof Safety Control in Underground Coal Mining // Sensors. 2016. Vol. 16. 1759. DOI: 10.3390/s16101759.
20. Hu T., Hou G., Li Z. The Field Monitoring Experiment of the Roof Strata Movement in Coal Mining Based on DFOS // Sensors. 2020. Vol. 20. 1318. DOI: 10.3390/s20051318.
21. Lanciano C., Salvini R. Monitoring of Strain and Temperature in an Open Pit Using Brillouin Distributed Optical Fiber Sensors // Sensors. 2020. Vol. 20. 1924. DOI: 10.3390/s20071924.
22. Мехтиев А. Д., Нешина Е. Г., Мади П. Ш., Горохов Д. А. Автоматизированная волоконно-оптическая система мониторинга устойчивости прибортового массива карьера и отвалов // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 4. С. 19–26. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-4-19-26.
- Абылкаса Сагинова (КарТУ), г. Караганда, Республика Казахстан.  
SPIN-код: 3605-3405  
AuthorID (РИНЦ): 1081290  
AuthorID (SCOPUS): 57058722100  
ORCID: 0000-0001-5930-8112  
ResearcherID: AAZ-6203-2020  
Адрес для переписки: peri@mail.ru
- АЛЬКИНА Алия Даулетхановна**, магистр, старший преподаватель кафедры «Информационные технологии и безопасность» КарТУ, г. Караганда, Республика Казахстан.  
AuthorID (SCOPUS): 57160184600  
ORCID: 0000-0003-4879-0593  
Адрес для переписки: alika\_1308@mail.ru
- ЮРЧЕНКО Алексей Васильевич**, доктор технических наук, профессор Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов ТПУ, г. Томск.  
SPIN-код: 2319-2471  
AuthorID (РИНЦ): 150988  
AuthorID (SCOPUS): 55308619600  
ORCID: 0000-0002-7854-5495  
ResearcherID: L-7866-2016  
Адрес для переписки: reaper@tpu.ru
- 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  
AuthorID (SCOPUS): 57219935782  
ORCID: 0000-0002-2633-3976  
ResearcherID: R-2415-2017  
Адрес для переписки: barton.kz@mail.ru
- АЙМАГАМБЕТОВА Раушан Жанатовна**, магистр стандартизации, метрологии и сертификации, заместитель руководителя департамента стратегического развития и науки Казахстанского института стандартизации и метрологии Комитета технического регулирования и метрологии Министерства торговли и интеграции, г. Нур-Султан, Республика Казахстан.  
SPIN-код: 3865-8410  
AuthorID (РИНЦ): 1007011  
AuthorID (SCOPUS): 57265864500  
ORCID: 0000-0002-4429-953X  
ResearcherID: AID-2732-2022  
Адрес для переписки: gauwan2012@mail.ru

#### Для цитирования

Мади П. Ш., Алькина А. Д., Юрченко А. В., Мехтиев А. Д., Аймагамбетова Р. Ж. Волоконно-оптическая система контроля устойчивости бортов карьеров // Омский научный вестник. 2022. № 4 (184). С. 112–117. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-184-112-117.

Статья поступила в редакцию 25.04.2022 г.  
© П. Ш. Мади, А. Д. Алькина, А. В. Юрченко,  
А. Д. Мехтиев, Р. Ж. Аймагамбетова

**МАДИ Перизат Шаймуратовна**, аспирант Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов Национального исследовательского Томского политехнического университета (ТПУ), г. Томск; магистр электроэнергетики, старший преподаватель кафедры «Энергетические системы» Карагандинского технического университета имени