ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(6):5-19
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.4 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_6_0_5

ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ В ТУПИКОВЫХ КОМБАЙНОВЫХ ВЫРАБОТКАХ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ

С.В. Мальцев[1], Г.З. Файнбург[1], М.А. Семин[1], И.И. Козунин[1]

[1] Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия, e-mail: ilya.kozunin@yandex.ru

Аннотация: Средствами натурного эксперимента изучена временная динамика газовой обстановки в различных точках тупиковых комбайновых выработок калийных рудников. Натурные исследования включали непрерывные динамические измерения при различных режимах работы горно выемочного и вентиляционного оборудования. Измерения проводились в 3 разных сечениях выработки (микрозоны): 1 – зона дыхания машиниста комбайна, 2 – зона основного потока, выносящего загрязненный воздух из призабойной зоны (середина камеры), 3 – устье выработки (классическое место контроля за проветриванием тупиковой выработки). Динамические измерения ядовитых и горючих газов проведены на 11 комбайновых комплексах рудников Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Результаты измерений показывают, что полученные временные зависимости концентрации газовыделения при переменных режимах работы комбайнового комплекса имеют экспоненциальный характер. Кроме того, при увеличении производительности комбайна в 3 раза (с 1 до 3 т/мин) концентрация газа возрастает в 5–6 раз. Данный факт позволит обоснованно определять требуемое количество воздуха для проветривания призабойного пространства в условиях переменного по времени газовыделения. Полученные сведения о нестационарности аэрологических процессов в тупиковых выработках калийных рудников позволят в будущем разработать алгоритм динамического управления проветриванием в забое для системы мониторинга и управления проветриванием на уровне отдельных рабочих зон.

Ключевые слова: цифровизация рудничной вентиляции, проветривание выработок, нестационарность газовой обстановки, тупиковая комбайновая выработка, концентрация газа, ядовитые и токсичные газы, калийный рудник, комбайновый комплекс.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. Номер НИОКТР 126012716039 2).

Для цитирования: *Мальцев С. В., Файнбург Г. З., Семин М. А., Козунин И. И.* Исследования нестационарных процессов газовыделения в тупиковых комбайновых выработках калийных рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 6. – С. 5–19. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_6_0_5.

Non-steady state gas emission processes in blind shear stopes in potash mines

S.V. Maltsev[1], G.Z. Fainburg[1], M.A. Semin[1], I.I. Kozunin[1]

[1] Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia, e-mail: ilya.kozunin@yandex.ru

© С.В. Мальцев, Г.З. Файнбург, М.А. Семин, И.И. Козунин. 2026.

Abstract: A full-scale experiment is carried out to study time history of gas conditions at different points in blind shear stopes in potash mines. The full-scale investigations included continuous dynamic measurements taken in various operating modes of shearing and ventilating equipment. The measurements were taken in 3 cross-sections of a shear stope (microzones): 1–breathing zone of shearer's operator; 2–zone of main foul air outflow from the face zone (midpoint of the stope); 3–the stope mouth (classic point of ventilation control in a blind stope). The dynamic measurements of poison and combustible gases were taken at 11 shearing facilities at the Verkhnekamsk potassium–magnesium salt deposit. The meterage show that the resultant time curves of gas emission concentrations demonstrate an exponential behavior during intermittent operation of the shearing machine system. For another thing, when the shear capacity is increased by 3 times (from 1 t/min to 3 t/min), the gas concentration grows by 5–6 times. This fact can enable a sound estimate of air quantity required for the face area ventilation in case of time-varying gas emission. The knowledge on non-steady state air flow in blind stopes in potash mines can further help develop an algorithm of the dynamic ventilation control at longwall faces for the airing monitoring and adjustment in individual operating areas.

Key words: mine ventilation digitalization, ventilation of stopes, non-steady state of gas conditions, blind shear stope, gas concentration, poison and toxic gases, potash mine, shearing machine system.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, R&D state registration no. 126012716039-2).

For citation: Maltsev S. V., Fainburg G. Z., Semin M. A., Kozunin I. I. Non-steady state gas emission processes in blind shear stopes in potash mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(6):5-19. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_6_0_5.

Введение

Важнейшей задачей систем вентиляции подземных рудников является обеспечение безопасности ведения горных работ и безопасности труда горнорабочих. Эта задача достигается обеспечением всех потребителей требуемым количеством воздуха, в том числе разбавление загрязняющих примесей в рудничной атмосфере до безопасных концентраций. Высокая производительность горнодобывающих предприятий по добыче горной массы, сооруженных в последние десятилетия в Российской Федерации и Республике Беларусь, получила активное развитие — построены новые глубокие рудники и увеличены размеры существующих шахтных полей. Вследствие этого процесс доставки воздуха до потребителей стал сложнее, кроме того, в краевых частях месторождений увеличились объемы выделяемых газов при ведении горных работ [1, 2].

Задача обеспечения безопасных условий труда может быть решена различными способами. Выбор способов осуществляется из доступности и результативности используемых организационных мер и технических средств, учитывающих естественнонаучные закономерности протекания вентиляционных процессов.

Обеспечение состава рудничной атмосферы связано с динамическими процессами нестационарного тепломассообмена [3], однако действующая сегодня парадигма проветривания основное внимание уделяет стационарным расходам воздуха, которые бы заведомо обеспечивали соответствие рудничной атмо-

сферы требованиям безопасности при условном постоянстве добычи руды. Поэтому, согласно требованиям правил безопасности при ведении горных работ подземным способом, расчет требуемого количества воздуха должен производиться позабойно суммированием потребностей отдельных забоев, действующих выработок, блоков, участков, панелей, пластов, общешахтных камер служебного назначения с введением обоснованных коэффициентов запаса. Такой расчет производится при проектировании строительства подземного горного предприятия, а позже — по мере разработки плана горных работ на очередной календарный период (как правило, 1 раз в полугодие).

Многосвязность сетей горных выработок ведет к принципиальным сложностям поддержания «идеального» воздухораспределения для обеспечения всех забоев свежим воздухом. Поскольку точное распределение требуемых расходов воздуха в рамках концепции постоянной подачи свежего воздуха труднореализуемо, приходится вводить так называемые «коэффициенты запаса». Одновременно наличие не устранимых до нуля утечек свежего воздуха в развитой сети выработок с автономным проветриванием многократно усиливает вышеописанную проблему.

Если рассмотреть типичную для калийных рудников иерархию объектов проветривания: забой — рабочая зона — участок — блок — панель — пласт (горизонт) — фланг — рудник в целом — ГВУ, то применение типичного коэффициента запаса (с учетом внутренних утечек) в 1,2—1,3 дает превышение расхода на ГВУ по сравнению с потребностью забоя в 4,29 = 1,28 либо 8,16 = = 1,38 раз. Отсюда следует, что если согласно правилам безопасности мы будем поддерживать в забое ПДК, то на исходящей из рудника струе содержание примесей будет измеряться долями ПДК. Экспериментальные замеры, выполненные на калийных рудниках Верхнекамского месторождения [4, 5] и на полиметаллических рудниках Норильского региона [6], однозначно и достоверно подтвердили эту ситуацию. Несомненно, что такая ситуация нерациональна не только с позиции функциональности самого проветривания, но и с позиции финансовых затрат на проветривание.

Такая ситуация вызвана во многом тем, что действующая сегодня парадигма организации проветривания подземных горных выработок опирается на идею постоянной и неизменной во времени подачи свежего воздуха в отдельно взятый и строго автономно проветриваемый забой в количестве, необходимом для поддержания постоянного во времени и во всем пространстве рабочей зоны содержания примесей в рудничной атмосфере рабочих зон в пределах ПДК гигиенических норм и НДК (нормативно допустимых концентраций) горючих газов и взрывоопасной пыли.

В настоящее время с появлением средств локального оперативного регулирования распределения потоков воздуха в сети горных выработок и контроля за временными изменениями газовой обстановки появляется уникальная возможность реализации управления воздухораспределением на уровне рабочих зон [7]. Для управления газовой, пылевой и тепловой обстановками создан и соответствующий математический аппарат рудничного проветривания, методов решения систем дифференциальных уравнений, определенных на ориентированных графах, пакетов вычислительных программ [8, 9].

Сегодня проблемы совершенствования системы проветривания рабочих зон и рудников в целом на основе динамического управления проветриванием в каждой конкретной ситуации (вентиля-

ция по требованию) могут быть успешно решены на основе современных методов математического моделирования, инженерных средств контроля и оперативного регулирования движения воздуха. Однако для этого необходимо более глубоко понимать специфику нестационарных процессов проветривания.

Нестационарными процессами проветривания занимались такие советские и российские ученые, как Ф.А. Абрамов, С.В. Цой, Л.П. Фельдман, И.М. Местер, Р.Б. Тян, В.Я. Потемкин, Л.А. Пучков, Л.А. Бахвалов, Н.О. Каледина, Ю.В. Круглов, Б.П. Казаков, Л.Ю. Левин и др. Большинство этих работ связано с процессами, протекающими на добычных участках или в вентиляционной сети рудника в целом при регулировании воздухораспределения при движении фронта ведения горных работ.

С.В. Цой сформулировал задачу оптимального управления воздухораспределением и разработал метод оптимального управления вентиляционной сетью, основанный на линеаризации, а также сформулировал критерий оптимальности управления вентиляционной сетью.

Задача разработки алгоритмов системы автоматического управления проветриванием с учетом изменения параметров положительных и отрицательныхрегуляторов рассмотрена в работах С.В. Цоя, И.М. Местера, Р.Б. Тяна, В.Я. Потемкина и др.

Исследования Л.А. Пучкова и Н.О. Калединой посвящены оперативному управлению вентиляцией в угольных шахтах для повышения ее эффективности и экономичности. В работе [10] приводятся результаты многочисленных лабораторных и шахтных исследований по изучению закономерностей аэрогазодинамики в выработанных пространствах. На основании данных измерений составлена методика, позволяющая рассчитывать параметры проветривания для безопасного управления вентиляцией выемочных участков газовых шахт. В работе [11] исследовано влияние режима проветривания выемочного участка на формирование полей концентраций взрывоопасных газов в объеме выработанного пространства, разработана методика определения рациональных режимов совместной работы вентиляции и дегазации выработанных пространств.

Построением систем оптимального управления проветриванием калийных рудников занимались Ю.В. Круглов, Б.П. Казаков, Л.Ю. Левин В исследованиях авторов [12] разработан способ управления вентиляционными устройствами, отрабатывающими уставку и работающими по критерию минимизации потребляемой мощности ГВУ, а также алгоритм управления для вентиляционных сетей с одной главной вентиляторной установкой и автоматическими вентиляционными дверьми на уровне «ГВУ — главное направление» в режиме реального времени.

Вместе с тем для совершенствования проветривания забоев и рабочих зон нужно знать протекающие именно в этих условиях нестационарные процессы. Такие процессы исследованы только для буровзрывных работ, носящих явно выраженный циклический характер [13]. Для комбайновой выемки принято считать, что происходящие в забое динамические процессы можно не учитывать, рассматривая ее в стационарном приближении. Такой подход позволяет определить лишь максимально потребное количество свежего воздуха для проветривания выработки в целом и ничего не может сказать о газовой обстановке в различных микрозонах тупикового забоя при разных режимах работы комбайнового комплекса и вентиляционного оборудования.

Таким образом, целью настоящей работы является изучение закономерно-

стей нестационарных процессов газовыделения в тупиковых комбайновых выработках калийных рудников в зависимости от режимов работы горного и вентиляционного оборудования.

Объект и методика исследований

На калийных рудниках Российской Федерации добыча руды, как правило, производится механизированными комбайновыми комплексами, включающими в себя комбайн, бункер перегружатель, самоходный вагон [14]. Рабочая зона тупикового забоя калийного рудника представляет собой сложную по структуре и динамике аэрогазовую систему, в которой сочетаются процессы газовыделения, пылевыделения, а также воздухообмена между свежей струей воздуха и исходящей [15, 16]. Формирование газовой среды здесь определяется как горно-геологическими факторами, так и особенностями технологии ведения очистных работ, в первую очередь — цикличным вращением режущего органа, потоков руды в системе «комбайн–бункер–перегружатель–самоходный вагон» [17].

Основное выделение в забоях токсичных и взрывоопасных газов, а также соляной пыли происходит при разрушении массива горных пород исполнительным органом комбайна [18, 19]. Объем этих загрязнений воздуха пропорционален производительности комбайна по отбойке полезного ископаемого (максимально до 7 т/мин). Именно по этой производительности и выполняется сегодня расчет требуемого количества воздуха, что завышает расчетные потребности в свежем воздухе.

Однако реальная потребность в свежем воздухе не только непостоянна в пространстве рабочей зоны, но и меняется во времени из-за цикличной работы комбайновых комплексов, которая в свою очередь связана с транспортированием отбитой руды, прекращением работы того или иного оборудования, бурением дегазационных шпуров, креплением кровли и тому подобное. Такое «непостоянство» отбойки руды порождает и нестационарность газовой обстановки.

Для оценки временной динамики газовой обстановки и зависимости ее от работы оборудования в тупиковой комбайновой выработке проводили экспериментальные измерения газовыделений и количества подаваемого воздуха. Эксперименты проводились в различных тупиковых комбайновых забоях в разных частях шахтного поля на различных рудниках, что позволяло учесть (из-за неравномерности в геологическом строении пласта калийной соли) газовыделения с различной интенсивностью. Измерения горючих и ядовитых газов производили непрерывно в течение добычной смены. Фиксации подлежали все изменения в работе оборудования: начало работы контрольно измерительного оборудования, остановка комбайнового комплекса, разгрузка бункера-перегружателя в самоходный вагон, остановка/запуск вентилятора местного проветривания и др.

При проведении измерений выполнен анализ протяженности исследуемых тупиковых выработок, которая изменялась в диапазоне 25÷170 м, площадь поперечного сечения — 8,7÷15,6 м^2. Проветривание тупиковой выработки осуществлялось нагнетательным способом вентилятором местного проветривания (ВМП) с вентиляционным трубопроводом (d = = 600 мм), при этом количество подаваемого воздуха соответствовало расчетному. Свежий воздух поступал в рабочую зону в виде вентиляционной струи из конца става вентиляционного трубопровода, отстающего от рабочего места машиниста комбайна не более чем на 10 м.

В проведенных натурных экспериментах наиболее характерными для фиксации динамики газовой обстановки являлись следующие микрозоны, представленные на рис. 1: 1–1 — зона дыхания машиниста комбайна, 2–2 — зона основного потока, выносящего загрязненный воздух из призабойной зоны (середина камеры), а кроме того, классическое место контроля за проветриванием тупиковой выработки — устье выработки (3–3).

Выбор именно этих контрольных точек обусловлен необходимостью определения временных зависимостей концентраций газов в протяженных тупиковых выработках по всей длине. Помимо этого, в зоне непосредственного постоянного присутствия человека измерительное оборудования устанавливалось в 3 точках: кабина машиниста (зона дыхания машиниста), верхняя часть комбайна (зона повышенной локализации взрывоопасных газов), противоположная сторона кабины машиниста (зона возвратного течения).

Для оценки временной динамики газовой обстановки и зависимости ее от работы оборудования в тупиковой комбайновой выработке устанавливали переносные газоанализаторы Drager X-am 5600, измерение скорости воздуха проводилось анемометром АПР-2М.

Влияние режимов работы призабойного оборудования на нестационарность газовой обстановки

Динамические измерения ядовитых и горючих газов в тупиковых выработках комбайновых комплексов на действующих калийных рудниках Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВМКМС) были проведены на 11 комбайновых комплексах. Наиболее интересные результаты измерений с точки зрения изменения концентраций газовыделений представлены в виде результирующих графиков нестационарных измерений концентраций сероводорода и метановоздушной смеси, как наиболее распространенных и опасных природных газов на ВМКМС [20]. Типичный график, имеющий ярко выраженный нестационарный и циклический характер динамики концентрации газа, представлен на рис. 2.

Для удобства оценки режимов работы оборудования на рисунке нанесены временные участки простоя горно-вые-

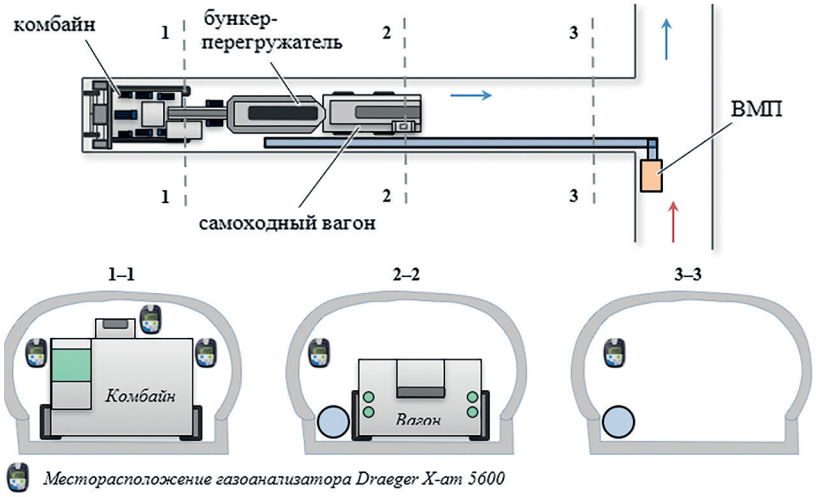

Рис. 1. Схема расположения комбайнового комплекса в забое и контрольно измерительных приборов
Fig. 1. Layout of the combine complex in the face and control and measuring instruments

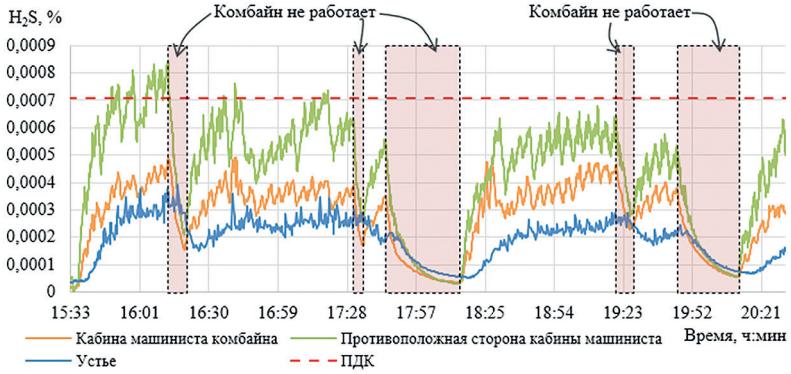

Рис. 2. Результаты нестационарных измерений концентраций H2S в тупиковой комбайновой выработке при работе комбайна №1 (Урал-61)

Fig. 2. Results of non-stationary measurements of H2S concentrations in a dead-end combine working during the operation of combine no.1 (Ural-61)

мочного оборудования, они выделены красным цветом.

Из рис. 2 видно, что концентрация газа в характерных точках вблизи комбайна имеет цикличный характер; комбайн «рубит» — концентрация растет из-за роста газовыделения, комбайн остановлен — концентрация газа снижается из-за поступления свежего воздуха. При этом на рабочем месте машиниста комбайна концентрация ниже, чем в диаметрально противоположной точке выхода воздуха из призабойной зоны из-за струи нагнетательного проветривания, которая движется вдоль стенки выработки, ближайшей к кабине машиниста. Максимальное газовыделение из поверхности выработки наблюдается при длительной непрерывной работе комбайна с момента зарубки по тончайшему слою вновь обнажаемого периметра (из груди забоя), а сам уровень газовыделения стенок выработки зависит, кроме прочих параметров, преимущественно от соотношения времени рубки и простоя в цикле. В целом из рис. 2 видно, что временные зависимости концентрации газа при переменных режимах работы комбайнового комплекса имеют экспоненциальный характер двух типов: либо возрастающая экспоненциальная зависимость, когда комбайн работает, либо убывающая, когда комбайн остановлен — это отчетливо видно по желтому и синему графикам на рис. 2. Важно отметить, что при росте концентрации газа в процессе рубки имеются неоднородности газа, которые обусловлены цикличным движением самоходного вагона в выработке сечением 8,7 м^2, что приводит к «поршневому эффекту», а также влиянием пересыпов «комбайн — бункер-перегружатель» и «бункер-перегружатель — самоходный вагон». В каждом конкретном случае свое влияние оказывают неравномерность газовыделения и его разбавления свежим воздухом, а также наличие утечек воздуха в вентиляционном трубопроводе.

Аналогичные экспериментальные измерения проведены в тупиковой выработке комбайна № 2. На рис. 3 представлены результаты динамических измерений газа с дополнительным датчиком, установленным в середине камеры (относительно устья и забоя).

Полученные временные зависимости концентрации газовыделения, аналогично рис. 2, при переменных режимах работы комбайнового комплекса носят экспоненциальный характер. При этом на графике переход от минимального

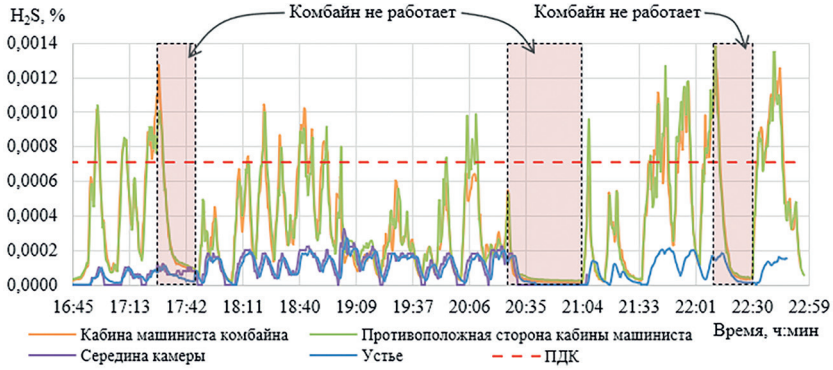

Рис. 3. Результаты нестационарных измерений концентраций H2S в тупиковой комбайновой выработке при работе комбайна № 2 (Урал-20Р)

Fig. 3. Results of non-stationary measurements of H2S concentrations in a dead-end combine working during the operation of combine no. 2 (Ural-20R)

значения к максимальному соответствует периоду рубки комбайна, а перемещение от максимального к минимальному значению — периоду остановки. Отсутствие неоднородностей на графике в процессе рубки свидетельствует об отсутствии влияния движения вагона в связи с большей площадью поперечного сечения тупиковой выработки 15,6 м^2.

По результатам измерений, представленным на рис. 4, получено, что концентрации загрязняющих веществ в точке, расположенной вблизи кровли на противоположной стороне кабины комбайна, превышают значения вблизи кабины и в устье тупиковой камеры, поскольку именно в этом месте основной вихрь проветривания тупикового забоя, вызванный струей свежего воздуха, покидает призабойную зону тупиковой выработки и несет с собой максимум загрязнений. При этом на рис. 4 представлены результаты измерений газовыделений при длительном простое комбайнового комплекса, а также при остановке вентилятора местного проветривания.

Полученные закономерности, представленные на рис. 2 и 3, полезны для

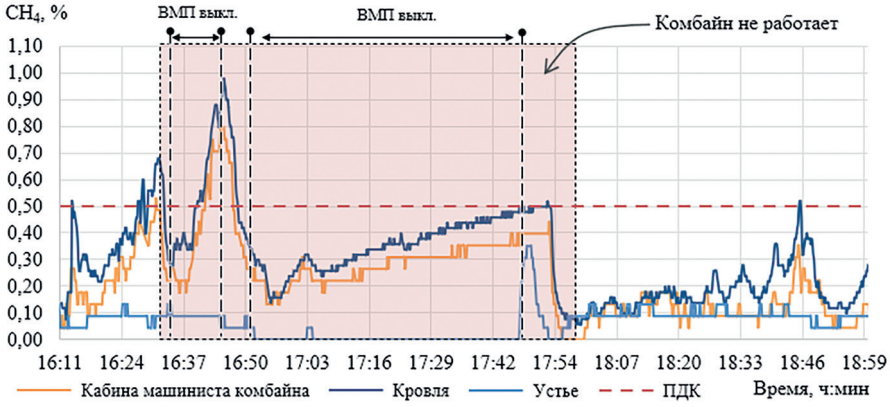

Рис. 4. Результаты нестационарных измерений концентраций CH4 в тупиковой комбайновой выработке при работе комбайна № 3

Fig. 4. Results of non-stationary measurements of CH4 concentrations in a dead-end combine working during the operation of combine no. 3

дальнейшего решения задачи разработки аэрогазового мониторинга рабочей зоны комбайнового комплекса. На основании того факта, что максимальное значение концентрации примеси получили у противоположной (относительно кабины) стороны комбайна, в дальнейшем предлагается размещать датчики аэрогазового контроля именно в правой стороне комбайнового комплекса для мониторинга газовой обстановки в забое при работе и остановке призабойного оборудования.

Особое значение для экспериментальных измерений имеет датчик, размещенный вблизи кровли выработки. Он предназначен для фиксации концентраций горючих газов, таких как метан и водород, которые при низких скоростях движения воздуха из-за своей меньшей плотности стремятся вверх, к кровле горных выработок. Повышенное содержание этих газов является индикатором возникающей опасности превышения ПДК. Это в свою очередь приводит к необходимости управления процессом проветривания или производительности комбайна для снижения концентрации газа.

При этом анализ данных рис. 3 показывает, что концентрации газа, полученные на протяжении камеры, в середине ее длины в 3—5 раз ниже, чем в призабойном пространстве. Физически это может быть связано с тем, что концентрацию газа разбавляют утечки воздуха через трубопровод.

Далее проведен натурный эксперимент по влиянию изменения производительности комбайна на газовую и пылевую обстановку. Данные измерения позволили определить влияние производительности комбайна на объем газовыделений в выработки и возможность включения комбайна в адаптивную систему. Производительность комбайна менялась принудительно регулированием подачи на забой машинистом. Объем добываемой руды в определенный промежуток времени оценивался путем измерения длины проходки тупикового забоя, а также по мере загрузки бункера-перегружателя, кузов которого вмещает 10 т руды. В ходе проведения экспериментальных исследований опробованы три режима: минимальный, средний и максимальный. Измерения производились дважды для каждого из режимов. Результаты представлены на рис. 5, где на оси ординат выделены интервалы измерений с указанием производительности.

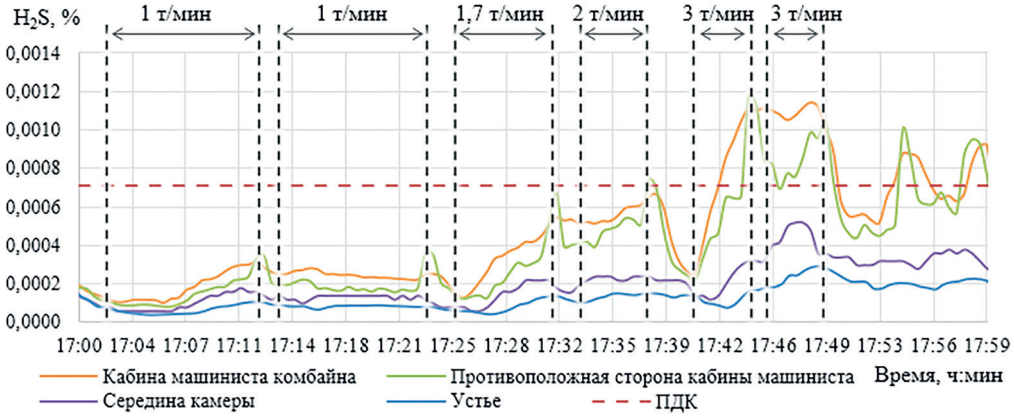

Рис. 5. Результаты измерений концентрации газа при изменении производительности комбайна № 4 (Урал-61)

Fig. 5. Results of gas concentration measurements with changes in the productivity of combine № 4 (Ural-61)

На рис. 5 представлены результаты измерений при переменной производительности комбайна Урал-61, которая варьировалась от 1 т/мин до максимальных 3 т/мин. При производительности 1 т/мин концентрация сероводорода находится на относительно низком уровне и составляет 5 — 52% от ПДК. При переходе на средний уровень (1,7 — 2,0 т/мин) наблюдается повышение концентраций и в отдельных точках вблизи забоя достижение отметки ПДК. При максимальном режиме концентрации сероводорода могли достигать превышения ПДК на 69%. При этом в самом устье выработки превышения ПДК отсутствуют. В момент изменений производительности концентрации снижаются, но с некоторой задержкой, что связано с инерционностью процессов разбавления и газовыделения. При увеличении производительности в 3 раза (с 1 до 3 т/мин) концентрация газа возрастает в 5 — 6 раз.

Замеренные тренды газовыделения, представленные на рис. 2 — 5, показывают, что основное газовыделение происходит в призабойном пространстве. При этом рост концентраций характеризует периоды рубки, а падение — период простоя горновыемочного оборудования. Кроме того, отбитая руда какое-то время находится за щитом комбайна, а затем пересыпается сначала в бункер-перегружатель, а затем в самоходный вагон. В момент пересыпа свежедобытая руда продолжает выделять газ. Анализируя рис. 5, можно сделать вывод о том, что прослеживается взаимосвязь между производительностью комбайнового комплекса, временем его работы и количеством выделяемого газа. В итоге уровень газовыделения в период рубки много выше, чем в период простоя.

С остановкой подачи комбайна на забой уровень газовыделения снижается по экспоненциальному закону. Сначала происходит резкое падение в связи с прекращением разрушения рудного массива и обнажения поверхности кусков отбитой руды, а в дальнейшем происходит плавное снижение за счет вытеснения газа свежим воздухом. Также можно увидеть, что в начальный момент времени при остановке работы комбайнового комплекса и работе вентилятора местного проветривания ~6 — 10 мин концентрация резко снижается на 70% от максимального значения. Быстрое падение концентрации газа говорит о том, что при исключении большого источника газовыделения (прекращение рубки полезного ископаемого от массива) удается оперативно нормализовать газовую обстановку. При этом остаются микрозоны в забое, из которых продолжает медленно выделяться газ или он вытесняется струей свежего воздуха.

Помимо работы очистного комбайна влияние на нестационарность газовой обстановки оказывает челночное движение самоходного вагона от комбайна до рудоспуска и обратно. При выезде из камеры самоходный вагон создает за собой зону с низким давлением, тем самым захватывая воздух за собой [21]. При заезде в камеру самоходный вагон, наоборот, создает лобовое сопротивление исходящей струе воздуха, работает как поршень. Для определения эффекта влияния движения самоходного вагона на концентрацию газов в тупиковой выработке осуществлялась запись хронометража движения оборудования. Основными метками в данном случае выступали состояния — самоходный вагон «в камере» и «вне камеры». Время транспортировки самоходным вагоном складывается из времени разгрузки (порядка 1 — 1,2 мин), времени движения с рудой и порожняком. Поскольку максимальная длина тупиковой камеры для Верхнекамского месторождения 200 м, то время транспортировки может достигать 5 — 6 мин. То есть теоретически каждое

Результаты измерений концентрации сероводорода при курсировании самоходного вагона
Results of measurements of hydrogen sulfide concentration during the operation of a Shuttle car

Номер комбайна	Длина камеры	Кабина машиниста комбайна		Середина протяжения камеры		Устье камеры	
расположение вагона		в камере	вне камеры	в камере	вне камеры	в камере	вне камеры
КК № 1	170 м	0,00042%	0,00032%	0,00014%	0,00014%	0,00011%	0,00011%
КК № 2	65 м	0,00043%	0,00042%	0,00010%	0,00012%	0,00010%	0,00011%
КК № 3	25 м	0,00071%	0,00070%	0,00022%	0,00016%	0,00015%	0,00011%
КК № 4	90 м	0,00035%	0,00027%	0,00024%	0,00022%	0,00015%	0,00015%
КК № 5	120 м	0,00034%	0,00030%	0,00027%	0,00025%	0,00021%	0,00020%

изменение концентрации от въезда и выезда вагона должно происходить не реже чем каждые 2—3 мин, и чем короче выработка, тем явление должно происходить чаще.

Хронометраж курсирования самоходного вагона фиксировался для всех комбайновых комплексов. Однако на пластах Красный II, Красный III и Вк выделения сероводорода отсутствовали, а концентрации метановоздушной смеси находились в пределах погрешности измерений газоанализатора. При этом на пласте АБ было зафиксировано наличие сероводорода. Результаты измерений сведены в таблицу.

Всего анализу подлежали 5 комбайновых комплексов с разных калийных рудников. По результатам измерений концентрации сероводорода в камере в зависимости от движения вагона получено, что в среднем концентрация газа выше, когда вагон находится в камере. Мы связываем это обстоятельно с газовыделением из отбитой руды (15 т), находящейся в вагоне, а также с запаздыванием повышения концентрации сероводорода из-за ссыпания из бункера-перегружателя в самоходный вагон. Особенно это заметно в области нахождения машиниста комбайна, где отработанный воздух вновь подхватывается активной струей, выходящей из вентиляционного става.

Важно отметить, что расход воздуха, подаваемый для проветривания выемочной камеры, в течение всего времени остается постоянным.

Анализируя данные, представленные в таблице, можно сделать вывод о том, что длина камеры влияет на разницу концентраций сероводорода в разных точках цикла работы комбайнового комплекса. Так, в увеличенных по протяженности очистных камерах разница концентраций сероводорода при нахождении вагона в камере и на выемочном штреке выше, чем в более коротких. Это связано с увеличением времени движения самоходного вагона в тупиковой камере от комбайна до рудоспуска, а также с усложнением процессов удаления газов из области камеры.

Заключение

Полученные результаты мониторинговых измерений газовой обстановки в разных тупиковых комбайновых выработках ВМКМС позволили установить характер быстро протекающих нестационарных процессов динамики газовой обстановки.

Концентрации сероводорода и метановоздушной смеси демонстрируют ярко выраженный переменный и цикличный характер, непосредственно связанный с периодами рубки полезного ископаемого и простоями оборудования.

В ходе экспериментов установлены наиболее характерные и информативные точки для размещения контрольных датчиков, позволяющих контролировать состояние газовой обстановки. Анализ пространственного распределения концентраций сероводорода и метановоздушной смеси показал, что оптимальным местом для размещения датчиков является противоположная сторона кабины комбайна в верхней части.

Полученные закономерности газовыделения при переменных режимах работы комбайнового комплекса носят экспоненциальный характер. С остановкой подачи комбайна на забой уровень газовыделения снижается. Сначала происходит резкое падение в связи с прекращением обнажения поверхности, а в дальнейшем скорость его снижения обусловлена истощением газовыделений из поверхности горной породы.

По результатам экспериментальных измерений можно сделать вывод об изменении концентрации газа в зависимости от изменения производительности комбайнового комплекса. Так, при увеличении производительности в 3 раза (с 1 до 3 т/мин) концентрация газа возрастает в 5 — 6 раз.

Полученные сведения о нестационарности процессов проветривания в тупиковых выработках калийных рудников, амплитудах и периодичности изменения концентраций вредных примесей в процессе работы комбайновых комплексов, неравномерности распределений газа в призабойной зоне, изменении газовыделения от производительности комбайнового комплекса, влиянии поршневого эффекта от движения вагона на распределение газа важны при разработке систем мониторинга и управления проветриванием на уровне отдельных рабочих зон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гришин Е. Л.*, *Зайцев А. В.*, *Кузьминых Е. Г.* Обеспечение безопасных условий деятельности сотрудников по фактору вентиляции в подземных рудниках при работе техники, оснащенной двигателями внутреннего сгорания // Недропользование. — 2020. — Т. 20. — № 3. — С. 280 — 290. DOI: 10.15593/2712 8008/2020.3.8.

2. *Комаров В. Б.*, *Килькеев Ш. Х.* Рудничная вентиляция. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Недра, 1969. — С. 416.

3. *Семин М. А.*, *Гришин Е. Л.*, *Левин Л. Ю.*, *Зайцев А. В.* Автоматизированное управление вентиляцией шахт и рудников. Проблемы, современный опыт, направления совершенствования // Записки Горного института. — 2020. — Т. 246. — С. 623 — 632. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.4.

4. *Бруев Н. А.*, *Исаевич А. Г.*, *Стариков А. Н.* Исследование газовой обстановки в условиях рудника ООО «ЕВРОХИМ–УКК» // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2024. — № 1. — С. 475 — 483.

5. *Стариков А. Н.*, *Мальцев С. В.*, *Суханов А. Е.* Влияние сорбционных свойств калийных солей на газовую обстановку в тупиковых горных выработках // Горные науки и технологии. — 2025. — Т. 10. — № 1. — С. 25 — 33. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-01-210.

6. *Левин Л. Ю.*, *Дарбинян Т. П.*, *Гришин Е. Л.*, *Шевченко П. Р.* Обеспечение аэрологической безопасности при ведении горных работ на рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» // Горный журнал. — 2025. — № 6. — С. 92 — 100. DOI: 10.17580/gzh.2025.06.14.

7. *Wallace K.*, *Prosser B.*, *Stinnette J. D.* The practice of mine ventilation engineering // International Journal of Mining Science and Technology. 2015, vol. 25, no. 2, pp. 165 — 169. DOI: 10.1016/j.ijmst.2015.02.002.

8. *Branny M.*, *Jaszczur M.*, *Wodziak W.*, *Szmyd J.* Experimental and numerical analysis of air flow in a dead-end channel // Journal of Physics: Conference Series. 2016, vol. 745, no. 3, article 032073. DOI: 10.1088/1742-6596/745/3/032073.

9. *Файнбург Г. З.* Цифровизация процессов проветривания калийных рудников: монография. — Пермь-Екатеринбург, 2020. — 422 с.

10. *Пучков Л. А.*, *Каледина Н. О.* Динамика метана в выработанных пространствах угольных шахт. — М.: МГГУ, 1995. — 313 с.

11. *Пучков Л. А.*, *Каледина Н. О.* Влияние режима проветривания на распределение метана в выработанном пространстве // Известия вузов. Горный журнал. — 1980. — № 10. — С. 46—49.

12. *Кашников А. В.*, *Круглов Ю. В.* Стратегия управления проветриванием рудника в оптимальном режиме с использованием аппарата нечеткой логики // Записки Горного института. — 2023. — Т. 262. — С. 595—606. DOI: 10.31897/PMI.2023.262.12.

13. *Ольховский Д. В.*, *Паршаков О. С.*, *Бублик С.* Исследование динамики газовой обстановки подземных выработок после проведения взрывных работ // Горные науки и технологии. — 2023. — Т. 8. — № 1. — С. 47—58. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-08-86.

14. *Кузнецов А. И.*, *Кормщиков Д. С.*, *Князев Н. А.* Практический опыт курсовой навигации проходческо-очистного комбайна на калийном месторождении // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2024. — № 4. — С. 685—699.

15. *Земсков А. Н.*, *Николаев А. В.*, *Лискова М. Ю.* Актуальные вопросы изучения газоносности соляных пород по ядовитым газам // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2023. — № 4. — С. 639—648.

16. *Андрейко С. С.*, *Иванов О. В.*, *Лялина Т. А.*, *Нестеров Е. А.* Газоносность по свободным газам пород сильвинитовой и сильвинито-карналлитовой зон Верхнекамского месторождения // Горная промышленность. — 2021. — № 4. — С. 125—133. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-4-125-133.

17. *Лыхин П. А.* Теория и практика добычи руды комбайновым комплексом. — Пермь, 2000. — 24 с.

18. *Стариков А. Н.*, *Газизуллин Р. Р.* Исследования особенностей газораспределения в атмосфере тупиковых выработок калийного рудника // Горное эхо. — 2024. — № 3 (96). — С. 79—84. DOI: 10.7242/echo.2024.3.13

19. *Соловьев В. А.*, *Аптуков В. Н.*, *Чернопазов Д. С.*, *Секунцо А. И.*, *Русаков М. И.*, *Тарасов В. В.*, *Петрикова В. С.* Аспекты повышения эффективности разработки Верхнекамского калийного месторождения. — Новосибирск: Наука, 2019. — 182 с.

20. *Андрейко С. С.*, *Лялина Т. А.* Исследования газовыделений из геологоразведочных скважин на Верхнекамском месторождении калийных солей // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2017. — № 2. — С. 33—38.

21. *Levin L., Semin M., Maltsev S., Luzin R., Sukhanov A.* Numerical analysis of the impact of variable borer miner operating modes on the microclimate in potash mine working areas // Computation. 2025, vol. 13, no. 4, article 85. DOI: 10.3390/computation13040085. ГИАБ

REFERENCES

1. Grishin E. L., Zaitsev A. V., Kuzminykh E. G. Ensuring safe workplace conditions when working equipment with internal combustion engines by ventilation in underground mines. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*. 2020, vol. 20, no. 3, pp. 280—290. [In Russ]. DOI: 10.15593/2712 8008/2020.3.8.

2. Komarov V. B., Kil'keev Sh. Kh. *Rudnichnaya ventilyatsiya* [Mine ventilation], Moscow, Nedra, 1969, pp. 416.

3. Semin M. A., Grishin E. L., Levin L. Y., Zaitsev A. V. Automated ventilation control in mines. Challenges, state of the art, areas for improvement. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 246, pp. 623—632. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.4.

4. Bruev N. A., Isayevich A. G., Starikov A. N. Investigation of gas situation under the conditions of EVROKHIM-UKK mine. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2024, no. 1, pp. 475—483. [In Russ].

5. Starikov A. N., Maltsev S. V., Sukhanov A. E. Influence of the sorption properties of potash salts on the gas environment in dead-end mine workings. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025, vol. 10, no. 1, pp. 25—33. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-01-210.

6. Levin L. Yu., Darbinyan T. P., Grishin E. L., & Shevchenko P. R. Ensuring aerological safety during mining operations at the mines of the Polar Division of PJSC MMC Norilsk Nickel. *Gornyi Zhurnal*. 2025, no. 6, pp. 92—100. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.06.14.

7. Wallace K., Prosser B., Stinnette J. D. The practice of mine ventilation engineering. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2015, vol. 25, no. 2, pp. 165—169. DOI: 10.1016/j. ijmst.2015.02.002.

8. Branny M., Jaszczur M., Wodziak W., Szmyd J. Experimental and numerical analysis of air flow in a dead-end channel. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016, vol. 745, no. 3, article 032073. DOI: 10.1088/1742-6596/745/3/032073.

9. Fainburg G. Z. *Tsifrovizatsiya protsessov provetrivaniya kaliynykh rudnikov*: monografiya [Digitalization of ventilation processes at potash mines: monograph], Perm-Ekaterinburg, 2020, 422 p.

10. Puchkov L. A., Kaledina N. O. *Dinamika metana v vyrabotannykh prostranstvakh ugol'nykh shakht* [Dynamics of methane in worked-out spaces of coal mines], Moscow, 1995, 313 p.

11. Puchkov L. A., Kaledina N. O. Effect of ventilation mode on methane distribution in worked-out space. *Minerals and Mining Engineering*. 1980, no. 10, pp. 46 — 49. [In Russ].

12. Kashnikov A. V., Kruglov Yu. V. Strategy of mine ventilation management in optimal mode using fuzzy logic apparatus. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 262, pp. 595 — 606. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.262.12.

13. Olkhovskiy D. V., Parshakov O. S., Bublik S. Investigation of dynamics of gas situation in underground workings after blasting. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023, vol. 8, no. 1, pp. 47 — 58. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-08-86.

14. Kuznetsov A. I., Kormshchikov D. S., Knyazev N. A. Practical experience of course navigation of a development-and-production combine harvester at a potash deposit. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2024, no. 4, pp. 685 — 699. [In Russ].

15. Zemskov A. N., Nikolaev A. V., Liskova M. Yu. Topical issues of studying gas content of rock salt in toxic gases. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2023, no. 4, pp. 639 — 648. [In Russ].

16. Andreyko S. S., Ivanov O. V., Lyalina T. A., Nesterov E. A. Gas content of free gases in rocks of sylvinite and sylvinite-carnallite zones of the Verkhnekamsk deposit. *Russian Mining Industry Journal*. 2021, no. 4, pp. 125 — 133. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-4-125-133.

17. Lykhin P. A. *Teoriya i praktika dobychi rudy kombaynovym kompleksom* [Theory and practice of ore mining by combine complex], Perm, 2000, 24 p.

18. Starikov A. N., Gazizullin R. R. Investigation of gas distribution features in the atmosphere of dead-end workings of a potash mine. *Gornoye ekho*. 2024, no. 3 (96), pp. 79 — 84. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2024.3.13

19. Solov'ev V. A., Aptukov V. N., Chernopazov D. S., Sekuntso A. I., Rusakov M. I., Tarasov V. V., Petrikova V. S. *Aspekty povysheniya effektivnosti razrabotki Verkhnekamskogo kaliynogo mestorozhdeniya* [Aspects of improving the efficiency of development of the Verkhnekamsk potash deposit], Novosibirsk, Nauka, 2019, 182 p.

20. Andreyko S. S., Lyalina T. A. Investigation of gas emissions from geological exploration wells at the Verkhnekamsk potash salt deposit. *Minerals and Mining Engineering*. 2017, no. 2, pp. 33 — 38. [In Russ].

21. Levin L., Semin M., Maltsev S., Luzin R., Sukhanov A. Numerical analysis of the impact of variable borer miner operating modes on the microclimate in potash mine working areas. *Computation*. 2025, vol. 13, no. 4, article 85. DOI: 10.3390/computation13040085.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мальцев Станислав Владимирович[1] — канд. техн. наук,
зав. сектором, e-mail: st.v.maltsev@ya.ru,
ORCID ID: 0009-0002-9887-1455,
Файнбург Григорий Захарович[1] — д-р техн. наук, профессор,
главный научный сотрудник, e-mail: faynburg@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9599-7581,
Семин Михаил Александрович[1] — д-р техн. наук,
зав. лабораторией, e-mail: mishkasemin@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0001-5200-7931,
Козунин Илья Игоревич[1] — инженер,
e-mail: ilya.kozunin@yandex.ru, ORCID ID: 0009-0000-3118-8956,
[1] Горный институт УрО РАН.
Для контактов: Козунин И.И., e-mail: ilya.kozunin@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.V. Maltsev[1], Cand. Sci. (Eng.), Head of Sector,
e-mail: st.v.maltsev@ya.ru, ORCID ID: 0009-0002-9887-1455,
G.Z. Fainburg[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher,
e-mail: faynburg@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-9599-7581,
M.A. Semin[1], Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory,
e-mail: mishkasemin@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5200-7931,
I.I. Kozunin[1], Engineer, e-mail: ilya.kozunin@yandex.ru,
ORCID ID: 0009-0000-3118-8956,
[1] Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
614007, Perm, Russia.
Corresponding author: I.I. Kozunin, e-mail: ilya.kozunin@yandex.ru.

Получена редакцией 14.01.2026; получена после рецензии 16.02.2026; принята к печати 10.05.2026.
Received by the editors 14.01.2026; received after the review 16.02.2026; accepted for printing 10.05.2026.

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ БАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ СКВАЖИННЫХ ГИДРОМОНИТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

(2025, № 12, СВ 32, 16 с.)

Мельник Владимир Васильевич — д-р техн. наук, профессор, НИТУ МИСИС, e-mail: geoteh-melnik@yandex.ru, ORCID ID: 0009-0008-8678-8324,
Каппушев Динислам Замирович — заместитель директора центра патриотического и культурно-нравственного воспитания НИТУ МИСИС, e-mail: kappushev@misis.ru.

Показано, что основу технологических модулей комбинированной геотехнологии должны составлять скважинные гидромониторные агрегаты с повышенной разрушающей способность, обеспечивающие достаточно высокие нагрузки на очистной забой, оперативное изменение параметров отработки выемочных полос при изменении горно-геологических и горнотехнических условий ведения горных работ. Рассмотрены вопросы повышения разрушающей способности скважинных гидромониторных агрегатов за счет применения режима двухструйного разрушения угольного массива при экспериментально установленном оптимальном расстояния между струями. Проанализированы результаты стендовых исследований производительности гидравлического разрушения образцов при реализации двухструйного разрушения.

Ключевые слова: проектирование, комбинированная геотехнология, технологические модули, скважинные гидромониторные агрегатыы, производительность гидравлического разрушения, двухструйное разрушение.

DESIGN OF BASIC TECHNOLOGICAL MODULES FOR COMBINED GEOTECHNOLOGY BASED ON BOREHOLE HYDROMONITOR UNITS

V.V. Melnik, Dr. Sci. (Eng.), Professor, NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia, e-mail: geoteh-melnik@yandex.ru,
D.Z. Kappushev, Deputy Director of the Center for Patriotic, Cultural and Moral Education,
NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia, e-mail: kappushev@misis.ru.

It is shown that the technological modules of combined geotechnology should be based on borehole hydromonitoring units with increased destructive power, providing sufficiently high loads on the treatment face, and prompt changes in the parameters of excavation strips when mining and geological and mining engineering conditions change. The issues of increasing the destructive power of borehole hydraulic monitoring units due to the use of a two-jet destruction mode of a coal massif with an experimentally established optimal distance between the jets are considered. The results of bench studies of the performance of hydraulic fracture of samples during the implementation of double-jet fracture are analyzed.

Key words: design, combined geotechnology, process modules, borehole hydromonitor units, hydraulic fracture performance, dual-jet fracture.