ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(2):68-85
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.41 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_68

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В РАБОЧИХ ЗОНАХ РУДНИКОВ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ И МАГНИЕВЫХ СОЛЕЙ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДИКИ ОТБОРА ПРОБ РУДНИЧНОГО ВОЗДУХА

А.Н. Стариков[1], Л.Ю. Левин[1], С.В. Мальцев[1]

[1] Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия, e-mail: starikov4488@mail.ru

Аннотация: Разработка калийных месторождений подземным способом осложняется выделением природных и наличием техногенных газов, влияющих на безопасность в подземных горных выработках. Для сохранения безопасных условий в рабочих зонах калийных рудников необходимо непрерывно обеспечивать их полноценное проветривание. Пробы рудничного воздуха, отобранные при проведении газовых съемок на рудниках Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей, помогают определить необходимое количество воздуха для эффективной вентиляции рабочих зон. С ростом объемов добычи полезного ископаемого условия труда в рабочих зонах ухудшаются. Увеличение протяженности выработок и объема выработанного пространства приводит к неравномерному распределению и менее интенсивному выносу газовых примесей из рабочей зоны. Это значительно усложняет контроль газовой среды и вызывает необходимость непрерывного совершенствования существующих методов контроля за состоянием рудничной атмосферы. Выполнен анализ действующих подходов к контролю рудничной атмосферы и определены недостатки применяемых способов отбора проб рудничного воздуха. В рамках исследования проведены необходимые лабораторные и шахтные эксперименты, результаты которых позволили разработать методику отбора проб для оценки концентраций газообразных примесей в воздушной среде рабочих зон рудников Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей. Предлагаемый подход учитывает выявленные недостатки, особенности распределения газовых примесей и происходящие физико-химические процессы в пределах рабочих зон.

Ключевые слова: рудничная атмосфера, газовая съемка, отбор проб, относительная газообильность, водород, диоксид углерода, адсорбция, хроматография, концентрация газа, калийный рудник.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР: 124020500030-7).

Для цитирования: *Стариков А.Н., Левин Л.Ю., Мальцев С.В.* Исследование особенностей газораспределения в рабочих зонах рудников Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей для совершенствования методики отбора проб рудничного воздуха // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 2. – С. 68–85. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_68.

Analysis of gas distribution in operating areas in mines of the Upper Kama potassium and magnesium salt deposit toward improvement of mine air sampling procedure

A.N. Starikov[1], L.Yu. Levin[1], S.V. Maltsev[1]

[1] Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia, e-mail: starikov4488@mail.ru

Abstract: Underground mining of potassium deposits is complicated by emission of natural and industrial gases which affect operational safety of mine excavations. For enhancing safety conditions in operating areas in potassium mines, it is required to ensure their continuous and full-fledged airing. Mine air sampling during gas surveying in mines of the Upper Kama potassium and magnesium salt deposit helps determine air amount required for the effective ventilation of operating areas. As mineral production increases, the work environment in mines worsens. Elongation of mine openings and expansion of mined-out voids leads to nonuniform gas distribution and to poor removal of gaseous impurities from operating areas. This greatly complicates gas control and necessitates persistent improvement of the existing approaches to mine air monitoring. This article analyzes the existing methods of mine air monitoring and identifies disadvantages of the mine air sampling techniques in use. Within the framework of the research, the necessary experiments were carried out on laboratory and mine scale, and their results made it possible to develop an air sampling procedure for the assessment of concentrations of gaseous impurities in air in operating areas in mines at the Upper Kama potassium and magnesium salt deposit. The proposed approach takes into account the identified disadvantages, peculiarities of distribution of gas impurities and the actual physicochemical processes in operating areas in mines.

Key words: mine air, gas survey, sampling, relative gas content, hydrogen, carbon dioxide, adsorption, chromatography, gas concentration, potassium mine.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of a state contract, R&D project state registration no. 124020500030-7.

For citation: *Starikov A. N., Levin L. Yu., Maltsev S. V.* Analysis of gas distribution in operating areas in mines of the Upper Kama potassium and magnesium salt deposit toward improvement of mine air sampling procedure. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(2):68-85. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_68.

Введение

Разработка калийных месторождений подземным способом сопровождается выделением газовых примесей, влияющих на формирование рудничной атмосферы в горных выработках. Газовые примеси, выделяющиеся из массива горных пород при добыче калийных руд, при определенных условиях могут создать взрывоопасную или удушливую атмосферу в рабочих зонах рудника. В связи с этим на калийных рудниках предусмотрен оперативный и плановый контроль состава рудничного воздуха и меры обеспечения безопасного ведения горных работ [1, 2]. Газовая обстановка в рабочих зонах и на руднике в целом складывается не только из газов, выделяющихся из калийного массива. На состав рудничной атмосферы также влияют техногенные источники газовыделения — техника с двигателем внут-

реннего сгорания, окисление древесины, сварочные и огневые работы. В калийном массиве содержатся природные горючие газы (водород, метан, предельные углеводороды) и токсичный сероводород [3]. Техногенные же источники газовыделения приводят к появлению в шахтной атмосфере следов оксида и диоксида углерода, а также окисей азота [4].

Рабочими зонами на калийных рудниках являются горные выработки, где осуществляются работы, связанные с отбойкой руды. Согласно правилам безопасности, все действующие выработки необходимо непрерывно проветривать активной струей воздуха для поддержания приемлемых условий труда горнорабочих. Проветривание рабочих зон, среди прочего, направлено на разбавление загрязняющих веществ (газа, пыли) до уровня ниже предельно допустимого с последующим их удалением. Омывая рабочую зону, воздух насыщается газовыми примесями, выделяющимися при отбойке руды, и затем постепенно удаляется по вентиляционным штрекам. В сквозных выработках загрязненная струя воздуха сразу удаляется на вентиляционный штрек, минуя рабочие места. В тупиковых рабочих зонах загрязненный поток воздуха движется по той же самой выработке, где проложен воздухоподающий трубопровод, в противоположном направлении, от тупика к вентиляционному штреку, создавая загазованную атмосферу вдоль всей длины тупиковой выработки, где находятся горнорабочие. Для примера на рис. 1 представлены схемы проветривания тупиковой и сквозной рабочих зон.

Увеличение объемов добычи полезных ископаемых обусловлено применением все более производительного оборудования, удалением фронта добычи и увеличением количества рабочих зон в одновременной работе [5]. Все эти факторы неизбежно усугубляют газовую обстановку в калийных рудниках. Одной из сложностей является увеличение длины, объема выработанного пространства и площади обнаженного массива, контактирующего с воздухом в рабочих зонах, что может влиять на скорость накопления и удаления вредных веществ из рабочей зоны, а также вызывать неравномерное распределение этих веществ внутри выработки [6]. Об

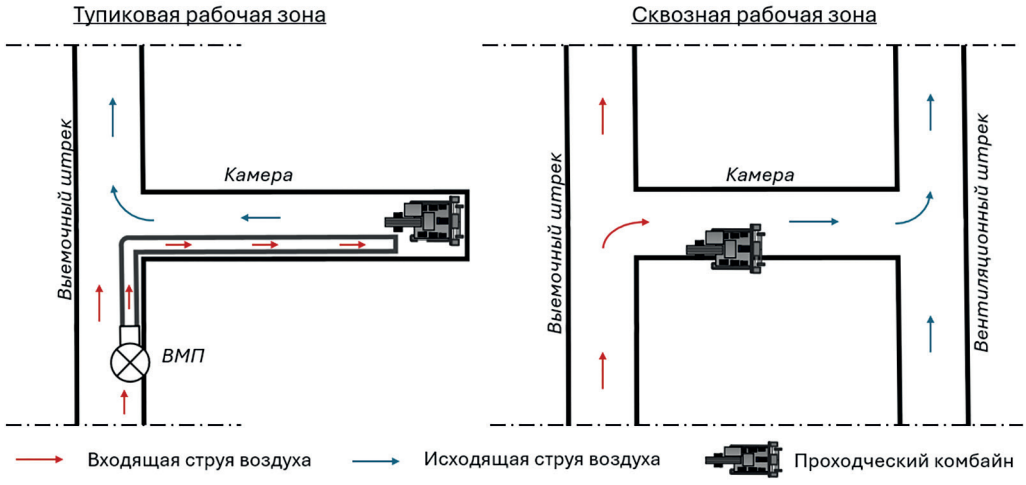

Рис. 1. Схемы проветривания рабочих зон
Fig. 1. Ventilation schemes of work areas

этом упоминается в ряде исследований, где описываются аэрогазодинамические связи в пределах рабочих зон, способные повлиять на распределение газовой смеси и на ее состав [7, 8].

Влияние массива горных пород и прочих факторов на рудничную атмосферу ранее рассматривалось с разных сторон. В отечественной и зарубежной литературе [9—11] затрагиваются темы адсорбционных процессов в калийных и угольных шахтах и их участие в формировании рудничной атмосферы в подземных горных выработках. Механизмы указанных процессов — конвективно-диффузионный массоперенос и передача растворенных в воздухе примесей к абсорбирующим поверхностям. Также на изменение состава рудничного воздуха может влиять высокая гигроскопичность и растворимость породы.

Лабораторные исследования [12] продемонстрировали, что калийные и магниевые соли способны поглощать газовые примеси, а эксперимент в шахтных условиях показал, что количество газа в протяженных тупиковых выработках снижается по мере движения воздуха от забоя к устью камеры [13]. Кроме того, установлено, что на процесс поглощения газовых примесей, наряду с адсорбционными свойствами калийных солей и относительной влажностью шахтного воздуха, в некоторой мере оказывает влияние аэроионная обстановка. Кроме того, гибкий вентиляционный трубопровод, находящийся под избыточным внутренним давлением, создает утечки свежего воздуха в выработку, что может также менять состав атмосферы в пределах выработки [14]. Все упомянутые выше факторы связаны с процессом уменьшения содержания газовых примесей в вентиляционном потоке по мере его продвижения от источника газовыделения. В связи с этим вопрос определения зоны выделения газа и места проведения замеров крайне важен. Актуальность задаче придает необходимость точного определения требуемого количества воздуха для проветривания призабойной части рабочей зоны для создания безопасных условий труда шахтеров и повышения энергоэффективности системы вентиляции.

Способы наблюдения и контроля

Оценка газовой обстановки на рудниках не ограничивается исключительно параметром газоносности пород. Прямые измерения концентрации газов в воздухе определяют реальное выделение газа в горные выработки. Такие замеры осуществляются как в рамках оперативного контроля и индикации взрывоопасной среды, так и для определения потребного количества воздуха. В каждом случае контроль газового баланса в подземных горных выработках ориентирован на решение о выборе параметров проветривания рабочих зон.

Согласно нормативным документам, действующим на рудниках Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей (ВМКМС), помимо оперативного контроля концентрации газовых примесей в рамках планового контроля ежегодно определяется относительная газообильность рабочих зон, что является показателем фактического газовыделения от работы добычного оборудования. Относительная газообильность выражается отношением количества выделенного газа к количеству добытой руды. Количество выделенного газа устанавливается путем взятия проб шахтного воздуха и измерением объема воздуха. Значения относительной газообильности являются результатом проведения ежегодных газовых съемок, чего требуют «Правила безопасности...». Газовые съемки не являются постоянной мерой оперативного контроля для предотвра-

щения аварий, а проводятся независимыми организациями и служат инструментом в вопросах поддержания проветривания, соответствующего газовой обстановке на руднике. На основании результатов газовой съемки рассчитывается требуемое количество воздуха для проветривания соответствующей рабочей зоны по газовому фактору [15].

На калийных рудниках Старобинского месторождения фактическая газовая обстановка оценивается на основании результатов отбора проб, оперативных изменений, а также данных о газодинамических явлениях в горных выработках. Отбор проб для определения относительной газообильности рабочих зон не проводится. А расчет необходимого количества воздуха для проветривания ведется по данным о газоносности пласта.

На зарубежных калийных месторождениях чаще всего методика контроля за газовой обстановкой построена на прямых измерениях концентрации газовых примесей и разбавлении их до приемлемых концентраций [16, 17]. Расчет количества воздуха ведется по прогнозной газоносности отрабатываемого пласта.

При расчете необходимого объема воздуха для проветривания угольных шахт в РФ и за рубежом [18, 19] обычно используют ожидаемый дебет газовыделения, который зависит от газоносности разрабатываемого пласта, а в шахтах, опасных по газодинамическим явлениям, могут использовать данные по максимальному выбросу газа за текущий год. Также применяются значения абсолютной метанообильности, которая характеризуется выделением метана из массива за единицу времени.

В представленных способах оценки газовой обстановки не принимаются во внимание процессы, протекающие в атмосфере выработок, потенциально способные оказывать влияние на состав воздушной среды после выделения газовых примесей. Таким образом, точность сбора данных о газовом составе атмосферы рабочих зон, зависящая от верного выбора места и времени отбора проб, важна для расчета количества воздуха и обеспечения безопасности ведения горных работ. Целью настоящей работы является разработка подхода к отбору проб рудничного воздуха для оценки относительной газообильности, учитывающего особенности распределения газовых примесей в пределах рабочих зон калийных рудников. Основными задачами исследования является анализ существующих способов отбора проб, проведение экспериментов для подтверждения влияния калийных солей на рудничный воздух и апробация предлагаемого подхода в условиях действующих рабочих зон калийного рудника.

Действующая методика

Сегодня газовая съемка на рудниках ВМКМС состоит из измерений и отбора проб в руднике с последующим лабораторным анализом. Исследования в шахте предусматривают замеры количества воздуха, поступающего в рабочую зону, и отбор проб воздуха для определения концентрации газа. Отбор проб воздуха производится на свежей струе воздуха у «всаса» вентилятора местного проветривания (ВМП) и на загрязненной струе воздуха, исходящей из рабочей зоны в устье тупиковой камеры. Для последующего анализа содержания метана, водорода и других малорастворимых веществ в рудничном воздухе используются пробы, отобранные «мокрым способом», а также с использованием резиновых камер. Отбор проб воздуха при определении сероводорода, окислов азота и других растворимых газов применяют сосуд из темного стекла объемом 0,5 — 0,7 дм^3 с поглотительным

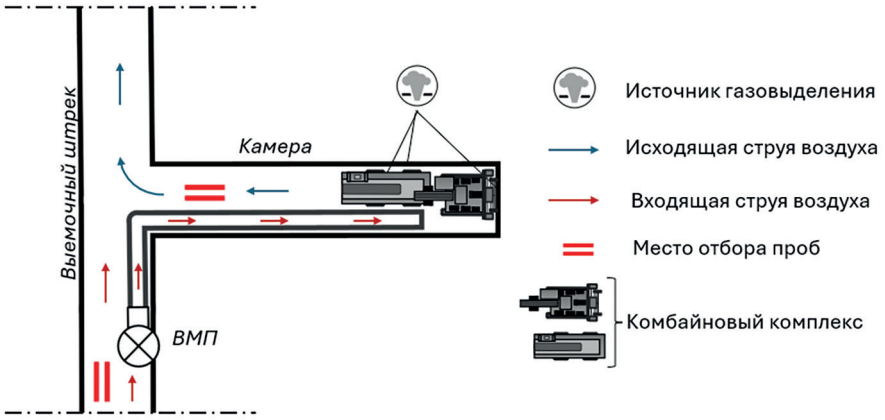

Рис. 2. Схема отбора проб
Fig. 2. Sampling Scheme

раствором молибденовокислого аммония. Затем выбранные пробы подвергаются анализу с использованием хроматографического и колориметрического методов в лабораторных условиях.

Схема отбора проб при проведении газовой съемки представлена на рис. 2.

Предварительно выбранные места проведения измерений и отбора проб воздуха на исходящей струе определяются в зависимости от схемы проветривания выработки. При сквозном проветривании точка отбора проб выбирается на выходе из камеры, перед сопряжением с вентиляционным штреком. Для тупиковых выработок протяженностью более 30 м место отбора проб загрязненного воздуха выбирается в устье выработки, перед сопряжением с выемочным штреком. Для коротких забоев, проветриваемых за счет диффузии, измерения производятся на выемочном штреке, через 30 м и более после сопряжения с тупиковой камерой. Места отбора проб воздуха в тупиковых рабочих зонах определяются согласно границам рабочих зон, где может протекать газовыделение. Именно поэтому место отбора проб воздуха выбирается на выходе вентиляционной струи из рабочей зоны, в устье тупиковой камеры.

Описанный способ отбора проб и проведения измерений является единственным из используемых при проведении газовых съемок на рудниках ВМКМС. С повышением уровня добычи полезных ископаемых наблюдается увеличение размеров разрабатываемых участков, что влечет за собой удлинение тупиковых очистных выработок. Средняя протяженность таких выработок достигает 200 м, а при подготовке новых панелей и блоков их длина может увеличиваться до 300 м. С ростом длины тупиковой выработки увеличивается площадь и время взаимодействия исходящей струи с окружающими факторами до того, как струя воздуха дойдет до точки отбора проб. Как было отмечено ранее в данной работе, а также в предыдущих исследованиях [13], воздух в процессе продвижения от забоя к устью выработки склонен претерпевать изменения микроклиматических параметров и состава под влиянием свойств горной породы и присутствующих в воздушной среде взвешенных частиц, а также в результате утечек через вентиляционный трубопровод. Поэтому с увеличением протяженности тупиковых выработок увеличивается риск неравномерного распределения и изменения

концентрации газовых примесей в вентиляционной струе по ходу движения от забоя до устья тупиковой камеры.

Лабораторный эксперимент

В проведенных ранее лабораторных исследованиях [12] рассматривалась частичная нейтрализация газовых примесей под влиянием химических свойств минералов, содержавшихся в калийном массиве, как один из факторов, способных влиять на изменение концентрации газа в вентиляционной струе. В указанных исследованиях в качестве поглощаемой смеси (сорбата) использовалась газовая смесь, полученная от случайного источника газовыделения (выхлопные газы ДВС), при этом не учитывались факторы, которые могли косвенно повлиять на процесс их нейтрализации. К таким фактором могли относиться перекрестное влияние дополнительных примесей в выхлопных газах ДВС, а также микроклиматические параметры — температура и влажность газовой смеси. В качестве поглощающего материала (сорбента) в указанном исследовании использовался разрушенный калийный массив случайной массы, состава и фракции, что потенциально могло оказать влияние на интенсивность поглощения.

Одной из частей настоящей работы является проведение лабораторного эксперимента для подтверждения фактора влияния калийного массива на газовую смесь, исключая косвенные аспекты, способные воздействовать на результат. Обеспечивая описанные условия, при эксперименте использовались поверенный стандартный образец газовой смеси с паспортными параметрами в качестве поглощаемой смеси, а также разрушенный калийный массив конкретной фракции, массы и минерального состава во всех образцах.

Для начала эксперимента предварительно подготовлен керн сильвинита (NaCl+KCl), извлеченный из калийного массива продуктивного пласта «АБ» одного из рудников ВМКМС. Средний минеральный состав сильвинитовых руд на данном продуктивном пласте следующий: KCl — 25,5%, NaCl — 68,5%, прочие минералы — 6% и нерастворимый остаток [20]. Полученный керн сильвинита был измельчен до сыпучего состояния и подвергся отсеву на лабораторном сите до фракции 0,25 — 1,00 мм. После чего сыпучая смесь была разбита на образцы массой 70 г и помещена в герметичные сосуды вместе с газовой смесью, для наблюдения за особенностями взаимодействия калийного массива с газовыми компонентами. Компоненты и объемные концентрации сорбируемой газовой смеси, используемой в эксперименте, следующие: водород H_2 — 0,513%, метан CH_4 — 0,505%, диоксид углерода CO_2 — 0,506%, азот N_2 — остальное. Объемная доля влаги в газовой смеси, согласно ГСО 10597-2015, не превышает 0,05% об. В качестве сосудов для помещения сорбента и газовой смеси в одну среду использовались «шприцы Жане» объемом 150 $см^3$ с силиконовыми наконечниками, перекрытыми медицинскими зажимами. Данные сосуды ранее использовались в лабораторных экспериментах, и степень их герметичности описана в работе [15]. Последовательность наполнения сосудов сильвинитом и газовой смесью представлена на рис. 3.

Общее количество сосудов составило 16 шт. Сосуды в количестве 12 шт. были заполнены подготовленным сорбентом и газовой смесью из поверенного стандартного образца. Сорбент и газовая смесь заполняли сосуд в равном объеме — 75 $см^3$. Также дополнительно 4 сосуда заполнялись газовой смесью в полном объеме (без сорбента) и использовались как контрольные для дальнейшего отслеживания доли убегания

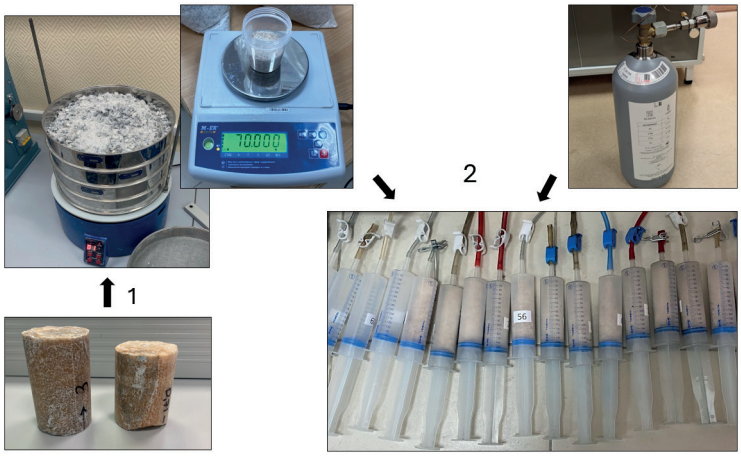

Рис. 3. Последовательность наполнения проб
Fig. 3. Sequence of sample filling

смеси из шприца. После набора газом сосуды были герметично закрыты с помощью зажимов. Стоит подчеркнуть, что в процессе набора сосуда газовой смесью могла возникнуть притечка свежего воздуха или утечка газа, поэтому после наполнения всех сосудов газовой смесью из каждого была отобрана одна проба с последующим анализом на хроматографе для определения начальной концентрации газа в сосуде после его заполнения.

Экспериментальные сосуды были распределены на четыре группы, в каждой из которых было по четыре сосуда, один из которых не содержал сорбент. Наблюдения проводились в течение 9 сут. Отбор проб воздуха из сосудов осуществлялся поэтапно, согласно временному интервалу: через два, пять, семь и де-

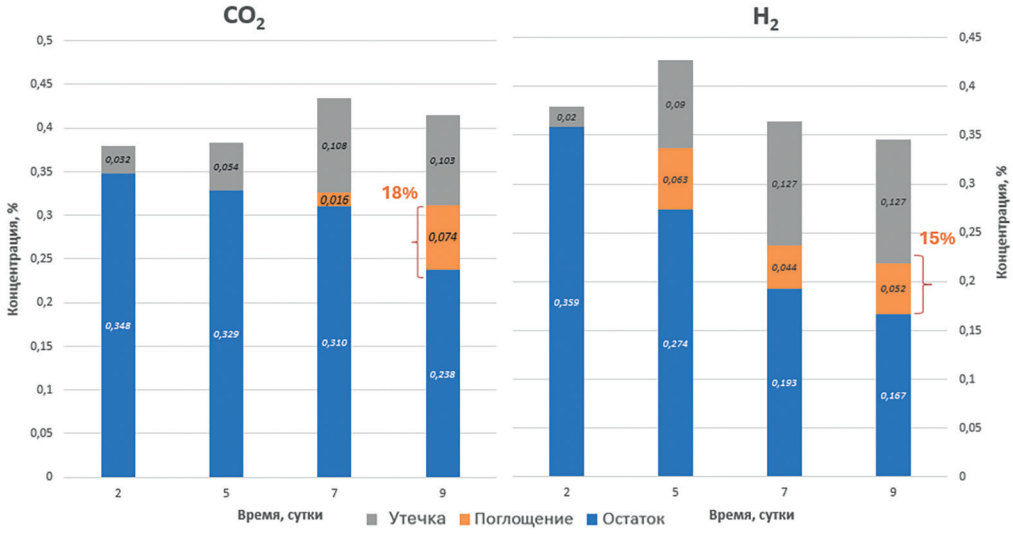

Рис. 4. Изменения средних концентрации газовых примесей в сосудах
Fig. 4. Changes in average concentrations of gas impurities in vessels

вять суток после начала эксперимента. Все группы сосудов были привязаны к определенному дню отбора пробы, при этом последующий анализ проводился с учетом первоначальной концентрации в сосуде. На каждом этапе осуществлялся отбор трех проб воздуха из сосудов, состоящих в соответствующей группе. Из каждого сосуда выполнялось по 3 отбора. Это позволило оценить динамику изменения концентрации газа внутри сосуда в течение девятидневного периода путем усреднения результатов измерений в трех сосудах. Чтобы исключить влияние возможного эффекта утечки газа из сосудов, оценивалась динамика снижения концентрации в контрольных (пустых) сосудах группы.

После отбора проб из сосудов производился хроматографический анализ двух газовых компонентов — диоксида углерода и водорода. Результаты анализа проб воздуха, полученных при каждой выборке, усреднялись и собирались в диаграммы, позволяющие оценить характер изменения концентрации в сосудах за время проведения эксперимента. Результаты представлены на рис. 4.

Значения, отображенные на диаграмме, являются результатом усреднения данных по концентрации, полученной из трех разных образцов, выраженным в процентах. Согласно представленным данным (рис. 4), снижение концентрации газовых примесей в сосудах наблюдается сразу после начала эксперимента. Однако снижение концентрации в сосудах, в случае с диоксидом углерода первые шесть суток, а в случае с водородом первые четверо суток, обусловлено замещением газовых примесей кислородом из атмосферы (утечки).

На седьмые сутки наблюдений, в случае с диоксидом углерода (CO_2), отмечается более интенсивный процесс снижения концентрации газа в сосудах с сорбентом, тогда как в контрольных сосудах (без сорбента) процесс снижения концентрации протекает с неизменной интенсивностью. В случае с водородом (H_2) аналогичный сценарий наблюдается уже на пятые сутки эксперимента. Опираясь на данные, полученные при анализе воздуха из сосудов с сорбентом и контрольных сосудов, можно сказать, что процессы нейтрализации газовых примесей в исследуемых сосудах начинаются спустя 7 сут для диоксида углерода и спустя 5 сут для водорода. Доля поглощения относительно начальной концентрации в шприцах, обработанных на хроматографе спустя 9 сут после их наполнения, составила: для диоксида углерода 18%, для водорода 15%. При этом доля утечек газовой смеси из сосудов с диоксидом углерода составила 25%, а из сосудов с водородом — 36%. Результаты проведенного эксперимента, наряду с данными предыдущих исследований [12, 13], свидетельствуют о том, что среди прочих факторов наблюдаются процессы нейтрализации газовых примесей из воздушной среды, взаимодействующей с калийными солями. В ходе текущих лабораторных экспериментов наблюдалось активное взаимодействие с углекислым газом (CO_2) и водородом (H_2), поэтому далее будет проведена серия измерений концентрации данных газовых компонентов в условиях подземных горных выработок.

Шахтный эксперимент

Эксперимент в шахтных условиях был проведен с использованием апробированной методики, представленной в работе [13]. Серия замеров газа включала в себя по три пробы в трех точках от забоя к устью тупиковой камеры. Эксперимент заключался в отборе проб в начале, середине и конце тупиковой камеры длиной 150 м для анализа изменений концентрации газов во взаимодействии с калийной массивом. Полу-

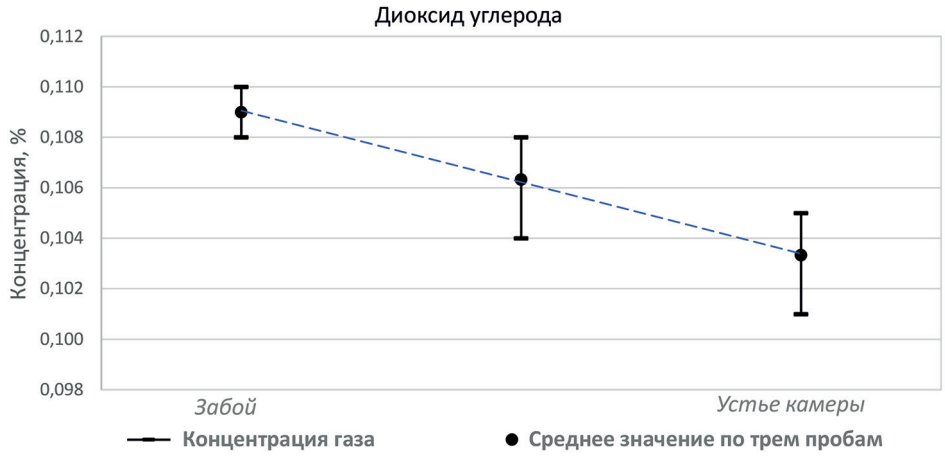

Рис. 5. Изменение концентрации CO_2 от забоя к устью камеры
Fig. 5. Change in CO_2 concentration from face to wellhead

ченные результаты концентраций исследуемых компонентов представлены в виде точечных диаграмм. По средним значениям концентрации каждого компонента нанесены линии тренда. Так, на рис. 5 и 6 представлены значения концентраций диоксида углерода (CO_2) и водорода (H_2), полученные при анализе воздуха, отобранного по всей длине камеры.

Наблюдения за изменением концентрации диоксида углерода и водорода по длине камеры в шахтных условиях также подтверждают снижение концентрации газовых примесей от забоя до устья камеры. Согласно полученным результатам, в тупиковой камере длиной 150 м по пласту Кр-II наблюдается процесс снижения объемной доли исследуемых компонентов в воздухе на 6% для диоксида углерода и на 19% для водорода. Снижение концентрации газовых примесей по длине камеры может быть связано не только с процессами их нейтрализации под влиянием калийного массива или микроклиматических па-

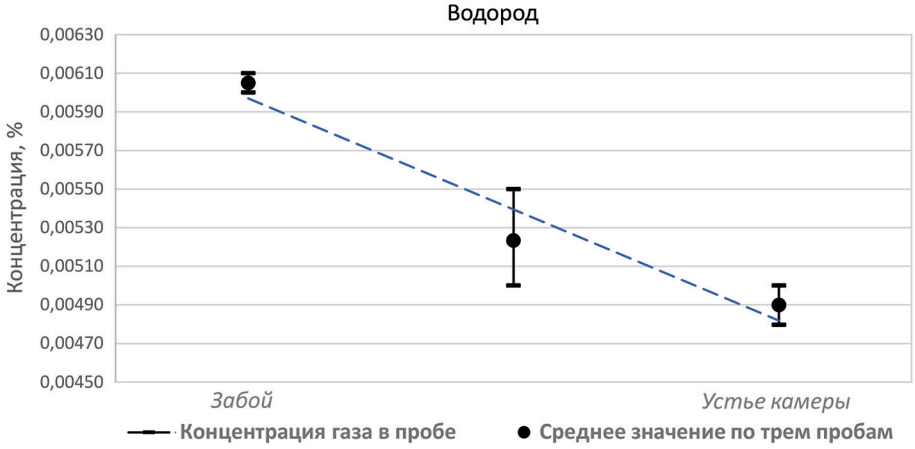

Рис. 6. Изменение концентрации H_2 от забоя к устью камеры
Fig. 6. Change in H_2 concentration from bottomhole to wellhead

раметров воздуха; концентрация газа также подвержена разбавлению за счет поступления свежего воздуха через утечки вентиляционного трубопровода. Для оценки данного параметра во время процедуры отбора проб в тупиковой камере одновременно осуществлялось измерение объемного расхода воздуха, проходящего через точку отбора проб. По результатам замеров, во всех точках отбора проб количество проходящего воздуха не менялось. На фоне общего объема воздуха, проходящего по камере, утечки вентиляционного трубопровода сложно оценить с помощью применяемого оборудования. Количество утечек можно оценить по справочным данным, где коэффициент утечек для применяемого типа трубопровода составляет 1,10.

Измерительная погрешность используемого оборудования на рассматриваемом интервале измерений не выходит за пределы указанного значения. Следовательно, во время проведения эксперимента вклад влияния утечек трубопровода на снижение концентрации диоксида углерода от забоя до устья камеры составил не более чем 10%. Данный параметр играет ключевую роль при анализе динамики снижения диоксида углерода. Что касается водорода, остаточное уменьшение концентрации данного вещества обусловлено совокупностью эффектов адсорбционного взаимодействия и иных физико-химических процессов, исследование которых является перспективным для дальнейших изучений.

Предлагаемая методика

Напомним, что в настоящее время на Верхнекамском месторождении калийных и магниевых солей отбор проб воздуха производится на исходящих струях рабочих зон в устье тупиковых камер перед сопряжением с выемочным штреком. Результаты наблюдений за изменением концентрации газовых примесей по длине тупиковой камеры, представленные в настоящей работе, а также в предыдущих исследованиях [13], говорят о процессах снижения концентрации газовых примесей в вентиляционной струе по ходу ее движения от забоя к устью камеры под влиянием утечек вентиляционного трубопровода и прочих факторов. Результаты лабораторных экспериментов, проведенных в рамках данной работы, а также в работе [12], подтверждают, что на снижение концентрации газовых примесей в атмосфере рабочей зоны могут влиять не только утечки вентиляционного трубопровода и микроклиматические параметры атмосферы, а еще и процессы нейтрализации газовых примесей посредством влияния калийного массива. Увеличение длины камеры способствует повышению доли воздействия процессов нейтрализации, поскольку увеличивается площадь обнажения калийного массива, взаимодействующего со струей воздуха. Предположительная природа данных процессов описывалась ранее, а величина ее влияния на снижение газовых примесей, как и величина влияния утечек вентиляционного трубопровода, рассматривалась в работе [13].

Важно понимать, что отбор проб воздуха на исходящей струе в устье камеры может не отражать реальные концентрации газов, выделившихся от работы добычного оборудования в забое, особенно если речь идет о камерах большой протяженности. Другими словами, отбор проб воздуха, претерпевшего изменение химических параметров, может привести к некорректному определению относительной газообильности, а следовательно, и к неточному расчету требуемого количества воздуха, что может негативно сказаться на безопасности ведения горных работ.

В рамках усовершенствования методики проведения газовых съемок на рудниках ВМКМС предлагается скорректировать способ и место отбора проб для определения концентрации газовых примесей в воздухе рабочих зон с учетом особенностей газового баланса в пределах тупиковых и сквозных камер. Учитывая проведенные исследования, основной идеей является смещение места отбора проб воздуха в призабойную зону, где ведутся работы, связанные с отбойкой руды. Выполнение замеров и отбор проб у основного источника газовыделения в пределах рабочей зоны позволит отчетливо понимать, какое количество воздуха необходимо доставлять в забой для разбавления газовых примесей, выделившихся при разрушении калийного массива, и определять максимально возможную концентрацию газовых примесей без воздействия на нее фактора утечек воздуха, обнаженного калийного массива и прочих факторов. Таким образом, предлагается перенести точку отбора проб загрязненного воздуха от устья камеры в призабойное пространство, где ведутся горные работы (очистные работы, подготовительные работы и работы по бурению скважин), после проветривания рабочей зоны по ходу движения вентиляционной струи, но не ближе 20 м к добычному оборудованию, чего требуют правила безопасности. В тупиковой камере отставание точки отбора проб от среза вентиляционного трубопровода должно составлять не менее чем 10 м, с устойчивым движением вентиляционной струи, чтобы избежать подмешивания свежего воздуха в пробоотборник. Принципиальные места отбора проб для тупиковой камеры и сквозной рабочей зоны приведены на рис. 7. В коротких тупиковых выработках менее 20 м, где указанные условия невыполнимы, отбор проб воздуха производится в выработках, сопряженных с тупиковой камерой, при соблюдении аналогичных условий.

Отбор воздушных проб в рабочих зонах рекомендуется осуществлять исключительно в период активного протекания технологических операций, связанных с процессом отбойки рудной

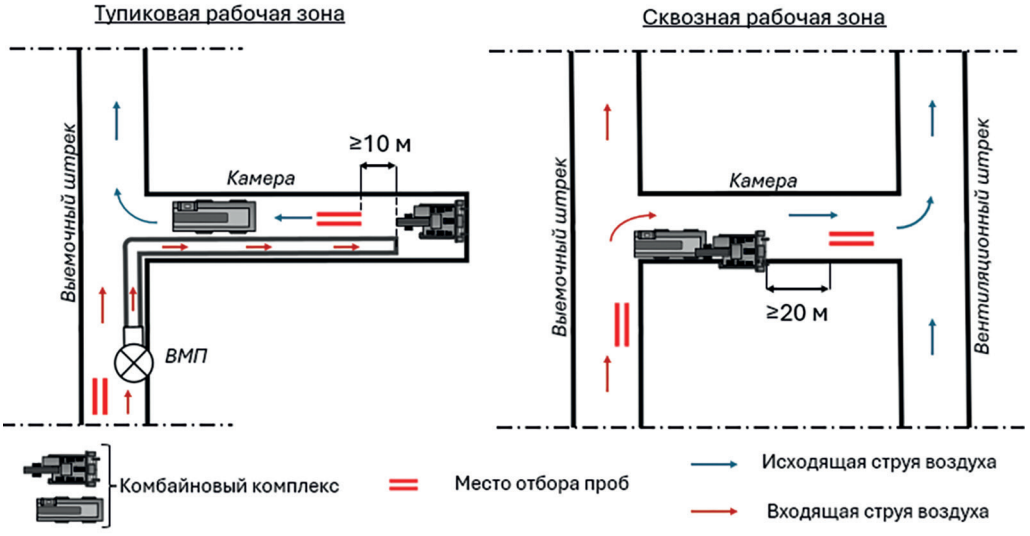

Рис. 7. Места отбора проб воздуха
Fig. 7. Air sampling locations

массы либо осуществления буровых работ. В отношении рабочих зон, оснащенных комбайновыми комплексами, процедура отбора должна сопровождаться обязательной фиксацией фактической производительности добычного оборудования.

При отборе проб рудничного воздуха для определения концентрации нерастворимых газовых примесей: метана (CH_4), углеводородов метанового ряда (C_nH_n), двухатомного водорода (H_2), оксида углерода (CO), диоксида углерода (CO_2) и кислорода (O_2), кроме «мокрого способа» отбора проб в стеклянные бутыли с резиновой пробкой могут использоваться лабораторные шприцы или резиновые камеры. Отбор проб рудничного воздуха на определение сероводорода (H_2S) производится в заранее подготовленные медицинские шприцы емкостью 0,015 дм^3 с поглотительным раствором в объеме 7,0 см^3 (рис. 8).

При отборе проб рудничного воздуха для контроля параллельно производятся измерения многокомпонентным переносным газоанализатором по соответствующей методике. Обработка и оформление результатов анализа проб рудничного воздуха выполняется в соответствии с методикой измерений объемной доли приводимых газовых примесей хроматографическим методом МВИ Хромос 01-2019, разработанной с учетом требований ГОСТов и «Правил безопасности».

Испытание предлагаемого подхода

Для проверки предложенной методики был проведен ряд наблюдений на одном из рудников ВМКМС. В рабочих зонах тупиковых камер длиной от 140 до 180 м выполнялся параллельный отбор проб рудничного воздуха в устье камеры и непосредственно в месте производства работ, согласно предлагаемой методике. Отбор проб воздуха выполнялся с измерениями расхода воздуха, проходящего через место отбора, и во время работы добычного оборудования. Для осуществления замеров было ото-

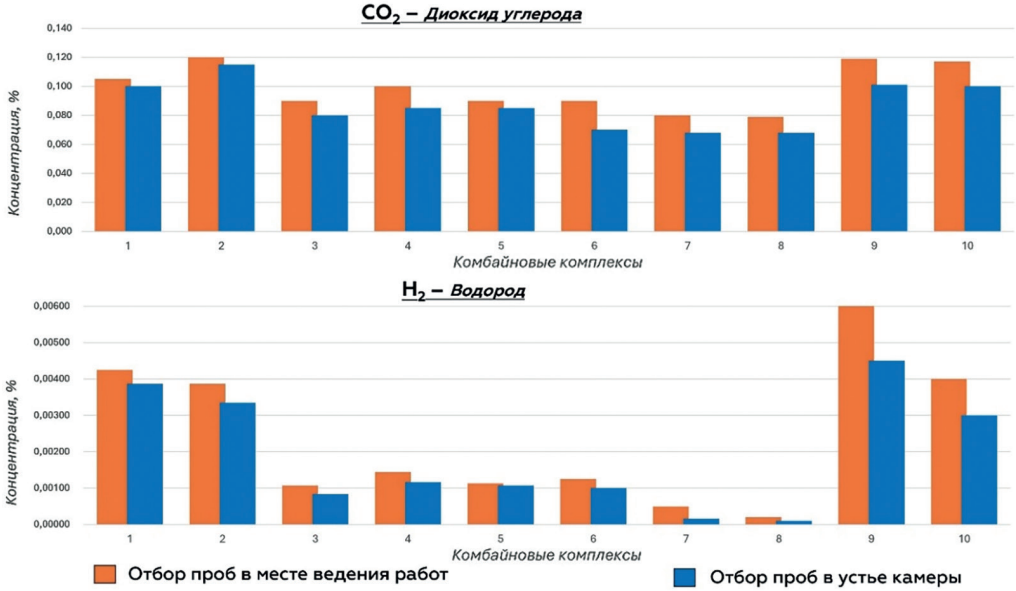

Рис. 8. Концентрация газа в месте ведения работ и в устье камеры
Fig. 8. Gas concentration at the work site and at the wellhead of the chamber

брано десять добычных рабочих зон пласта Кр-II, оснащенных однотипными комбайновыми комплексами «Урал-61» с идентичными показателями производительности и однотипным вспомогательным оборудованием. Отобранные пробы были подвергнуты анализу с использованием газовой хроматографии в течение 24 ч после их отбора. Результаты концентрации газовых примесей для каждой рабочей зоны в устье камеры и в месте производства работ представлены на диаграммах (см. рис. 8). Для соотнесения результатов с предыдущими наблюдениями в данной работе, на диаграмму вынесены газовые компоненты, которые рассматривались в лабораторном и шахтном экспериментах ранее — диоксид углерода и двухатомный водород.

Результаты одновременного отбора проб рудничного воздуха в устье камеры и у места проведения работ показывают, что во всех исследуемых рабочих зонах концентрация газа в устье камеры ниже, чем в призабойном пространстве вблизи ведения горных работ. Доля снижения концентрации во всех рабочих зонах различается. Средний показатель снижения концентрации составил 12%.

На основании результатов проведенного лабораторного исследования установлено, что находящуюся в контакте с воздухом обнаженную поверхность калийного массива допустимо квалифицировать в качестве фактора, оказывающего воздействие на состав шахтной атмосферы. Тем не менее, процессы нейтрализации газообразных компонентов характеризуются низкой скоростью, вследствие чего изменения концентрации газовых примесей в воздушной среде наблюдаются лишь по истечении временного интервала продолжительностью от пяти суток и более. В шахтных же условиях прохождение воздуха с момента насыщения его газовыми примесями в призабойном пространстве до устья камеры протекает весьма скоротечно, для того чтобы данный фактор в заметной мере повлиял на состав воздуха в пределах рабочих зон. Таким образом, обнаженный калийный массив оказывает влияние на состав рудничной атмосферы в пределах рабочих зон, однако этот фактор не является преобладающим.

Наблюдаемая тенденция к снижению газовых примесей в вентиляционной струе по ходу ее движения в рабочей зоне характеризуется комплексным влиянием на нее калийного массива и вероятного фактора утечек вентиляционного трубопровода, а также может быть связана с наличием в рабочей зоне соляного аэрозоля, образующегося в результате ведения горных работ, связанных с отбойкой руды.

Массовая концентрация соляной пыли в атмосфере рабочей зоны может изменяться в зависимости от производительности комбайнового комплекса и интенсивности проветривания. Моно- или полимолекулярный слой воды на аэрозольных частицах способен сорбировать молекулы газа. Влияние данного фактора может быть существенным ввиду того, что даже при низких концентрациях пыли (5 мг/м^3) суммарная площадь поверхности пылевых частиц в горной выработке сопоставима с площадью боковой поверхности выработки. Этот фактор подлежит дальнейшему изучению авторами в рамках исследований по данной тематике.

Влияние утечек вентиляционного трубопровода на снижение концентрации газовых примесей в вентиляционной струе по ходу ее движения в контексте данной работы оценить достаточно сложно, так как при отборе проб количество воздуха в устье камеры и у места проведения работ было в пределах абсолютной погрешности анемометра,

используемого для замера скорости воздуха. Учитывая, что при испытании выбирались камеры схожей длины, оснащенные идентичными вентиляторами и вентиляционными трубопроводами, можно сказать, что величина утечек воздуха во всех исследуемых рабочих зонах была сопоставима. Тем не менее, степень снижения концентрации газовых примесей во всех представленных камерах варьировалась. Таким образом, можно констатировать, что утечки вентиляционного трубопровода также могут играть роль при снижении концентрации газовых примесей в воздухе в пределах рабочей зоны, однако этот эффект проявляется в сочетании с вышеописанными факторами, суммарно приводя к ощутимому снижению концентрации.

Заключение

Настоящая работа посвящена совершенствованию метода отбора проб рудничного воздуха на рудниках Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей (ВМКМС), направленного на оценку уровня относительной газообильности по горючим и токсичным компонентам, посредством методик газовой хроматографии и фотоколориметрического анализа с последующим расчетом необходимого объема вентиляционного воздуха. В ходе проведенного исследования был осуществлен анализ существующих методов отбора проб рудничного воздуха для определения относительной газообильности, в результате которого были выявлены их основные недостатки. Серия экспериментальных исследований была проведена как в лабораторных, так и в натурных (шахтных) условиях с целью детального изучения закономерностей распределения газов внутри производственных участков горнодобывающих предприятий и выявления ключевых факторов, оказывающих влияние на точность определения химического состава рудничной атмосферы, посредством анализа соответствующих проб газа.

В рамках проведенного лабораторного исследования зафиксирован факт нейтрализации газообразных примесей из воздушной среды, взаимодействующей с калийными солями. Установлен промежуток времени, который требуется на запуск процессов поглощения газовых примесей калийным массивом. Процент поглощения по отношению к первоначальной концентрации в исследуемых сосудах, подвергнутых обработке на хроматографе через девять дней после заполнения, составил: для углекислого газа 18%, для водорода 15%. При этом также оценены потери газовой смеси за счет утечек по причине негерметичности сосуда. При проведении шахтного эксперимента в тупиковой камере длиной 150 м зафиксировано уменьшение массовой концентрации диоксида углерода (CO_2) на 6% и водорода (H_2) на 19%.

Установлено, что обнаженный калийный массив оказывает умеренное воздействие на химический состав рудничного воздуха в границах эксплуатационных участков, не являясь доминирующим фактором формирования рудничной атмосферы в пределах рабочих зон. Закономерность снижения концентрации газообразных компонентов по мере продвижения вентиляционной струи от забоя до устья камеры обусловлена совокупностью факторов, включающих диффузионное взаимодействие с поверхностью калийного массива, потенциальную возможность снижения концентрации газа вследствие утечек вентиляционного трубопровода, а также присутствие в рабочем пространстве солевого аэрозоля, генерируемого технологическими процессами добычи полезного ископаемого, что представ-

ляет собой важную сферу исследования в контексте рассматриваемой тематики.

На основе экспериментальных данных, полученных в ходе настоящей работы, разработана методика отбора проб рудничного воздуха для определения относительной газообильности в рабочих зонах подземных выработок. Методика учитывает специфику пространственного распределения газовых компонентов и физико-химических процессов, протекающих в рабочих зонах калийных рудников Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей (ВМКМС). Для оценки эффективности предложенной методики выполнено ее апробирование в условиях действующих очистных и подготовительных участков калийного рудника с применением различных методов отбора воздушных проб.

В дальнейшем планируется продолжение исследований с помощью предложенного метода для накопления объема статистических данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.

2. *Seifi C., Schulze M., Zimmermann J.* Solution procedures for block selection and sequencing in flat-bedded potash underground mines // OR spectrum. 2021, vol. 43, no. 2, pp. 409—440. DOI: 10.1007/s00291-021-00618-z.

3. *Бутузов Д. М.* Компонентный состав свободных газов соляных пород Верхнекамского месторождения калийных солей // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. — 2016. — № 1. — С. 238—240.

4. *Кузьминых Е. Г.*, *Левин Л. Ю.*, *Мальцев С. В.* Распределение продуктов выхлопных газов техники с двигателями внутреннего сгорания в шахтной вентиляционной сети // Горное эхо. — 2023. — № 2. — С. 96—103. DOI: 10.7242/ echo.2023.2.17.

5. *Левин Л. Ю.*, *Суханов А. Е.*, *Исаевич А. Г.* Увеличение энергоэффективности систем вентиляции калийных рудников путем реализации последовательного проветривания камер служебного назначения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 4. — С. 93—106. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_93.

6. *Трушкова Н. А.*, *Бублик С. А.* Расчет распространения газовых примесей в горных выработках на основе модели конвективно-диффузионного переноса // Горное эхо. — 2021. — № 3. — С. 110—117. DOI: 10.7242/echo.2021.3.20.

7. *Качурин Н. М.*, *Мохначук И. И.*, *Поздеев А. А.* Математические модели аэрогазодинамических процессов на очистных участках шахт и рудников // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. — 2013. — № 1. — С. 267—276.

8. *Zimmer M., Strauch B., Zirkler A., Niedermann S., Vieth-Hillebrand A.* Origin and evolution of gas in salt beds of a potash mine // Advances in Geosciences. 2020, vol. 54, pp. 15—21. DOI: 10.5194/ adgeo-54-15-2020.

9. *Качурин Н. М.*, *Поздеев А. А.*, *Стась Г. В.*, *Власов Д. В.* Поглощение кислорода поверхностями обнажения горного массива в очистных камерах рудников // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2012. — № 8. — С. 301—307.

10. *Feng Du, Kai Wang, Xiang Zhang, Chengpeng Xin, Longyong Shu, Gongda Wang* Experimental study of coal—gas outburst: Insights from coal—rock structure, gas pressure and adsorptivity // Natural Resources Research. 2020, vol. 29, pp. 2481—2493. DOI: 10.1007/s11053-020-09621-7.

11. *Warren-Monday J.* Gases in evaporites: Part 1 — Rockbursts and gassy outbursts / Salty Matt. 2016, pp. 1—10. DOI: 10.1007/s00603-022-02955-z.

12. *Суханов А. Е.*, *Бруев Н. А.*, *Газизуллин Р. Р.*, *Стариков А. Н.* Исследование сорбционных свойств солей на примере газов, содержащихся в атмосфере калийных рудников // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2023. — № 1. — С. 495—507.

13. *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.

14. *Манжос Ю. В.*, *Ошовский В. В.*, *Ашихмин В. Д.*, *Чикунов А. В.* К определению объема утечек воздуха в гибких вентиляционных трубопроводах // Проблемы горного давления. — 2015. — № 1. — С. 69—81.

15. *Стариков А. Н.*, *Мальцев С. В.*, *Исаевич А. Г.* Совершенствование подхода к определению относительной газообильности рабочих зон рудников Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 9. — С. 99—113. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_99.

16. *Hardcastle S. G.*, *Kocsis C. K.* The ventilation challenge—A Canadian perspective on maintaining a good working environment in deep mines / Proceedings of the First International Seminar on Deep and High Stress Mining, Australian Centre for Geomechanics, Perth, Western Australia, 2002, pp. 4—9. DOI: 10.36487/ACG_rep/1410_0.3.

17. *Chandra N., Patra P. K., Bisht J. S., Ito A., Umezawa T., Saigusa N.* Emissions from the oil and gas sectors, coal mining and ruminant farming drive methane growth over the past three decades // Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II. 2021, vol. 99, no. 2, pp. 309—337. DOI: 10.2151/jmsj.2021-015.

18. *Luo G.* Calculation of required air volume and verification of ventilation capacity for mines // Frontiers in Computing and Intelligent Systems. 2023, vol. 4, no. 2, pp. 119—123. DOI: 10.54097/fcis.v4i2.10368.

19. *Kholod N., Evans M., Pilcher R. C., Roshchanka V., Ruiz F., Coté M., Collings R.* Global methane emissions from coal mining continue growing even with declining coal production // Journal of Cleaner Production. 2020, vol. 256, article 120489. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120489.

20. *Черный К. А.*, *Файнбург Г. З.* Использование сильвинита Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей для повышения качества воздушной среды и уровня ее ионизации // Недропользование. — 2016. — Т. 15. — № 19. — С. 185—192. МИАБ

REFERENCES

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

2. Seifi C., Schulze M., Zimmermann J. Solution procedures for block selection and sequencing in flat-bedded potash underground mines. *OR spectrum*. 2021, vol. 43, no. 2, pp. 409—440. DOI: 10.1007/s00291-021-00618-z.

3. Butuzov D. M. Component composition of free gases in saline rocks of Verkhnekamskoye potassium salt deposit. *Problemy razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh*. 2016, no. 1, pp. 238—240. [In Russ].

4. Kuzminykh E. G., Levin L. Yu., Mal'tsev S. V. Distribution of exhaust gas products from internal combustion engine vehicles in mine ventilation network. *Gornoe ekho*. 2023, no. 2, pp. 96—103. [In Russ]. DOI: 10.7242/ echo.2023.2.17.

5. Levin L. Y., Sukhanov A. E., Isaevich A. G. Enhanced energy efficiency of ventilation in potash mines by means of sequential airing of service rooms. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 4, pp. 93—106. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_93.

6. Trushkova N. A., Bublik S. A. Calculation of gas impurity propagation in mine workings based on convective-diffusion transfer model. *Gornoe ekho*. 2021, no. 3, pp. 110—117. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2021.3.20.

7. Kachurin N. M., Mohnachuk I. I., Pozdeev A. A. Mathematical models of aerogasodynamic processes in mining faces of mines and pits. *Izvestiya Tula State University. Natural sciences*. 2013, no. 1, pp. 267—276. [In Russ].

8. Zimmer M., Strauch B., Zirkler A., Niedermann S., Vieth-Hillebrand A. Origin and evolution of gas in salt beds of a potash mine. *Advances in Geosciences*. 2020, vol. 54, pp. 15—21. DOI: 10.5194/adgeo-54-15-2020.

9. Kachurin N. M., Pozdeev A. A., Stas' G. V., Vlasov D. V. Oxygen absorption by surfaces exposed in stoping chambers of mines. *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*. 2012, no. 8, pp. 301—307. [In Russ].

10. Feng Du, Kai Wang, Xiang Zhang, Chengpeng Xin, Longyong Shu, Gongda Wang. Experimental study of coal—gas outburst: Insights from coal—rock structure, gas pressure and adsorptivity. *Natural Resources Research*. 2020, vol. 29, pp. 2481—2493. DOI: 10.1007/s11053-020-09621-7.

11. Warren-Monday J. Gases in evaporites: Part 1 — Rockbursts and gassy outbursts. *Salty Matt.* 2016, pp. 1—10. DOI: 10.1007/s00603-022-02955-z.
12. Sukhanov A. E., Bruyev N. A., Gazizullin R. R., Starikov A. N. Study of sorption properties of salts using gases contained in the atmosphere of potash mines. *News of the Tula state university. Sciences of Earth.* 2023, no. 1, pp. 495—507. [In Russ].
13. Starikov A. N., Mal'tsev S. V., Sukhanov A. E. Influence of sorption properties of potassium salts on gas conditions 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.
14. Manzhos Yu. V., Oshovskiy V. V., Ashikhmin V. D., Chikunov A. V. On determination of air leakage volume in flexible ventilation ducts. *Problemy gornogo davleniya.* 2015, no. 1, pp. 69—81. [In Russ].
15. Starikov A. N., Maltsev S. V., Isaevich A. G. Improved approach to determination of relative gas content in operating spaces in mines at the Upper Kama potassium and magnesium salt deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 9, pp. 99—113. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_99.
16. Hardcastle S. G., Kocsis C. K. The ventilation challenge — A Canadian perspective on maintaining a good working environment in deep mines. *Proceedings of the First International Seminar on Deep and High Stress Mining*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, Western Australia, 2002, pp. 4—9. DOI: 10.36487/ACG_rep/1410_0.3.
17. Chandra N., Patra P. K., Bisht J. S., Ito A., Umezawa T., Saigusa N. Emissions from the oil and gas sectors, coal mining and ruminant farming drive methane growth over the past three decades. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II.* 2021, vol. 99, no. 2, pp. 309—337. DOI: 10.2151/jmsj.2021-015.
18. Luo G. Calculation of required air volume and verification of ventilation capacity for mines. *Frontiers in Computing and Intelligent Systems.* 2023, vol. 4, no. 2, pp. 119—123. DOI: 10.54097/fcis.v4i2.10368.
19. Kholod N., Evans M., Pilcher R. C., Roshchanka V., Ruiz F., Coté M., Collings R. Global methane emissions from coal mining continue growing even with declining coal production. *Journal of Cleaner Production.* 2020, vol. 256, article 120489. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120489.
20. Chernyy K. A., Faynburg G. Z. Use of sylvinite dedicated to Verkhnekamskoe field of potash and magnesium to increase quality and ionization of air environment. *Subsoil Management.* 2016, vol. 15, no. 19, pp. 185—192. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Стариков Алексей Николаевич[1] — инженер,
e-mail: starikov4488@mail.ru,
Левин Лев Юрьевич[1] — член-корреспондент РАН,
д-р техн. наук, заведующий отделом, e-mail: aerolog_lev@mail.ru,
Мальцев Станислав Владимирович[1] — канд. техн. наук,
заведующий сектором, e-mail: stasmalcev32@gmail.com,
[1] Горный институт Уральского отделения РАН — филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения РАН (ГИ УрО РАН).
Для контактов: Стариков А.Н., e-mail: starikov4488@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.N. Starikov[1], Engineer, e-mail: starikov4488@mail.ru,
L.Yu. Levin[1], Corresponding Member of Russian Academy of Sciences,
Dr. Sci. (Eng.), Head of Department, e-mail: aerolog_lev@mail.ru,
S.V. Maltsev[1], Cand. Sci. (Eng.), Head of Sector, e-mail: stasmalcev32@gmail.com,
[1] Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Perm, 614000, Russia.
Corresponding author: A.N. Starikov, e-mail: starikov4488@mail.ru.

Получена редакцией 14.05.2025; получена после рецензии 30.07.2025; принята к печати 10.01.2026.
Received by the editors 14.05.2025; received after the review 30.07.2025; accepted for printing 10.01.2026.