

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА МЕТАНА В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Н.О. Каледина¹, И.Е. Аржанов¹

¹ ГИ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: nok52@mail.ru

Аннотация: Мониторинг метана в шахтах обеспечивается в соответствии с положениями отраслевых Правил безопасности (далее ПБ), которые устанавливают минимальные требования к системе контроля концентраций метана и системе автоматической газовой защиты (АГЗ). Соблюдение этих требований позволяет только констатировать превышение допустимых концентраций в регламентированных ПБ точках вентиляционной сети шахты. Но для управления газовой обстановкой в шахте этого недостаточно, поскольку для правильной организации проветривания, проектирования эффективной дегазации, а также принятия адекватных решений при аварийной остановке вентиляционного или газоотсасывающего оборудования необходимо прогнозировать газовыделение каждого источника выделения метана в реальном режиме времени, т.е. знать динамику газового баланса в процессе ведения горных работ. Особенно это важно для выемочных участков со схемами проветривания, обеспечивающими обособленное разбавление метана по источникам его поступления за счет проведения и поддержания дополнительных выработок. Такие схемы имеют по 2 и более выработки с поступающими и/или исходящими струями. Разработаны предложения по расширению функций системы контроля метана в угольных шахтах с целью автоматизации контроля не только концентраций метана в вентиляционно-дегазационных системах, но и полного газового баланса с учетом метана, каптируемого системой дегазации. Дополнительные функции должны обеспечивать цели и задачи многофункциональных систем безопасности (МФСБ) – возможность оперативного представления информации о фактической эффективности управления газовыделением средствами вентиляции и дегазации (распределении потоков метана в шахтной вентиляционной сети и достигнутом коэффициенте дегазации). Такая информация необходима для анализа и оценки аэрологических рисков, принятия решений о необходимости корректировки расчетов расходов воздуха, изменении схемы проветривания, совершенствования схемы и способа дегазации, т.е. для текущего и перспективного планирования развития вентиляционно-дегазационной системы в соответствии с развитием горных работ.

Ключевые слова: метанобезопасность, угольная шахта, выемочный участок, газовый баланс, источники метановыделения, мониторинг метана, база данных, прогноз и управление метановыделением.

Для цитирования: Каледина Н. О., Аржанов И. Е. Совершенствование функциональной структуры системы мониторинга метана в угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12. – С. 128–140. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_128.

Improvement of functional structure of methane monitoring in coal mines

N.O. Kaledina¹, I.E. Arzhanov¹

¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISIS»,
Moscow, Russia, e-mail: nok52@mail.ru

Abstract: Methane monitoring in mines adheres to the provisions of the sectorial Safety Code (SF) which sets the minimal requirements to the methane concentration control and automatic gas protection. Compliance with these requirements only allows stating overshooting of the allowable concentrations at mine ventilation network points specified by SC. This is insufficient for the gas-related situation control in mines as the correct ventilation management, efficient gas drainage design and relevant decision-making on emergency shutdowns of ventilation or gas-suction equipment requires predicting gas emission for each methane source and in real time, which means knowing gas balance dynamics in the course of mining. This is of specific concern in extraction areas equipped with ventilation schemes which ensure separate dilution of methane per its emission sources by means of driving and supporting auxiliary roadways. Each such scheme includes two and more roadways with intake and/or return air. This article describes the proposals on expansion of functions of the methane control systems in coal mines with a view to automating both the methane concentration control in ventilation and gas drainage systems and the overall gas balance control with regard to methane captured during gas drainage. These extended services should be set in accordance with the goals and objectives of the multifunctional safety systems, namely, the real-time presentation of information on actual efficiency of gas emission control by ventilation and gas drainage facilities (distribution of methane flows in mine ventilation network and gas drainage efficiency factor reached). Such information is necessary for the assessment and analysis of air risks, for the decision-making on adjustment of air flow rate calculations, modification of ventilation scheme, improvement of gas drainage design and method, i.e., for the current and long-term planning of expansion of ventilation and gas drainage system in conformity with advance of mining operations.

Key words: methane safety, coal mine, extraction area, gas balance, methane emission sources, methane monitoring, database, methane emission prediction and control.

For citation: Kaledina N. O., Arzhanov I. E. Improvement of functional structure of methane monitoring in coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12):128-140. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_128.

Введение

Производственный контроль безопасности подземной угледобычи сегодня базируется на использовании современных инженерно-технических систем, получивших название многофункциональных систем безопасности (МФСБ), которые представляют собой комплекс сопряженных между собой систем теле-

метрического контроля процессов горного производства и параметров производственной среды. Для высокогазобильных шахт важнейшей частью таких систем является система мониторинга метана.

Разработке этих систем уделяется важное место при проектировании шахты, а также в процессе эксплуатации

предприятия. Система мониторинга метана в шахтах строится согласно требованиям ПБ (Правила безопасности угольных шахт, 2021), в которых установлены обязательные требования к составу шахтной атмосферы и в соответствии с ними укрупненно определены места контроля концентраций метана в поступающих и исходящих вентиляционных струях, а также в местах возможных местных скоплений, перечень которых определяется аэрологической службой шахты. Также в нормативных документах Ростехнадзора определены требования к системе автоматической газовой защиты (АГЗ), работающей в увязке системой мониторинга метана, и отключающей электроэнергию на участке, где фиксируется превышение допустимого значения. Именно эти требования и реализуются в проектах АГЗ и мониторинга метана. Но, как оказалось, для обеспечения метановой безопасности этого недостаточно, что подтверждается печальной статистикой катастрофических аварий на крупных шахтах. На наш взгляд, в первую очередь, это следствие недостаточности информации для лиц, принимающих решения. Система мониторинга метана должна давать исчерпывающую информацию для оценки рисков взрывов и вспышек метана, а следовательно, должна обеспечивать более широкий спектр функций. Этому вопросу и посвящена данная работа.

Недостатки системы мониторинга метана в шахтах

Как показывает отечественный и зарубежный опыт, наличие современных систем контроля и отключения опасных участков, тем не менее, не обеспечивает надежной защиты по фактору метана [1 – 3]. Фактически единственный контролируемый показатель — концентрация метана, и если он определяется некорректно (технические неполадки или

прямое вмешательство извне с целью загробления показаний датчиков), то и управленческие решения (в том числе и блокирующего характера) бывают не адекватны реальной опасности. Поэтому нельзя говорить о многофункциональности такой системы, если оценивать ее роль в МФСБ шахты.

С точки зрения реального обеспечения метанобезопасности, система мониторинга должна быть нацелена на управление метановыделением, в арсенале которого отключение электроэнергии — крайняя исключительная мера.

Применение современного высокопроизводительного оборудования привело к существенному изменению технологических параметров выемочных участков, в частности увеличились объемы выработанных пространств и вынос из них метана [4, 5], а это один из важнейших и очень нестабильных источников метановыделения на выемочных участках, интенсивность которого зависит от величины и направления движения утечек воздуха, т.е. от распределения давлений по его контуру. Таким образом, объем выделения метана зависит в том числе и от атмосферного давления, и от расхода воздуха на участке, и схемы проветривания, определяющей характер примыкания выработанного пространства к оконтуривающим выработкам (одно- двух или трехстороннее). Увеличение скорости подвигания забоев приводит к росту абсолютного газовыделения и перераспределению газового баланса разрабатываемого пласта в сторону увеличения доли отбитого угля.

В новых условиях ведения горных работ аварии, связанные с загазированием, стали происходить реже, но тяжесть их последствий значительно выросла [5], что официально подтверждается ежегодными отчетами Ростехнадзора. Опыт расследования причин аварий катастрофического характера показывает,



Рис. 1. Распределение схем проветривания по классам (степени обособленности разбавления метана по источникам его поступления)

Fig. 1. Distribution of ventilation schemes by classes (degrees of separation of methane dilution by sources of its supply)

что их предпосылки формируются уже в процессе штатного режима ведения работ, а выработанные пространства «... стали не только источником опасных загазований, но и источником воспламенений... Поэтому на первый план должно выходить прогнозирование зарождающихся аварий и блокирование предпосылок их наступления» [6].

Как показал обзор недавних исследований в данной области, эта проблема актуальна и для зарубежных шахт, где также ставится вопрос о несовершенстве применяемых систем мониторинга метана [7–9]. В мировой горной науке активно ведутся работы по совершенствованию алгоритмов обработки информации, поступающей от датчиков с целью повышения точности интерпретации измеряемых данных [10, 11], по применению компьютерного моделирования для прогноза выделения и распределения метана в горных выработках [12, 13]. Однако системных решений по интеграции системы мониторинга в МФСБ на сегодняшний день нет.

Для правильной организации проветривания и эффективного управления метановыделением средствами вентиляции и дегазации необходимо прогнозировать не концентрацию газа, а газовыделение из каждого источника метана

в шахтные выработки. Особенно это важно для выемочных участков со схемами проветривания 3-го класса, обеспечивающих полностью обособленное разбавление метана по источникам его поступления. Для прогноза газообильности единственным надежным основанием является фактическое газовыделение, его динамика, которая и должна быть объектом мониторинга.

Доля схем с обособленным разбавлением метана (2 и 3 класса) за последнее десятилетие в среднем составила более 90% (рис. 1), из них 80% применяются на высокогазобильных шахтах (III категории и выше).

В табл. 1 и на рис. 2 приведены данные выполненного анализа распределения схем проветривания с управлением газовыделением по категориям газовой опасности. Несмотря на широкое использование данных схем, к сожалению, нормативные требования и методики по расчету расхода воздуха для них отсутствуют, поэтому и требования к системам мониторинга не включают контроля параметров, необходимых для определения газового баланса — они не обеспечены методически.

Как правило, схемы 2–3 классов реализуются на основе многострековой подготовки выемочного столба, при этом

Таблица 1

Распределение шахт, использующих схемы с управлением газовыделением (2–3 класс), по категориям газовой опасности
Distribution of mines by the presence of gas release control (airing schemes 2–3 classes) by hazard category

Категория шахт по газу	I–II	III	Сверх-категорная	Опасная по внезапным выбросам угля и газа	Всего
Количество шахт	24	11	29	16	80
Из них используют схемы 2–3 классов	6	7	28	14	55
Доля шахт, использующих схемы 2–3 классов, %	25	64	97	88	69
Количество выемочных участков в одновременной работе	29	13	38	27	107
Из них используют схемы 2–3 классов	7	7	36	23	73
Доля выемочных участков, использующих схемы 2–3 классов, %	24	54	95	85	68

проветривание организуется по прямоточному принципу с выдачей исходящей струи на выработанное пространство. При управлении газовыделением происходит перераспределение метана, выделяющегося из выработанного пространства, по прилегающим выработкам участка, минуя очистной забой. В этой связи в статье [14] была обоснована необходимость мониторинга динамики газового

баланса выемочных участков и предложен универсальный подход к организации такого мониторинга. Показано, что при любой схеме проветривания, в том числе при многострековой подготовке, необходимо контролировать все поступающие и все исходящие струи выемочного участка, а также дебит газа, удаляемого дегазацией. Это приведет к значительному увеличению числа датчиков

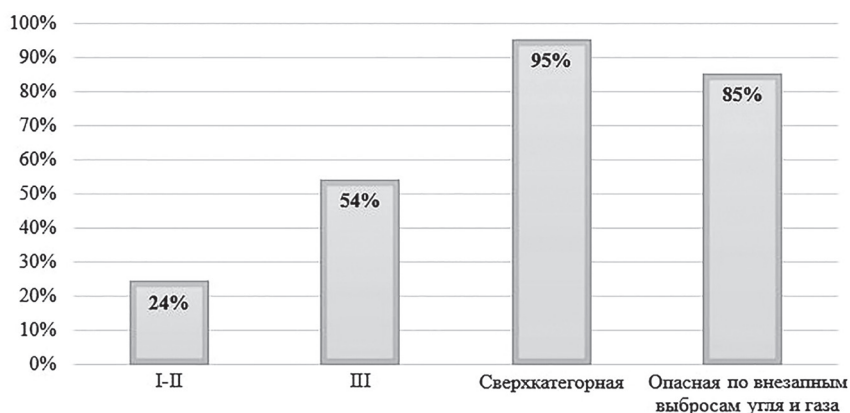


Рис. 2. Доля выемочных участков, использующих схемы проветривания с управлением газовыделением по категориям шахт

Fig. 2. Proportion of mining sites using ventilation schemes with gas release control

(до 10 точек контроля в вентиляционных струях на выемочном участке, а также в дегазационных трубопроводах, газодренажных выработках для изолированного отвода метана — в зависимости от принятой системы управления газовойделением), но, при надлежащем анализе тенденций динамики газообильностей источников, это позволит отслеживать опасные скорости нарастания объемов газа, критических уровней загазованных выработанных пространств, а также оценивать вероятность появления очагов самонагрева углей, что подтверждается исследованиями зарубежных коллег [15, 16].

Система мониторинга должна в автоматическом режиме определять не только газообильность, но и индикаторы рисков [17, 18], выявляющие предпосылки формирования аварийных ситуаций, что позволит реально предотвращать катастрофические взрывы метана и угольной пыли на основе заблаговременного

прогноза [19, 20], т.е. обеспечивать цели и задачи МФСБ.

Предложения по изменению функций системы мониторинга в угольных шахтах

В свете вышесказанного предлагается расширить функции системы мониторинга шахтного метана таким образом, чтобы перейти от простой констатации факта превышения допустимой концентрации метана в нескольких, определенных проектом точках, соответствующих местам локализации максимальных концентраций, — к прогнозу газообильности и грамотному, обоснованному управлению метановыделением средствами вентиляции и дегазации с учетом динамики интенсивности источников метановыделения в горных выработках. Предлагаемые изменения функциональной структуры существующей системы показаны на схеме (рис. 3).



Рис. 3. Предлагаемые изменения функциональной структуры системы мониторинга метана в угольной шахте

Fig. 3. The changes proposed to the functional structure of a coal mine methane monitoring system

Все параметры в подсистеме «Аналитика» должны сохраняться для формирования статистической базы данных, которая по мере накопления будет служить надежной основой прогнозирования газовыделения при проектировании развития горных работ, что необходимо для расчета параметров реализации аэро- и газодинамических способов управления метановыделением [17]. В перспективе возможно прогнозирование газовыделения на основе компьютерного моделирования, но для этого надо знать фильтрационно-коллекторские свойства угольных пластов, изучение которых в массовом порядке не производится. Эмпирические зависимости действующей нормативной базы проектирования вентиляции («Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт», 1989) безнадежно устарели. Поэтому при современных темпах ведения горных работ при прогнозе газового баланса можно основываться только на фактической газообильности каждого источника, которую следует определять тщательно и надежно.

Существующую систему следует дополнить следующими функциями.

- Определение газообильности выработок: автоматическое вычисление текущих значений газообильности по данным оперативного контроля концентрации метана и средней скорости движения воздуха в выработке. В последующем эти данные могут быть использованы для определения относительной газообильности шахты и каждого из ее объектов.

- Определение дебитов дегазационных скважин: автоматическое вычисление текущих значений дебита метана, каптируемого с участка, по данным оперативного контроля концентрации метана и среднего расхода метановоздушной смеси в трубопроводе. В дальнейшем эти данные будут использованы для оп-

ределения коэффициента дегазации каждого источника метановыделения и полной газообильности участка и шахты в целом.

- Определение газового баланса горных выработок: вычисление составляющих газового баланса выемочного участка — газовыделения из поверхности обнажения пласта, из отбитого угля, из выработанного пространства; проходческих забоев — газовыделение в призабойной части и по всей выработке; выработок, оборудованных конвейерами для доставки отбитого угля — газовыделения из отбитого угля за пределами выемочных участков.

Согласно ПБ последняя категория выработок обязательному контролю газообильности не подлежит, что не соответствует фактической структуре газовыделения современных газообильных шахт, а следовательно, требует внесения изменений в регламент контроля газового баланса шахты в целом.

- Оценка текущей эффективности дегазации: вычисление коэффициентов дегазации по каждому источнику метановыделения на основе данных оперативного контроля дебитов метана в дегазационных системах (в соответствии со структурой системы дегазации).

- Оценка динамики газового баланса: вычисление градиента изменения концентрации метана и газообильности каждого источника, позволит выявлять угрожающие тенденции нарастания интенсивности метановыделения.

- Оценка индикаторов риска: вычисление индикаторов риска загазирования, включая технические средства обеспечения вентиляции и дегазации [17]. К основным индикаторам аэрологического риска в данном контексте относятся показатели динамики концентраций метана, скоростей движения воздуха, газообильности источников газовыделения, а также динамики термовлажностных па-

раметров метановоздушных потоков, показателей надежности вентиляционного-дегазационного оборудования.

Система мониторинга метана должна оперативно обеспечивать МФСБ надежной информацией для принятия управленческих решений, для этого она должна включать следующие функции:

- автоматический непрерывный контроль концентрации метана в вентиляционных струях и местах опасных скоплений;
- автоматическое отключение электроэнергии на объектах с опасной динамикой концентрации метана;
- оперативное определение текущего значения газообильности в выработках с источниками выделения метана;
- автоматическое оперативное определение текущего значения газообильности в выработках с источниками выделения метана;
- автоматическое оперативное определение текущего значения дебитов метана в дегазационных скважинах по источникам выделения метана;
- обеспечивать долговременное хранение указанной информации;
- выполнять с определенной периодичностью и по запросу оператора анализ газового баланса подготовительных и выемочных участков, а также конвейерных выработок за пределами выемочных участков;
- выполнять с определенной периодичностью и по запросу оператора анализ динамики фактических коэффициентов дегазации по источникам метановыделения;
- выполнять с определенной периодичностью и по запросу оператора анализ динамики нарастания газообильности в контролируемых выработках;
- выполнять с определенной периодичностью и по запросу оператора оценку и анализ индикаторов риска взрыва метана.

В этом случае инженерный персонал предприятия на всех уровнях управления будет иметь полное представление о состоянии шахтной атмосферы в штатном режиме работы и надежную информацию при ликвидации аварий, позволяющую делать однозначные выводы об их причинах, и, соответственно, разрабатывать адекватные превентивные меры.

Рекомендации по реализации предложений по совершенствованию структуры системы мониторинга метана

Предлагаемая структура системы мониторинга метана в газообильных шахтах не отменяет принципа автоматической газовой защиты, но существенно дополняет возможности МФСБ в части предотвращения взрывов метана и угольной пыли.

В табл. 2 приведены требуемые изменения и дополнения, которые понадобятся для реализации предлагаемой функциональной структуры. Как видно из приведенных данных, технические средства обеспечения мониторинга с функциями аналитики, необходимыми для организации управления метановыделением, имеются, потребуется лишь увеличить количество датчиков контроля параметров метановоздушных потоков в системах вентиляции и дегазации.

Для реализации остальных функций потребуется разработка соответствующего программного обеспечения (ПО).

Все данные статистики и анализа по динамике метановыделения должны храниться на сервере (диаграммы оперативного контроля — до полной отработки шахтного поля, аналитика — постоянно), поскольку они могут потребоваться при расследовании возможных аварий для более обоснованного определения причин аварии, а также для обес-

Таблица 2

Необходимые изменения и дополнения к существующему обеспечению системы мониторинга метана**Necessary changes and additions to the existing provision of the methane v monitoring system**

Дополнительные функции системы мониторинга	Требуемые изменения и дополнения
Определение газообильности выработок	Датчики контроля концентрации метана и скорости движения воздуха в дополнительных точках контроля вентиляционной системы
Определение дебитов дегазационных скважин и изолированного отвода метана	Датчики контроля концентрации метана и расхода метановоздушной смеси в дополнительных точках контроля дегазационной системы
Определение газового баланса горных выработок на выемочном участке и за его пределами	ПО (вычисление составляющих газового баланса)
Оценка текущей эффективности дегазации	ПО (вычисление коэффициента дегазации по каждому источнику выделения метана)
Оценка динамики газового баланса	ПО (вычисление градиента изменения концентрации и газообильности)
Оценка индикаторов риска	ПО (вычисление индикаторов риска загазирования)
Формирование базы данных динамики показателей газового баланса для обеспечения предиктивной функции	ПО (организация базы данных по газообильности всех источников метановыделения в шахте с учетом определяющих факторов)

печения метановой безопасности при ведении аварийно-спасательных работ.

В общешахтной МФСБ контроль метана должен быть синхронизирован с контролем производственных процессов (определение периодов работы по разрушению массива и остановки соответствующих механизмов), что, по мере накопления данных, позволит осуществлять прогноз метановыделения с учетом изменения производительности очистной выемки и проходки (скорости подвигания забоев). Предлагаемая система позволит перейти к прогнозированию метановыделения на вновь проектируемых участках по фактической газообильности, которая будет обоснована статистикой наблюдений.

Дополнительные функции призваны обеспечивать возможность оперативно-го представления информации о фактической эффективности управления газо-

выделением средствами вентиляции и дегазации: распределении потоков метана в шахтной вентиляционной сети и достигнутом коэффициенте дегазации. Эта информация необходима для анализа и оценки аэрологических рисков, принятия решений о необходимости корректировки расчетов расходов воздуха, изменении схемы проветривания, совершенствования схемы и способа дегазации, т.е. для текущего и перспективного планирования развития вентиляционно-дегазационной системы в соответствии с развитием горных работ, а также при расследовании аварий и ликвидации их последствий. Таким образом, предлагаемое изменение функциональной структуры системы мониторинга метана в угольных шахтах позволит повысить безопасность по данному фактору как в штатном режиме ведения горных работ, так и при авариях.

Заключение

Резюмируя вышесказанное, можно сделать следующие выводы.

Система мониторинга метана в угольных шахтах, будучи неотъемлемой частью МФСБ, для более полного соответствия ее целям и задачам, должна обеспечивать предиктивную функцию на основе контроля динамики газового баланса всех источников газовой выделенности в шахте.

Для этого функциональную структуру системы мониторинга метана следует дополнить функциями оперативного контроля газообильности каждого источника метановыделенности в очистных и подготовительных выработках, конвейерных выработках за пределами выемочных и проходческих участков, а также дебитов метана в дегазационной системе. На основе контроля динамики газообильности выработок система должна обеспечивать оценку индикаторов аэрологического риска.

Для реализации этих функций необходимо изменить требования к проекту системы газового контроля. Кроме того, надо создать программное обеспечение (ПО) для определения газообильности по данным контроля концентраций и

скоростей движения воздуха и расчета индикаторов риска загазований.

Проблема создания такого ПО заключается в том, что наиболее опасные по газу шахты используют для проветривания выемочных участков схемы с обособленным разбавлением метана, расчет параметров которых методически не обеспечен действующей нормативной базой.

Определение газового баланса при таких схемах всегда индивидуально — в соответствии с принятой технологической схемой, — и должно строиться по принципу контроля всех поступающих и всех исходящих струй, что значительно увеличит количество пунктов контроля.

Дополнительные затраты в данном случае обоснованы повышением эффективности контроля метана, возможностью прогноза метановыделенности на вновь проектируемых участках по реальной фактической газообильности и соответствующим повышением качества проектов вентиляции и дегазации, повышением обоснованности принятия решений при ликвидации аварий, связанных с загазованиями, и, следовательно, повышением в целом уровня метановзрывобезопасности угольных шахт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smirnyakova V. V., Smirnyakov V. V., Pekarchuk D. S., Orlov F. A. Analysis of methane and dust explosions in modern coal mines in Russia // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2019, no. 10, pp. 1917–1929

2. Puchkov L. A., Kaledina N. O., Kobylkin S. S. Systemic approach to reducing methane explosion hazard in coal mines // Eurasian Mining. 2015, no. 2, pp. 3–6. DOI: 10.17580/em.2015.02.01.

3. Босиков И. И., Ключев Р. В., Майер А. В., Стась Г. В. Разработка метода анализа и оценки оптимального состояния аэрогазодинамических процессов на угольных шахтах // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 97–106. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-97-106.

4. Meshkov A., Kazanin O., Sidorenko A. Methane emission control at the high-productive longwall panels of the Yalevsky Coal Mine // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 174, article 01040. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401040.

5. Копылов К. Н., Кубрин С. С., Решетняк С. Н. Повышение энергоэффективности и безопасности в угольных лавах // Горный журнал. — 2019. — № 4. — С. 85–88. DOI: 10.17580/gzh.2019.04.19.

6. Палеев Д. Ю. Состояние и перспективы научного обеспечения горноспасательных работ // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2020. — № 1. — С. 22–28.

7. Baris K., Aydin Y. Atmospheric monitoring systems in underground coal mines revisited. A study on sensor accuracy and location // International Journal of Oil, Gas and Coal Technology. 2020, no. 23, pp. 325–350. DOI: 10.1504/IJOGCT.2020.105777.

8. Schatzel J., Dougherty H., Krog R. B. Methane emissions and airflow patterns on a longwall face: Potential influences from longwall gob permeability distributions on a bleederless longwall // Transactions of Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. 2017, vol. 342, no. 1, pp. 51–61. DOI: 10.19150/trans.8108.

9. Cappellini B., Johnson D., Clark N., Barr A. Improving real-time methane monitoring in longwall coal mines through system response characterization of a multi-nodal methane detection network // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE). 2021, vol. 13, V013T14A014. DOI: 10.1115/IMECE2021-69709.

10. Босиков И. И., Ключев П. В., Хетагуров В. Н., Ажмухамедов И. М. Разработка методов и средств управления аэрогазодинамическими процессами на добычных участках // Устойчивое развитие горных территорий. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 77–83. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-77-83.

11. Qiao M., Ren T., Roberts J., Tan L., Wu J. Improved computational fluid dynamics modelling of coal spontaneous combustion control and gas management // Fuel. 2022, vol. 324, article 124456. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124456.

12. Xu Y., Li Z., Liu H., Song P., Jia M. A model for assessing the compound risk represented by spontaneous coal combustion and methane emission in a gob // Journal of Cleaner Production. 2020, vol. 273, article 122925. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122925.

13. Meyer Varicon C. F. Advancing the technology of methane monitoring on a continuous miner // Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa. 2018, vol. 71, no. 3, pp. 12–20.

14. Каледина Н. О., Чечель К. Н. Анализ газового баланса выемочного участка в обеспечении аэрологической безопасности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 10. — С. 5–16. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_101_0_5.


15. Dziurzyński W., Pałka T., Krach A., Wasilewski S. Methodology for determining methane distribution in a longwall district // Archives of Mining Sciences. 2019, vol. 64, no. 3, pp. 467–485. DOI: 10.24425/ams.2019.129363.

16. Karacan C. Ö., Martín-Fernández J. A., Ruppert L. F., Olea R. A. Insights on the characteristics and sources of gas from an underground coal mine using compositional data analysis // International Journal of Coal Geology. 2021, vol. 241, article 103767. DOI: 10.1016/j.coal.2021.103767.

17. Каледина Н. О., Малашкина В. А. Индикаторная оценка надежности функционирования шахтных вентиляционно-дегазационных систем // Записки Горного института. — 2021. — Т. 250. — С. 553–561. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.8.

18. Li Y., Su H., Ji H., Cheng W. Numerical simulation to determine the gas explosion risk in longwall goaf areas. A case study of Xutuan Colliery // International Journal of Mining Science and Technology. 2020, vol. 30, no. 6, pp. 875–882. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.07.007.

19. Lolon S. A., Brune J. F., Bogin G. E., Juganda A. Study of methane outgassing and mitigation in longwall coal mines // Mining, Metallurgy and Exploration. 2020, vol. 37, no. 5, pp. 1437–1449. DOI: 10.1007/s42461-020-00287-6.

20. Гендлер С. Г., Габов В. В., Бабырь Н. В., Прохорова Е. А. Обоснование технических решений по снижению производственного травматизма в лавах угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 1. — С. 5–19. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_5. 

REFERENCES

1. Smirnyakova V. V., Smirnyakov V. V., Pekarchuk D. S., Orlov F. A. Analysis of methane and dust explosions in modern coal mines in Russia. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019, no. 10, pp. 1917–1929
2. Puchkov L. A., Kaledina N. O., Kobylkin S. S. Systemic approach to reducing methane explosion hazard in coal mines. *Eurasian Mining*. 2015, no. 2, pp. 3–6. DOI: 10.17580/em.2015.02.01.
3. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Mayer A. V., Stas G. V. Development of a method for analyzing and evaluating the optimal state of aerogasodynamic processes in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 1, pp. 97–106. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-97-106.
4. Meshkov A., Kazanin O., Sidorenko A. Methane emission control at the high-productive longwall panels of the Yalevsky Coal Mine. *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 174, article 01040. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401040.
5. Kopylov K. N., Kubrin S. S., Reshetnyak S. N. Improvement of energy efficiency and safety in coal longwalls. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 4, pp. 85–88. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.04.19.
6. Paleev D. Yu. The state and prospects of scientific support of mine rescue operations. *Industrial Safety*. 2020, no. 1, pp. 22–28. [In Russ].
7. Baris K., Aydin Y. Atmospheric monitoring systems in underground coal mines revisited. A study on sensor accuracy and location. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*. 2020, no. 23, pp. 325–350. DOI: 10.1504/IJOGCT.2020.105777.
8. Schatzel J., Dougherty H., Krog R. B. Methane emissions and airflow patterns on a longwall face: Potential influences from longwall gob permeability distributions on a bleederless longwall. *Transactions of Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.* 2017, vol. 342, no. 1, pp. 51–61. DOI: 10.19150/trans.8108.
9. Cappellini B., Johnson D., Clark N., Barr A. Improving real-time methane monitoring in longwall coal mines through system response characterization of a multi-nodal methane detection network. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*. 2021, vol. 13, V013T14A014. DOI: 10.1115/IMECE2021-69709.
10. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Khetagurov V. N., Azhmukhamedov I. M. Development of methods and management tools aerogasodynamics processes at mining sites. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021, vol. 13, no. 1, pp. 77–83. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-77-83.
11. Qiao M., Ren T., Roberts J., Tan L., Wu J. Improved computational fluid dynamics modelling of coal spontaneous combustion control and gas management. *Fuel*. 2022, vol. 324, article 124456. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124456.
12. Xu Y., Li Z., Liu H., Song P., Jia M. A model for assessing the compound risk represented by spontaneous coal combustion and methane emission in a gob. *Journal of Cleaner Production*. 2020, vol. 273, article 122925. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122925.
13. Meyer Varicon C. F. Advancing the technology of methane monitoring on a continuous miner. *Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa*. 2018, vol. 71, no. 3, pp. 12–20.
14. Kaledina N. O., Chechel K. N. analysis of the gas balance of the exhaust area in ensuring aerological security. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 10, pp. 5–16. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_101_0_5.
15. Dzierżyński W., Pałka T., Krach A., Wasilewski S. Methodology for determining methane distribution in a longwall district. *Archives of Mining Sciences*. 2019, vol. 64, no. 3, pp. 467–485. DOI: 10.24425/ams.2019.129363.

16. Karacan C. Ö., Martín-Fernández J. A., Ruppert L. F., Olea R. A. Insights on the characteristics and sources of gas from an underground coal mine using compositional data analysis. *International Journal of Coal Geology*. 2021, vol. 241, article 103767. DOI: 10.1016/j.coal.2021.103767.

17. Kaledina N. O., Malashkina V. A. Indicator assessment of the reliability of the functioning of mine ventilation and degassing systems. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 250, pp. 553–561. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.8.

18. Li Y., Su H., Ji H., Cheng W. Numerical simulation to determine the gas explosion risk in longwall goaf areas. A case study of Xutuan Colliery. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020, vol. 30, no. 6, pp. 875–882. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.07.007.

19. Lolon S. A., Brune J. F., Bogin G. E., Juganda A. Study of methane outgassing and mitigation in longwall coal mines. *Mining, Metallurgy and Exploration*. 2020, vol. 37, no. 5, pp. 1437–1449. DOI: 10.1007/s42461-020-00287-6.

20. Gendler S. G., Gabov V. V., Babyr N. V., Prokhorova E. A. Justification of engineering solutions on reduction of occupational traumatism in coal longwalls. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 1, pp. 5–19. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_5.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каледина Нина Олеговна¹ — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: nok52@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7292-7364.

Аржанов Илья Евгеньевич¹ — аспирант,
e-mail: ugrumy3434@gmail.com,

¹ ГИ НИТУ «МИСиС».

Для контактов: Каледина Н.О., e-mail nok52@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kaledina N. O.¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: nok52@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7292-7364,

Arzhanov I. E.¹, Graduate Student,
e-mail ugrumy3434@gmail.com,

¹ Mining Institute, National University of Science
and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: Kaledina N. O., e-mail: nok52@mail.ru.

Получена редакцией 01.07.2022; получена после рецензии 02.09.2022; принята к печати 10.11.2022.

Received by the editors 01.07.2022; received after the review 02.09.2022; accepted for printing 10.11.2022.

