

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДХОДА К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ГАЗООБИЛЬНОСТИ РАБОЧИХ ЗОН РУДНИКОВ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ И МАГНИЕВЫХ СОЛЕЙ

А.Н. Стариков¹, С.В. Мальцев¹, А.Г. Исаевич¹

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

Аннотация: Предложен новый подход к определению относительной газообильности рабочих зон калийных рудников Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей. Он рассмотрен с условием учета влияния различных факторов технологического процесса добычного оборудования при добыче полезного ископаемого в подземных горных выработках. Предложен способ определения коэффициента неравномерности газовыделения несколькими путями, в том числе с помощью методов статистической обработки. Выполнены натурные замеры в подземных горных выработках калийного рудника для определения величины неравномерности газовыделения из массива. Значения относительной газообильности рабочих зон, определенные в ходе газовой съемки, рассчитаны с применением существующего и предложенного подходов. Оценена применимость предложенного подхода в условиях реального рудника. Основной идеей нового, предлагаемого подхода к расчету относительной газообильности является снижение возможных рисков получаемой погрешности при отборе проб и дальнейшем расчете относительной газообильности по средним (во времени) значениям концентрации, в условиях цикличности работы комбайнового комплекса и, как следствие, интенсивности газовыделения. Применение нового подхода также приведет к повышению точности определяемых значений необходимого количества воздуха для проветривания рабочих зон рудников Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей.

Ключевые слова: рудник, газовый режим, рудничная атмосфера, рудничная вентиляция, отбор проб, относительная газообильность, концентрация газа, неравномерность газовыделения, газовая съемка, рабочая зона, рудничный воздух, газовый состав, формула определения относительной газообильности, концентрация метана, концентрация сероводорода.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (рег. номер 122012000396-6).

Для цитирования: 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.

Improved approach to determination of relative gas content in operating spaces in mines at the Upper Kama potassium and magnesium salt deposit

A.N. Starikov¹, S.V. Maltsev¹, A.G. Isaevich¹

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

Abstract: The article proposes a new approach to determining gas content in operating spaces in mines at the Upper Kama deposit of potassium and magnesium salts. The approach takes into account various effects of process flows and equipment in underground mineral mining. It is proposed to determine the gas emission irregularity ratio by a few ways, including the methods of statistical processing. In-situ measurements are performed in potassium mine roadways to determine the irregularity value of gas emission from rock mass. The relative gas contents are determined during gas surveying and are calculated using the existing techniques and the new approach. The applicability of the proposed approach is estimated as a case-study of a real mine. The main concept of the new approach to the relative gas content calculation is the reduction of the possible error in sampling and subsequent calculation of gas content using the time-average concentration and gas emission rate under conditions of cyclic operation of cutting-loading machine systems. The new approach can improve accuracy in determination of the required amount of air to ventilate operating spaces in mines of the Upper Kama potassium and magnesium salt deposit.

Key words: mine, gas conditions, mine air, mine ventilation, sampling, relative gas content, gas concentration, gas emission irregularity, gas surveying, operating space, underground air, gas composition, relative gas content formula, methane concentration, hydrogen sulfide concentration.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under State Contract No. 075-03-2021-374 dated 29 December 2020, Registration Number 122012000396-6.

For citation: 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;(9):99-113. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_99.

Введение

На рудниках Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей (ВМКМС) ведется добыча сильвинитовой руды комбайновым способом. Калийные месторождения по своему типу относятся к осадочным [1]. Разработка данных месторождений чаще всего сопровождается выделением природных газов, содержащихся в продуктивных пла-

стах и междупластьях. Скопление газа в калийных пластах и вмещающих породах представляют собой природные опасности и приводят к осложнениям при ведении горных работ [2]. Такие условия требуют обеспечения особого контроля газовой обстановки в рабочих зонах и на руднике в целом. Многочисленными исследованиями установлено, что в горных породах ВМКМС содержатся при-

родные газы сложного состава, такие как инертные — азот, аргон, из числа горючих и взрывоопасных — метан, водород и предельные углеводороды, а также токсичные — сероводород, сернистый газ и прочие [3].

В соответствии с «Правилами безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» шахты, на которых обнаружено (или по геологическим данным прогнозируется) выделение горючих или ядовитых газов, должны иметь заключение специализированного института о составе, масштабе, местах и характере выделения газов. Для этого на рудниках ВМКМС проводятся ежегодные газовые съемки, ключевым результатом которых является оценка газообильности рабочих зон комбайновых комплексов.

В литературе по рудничной вентиляции различают абсолютную газообильность, которая определяется дебетом газа, выделившегося в единицу времени, и относительную газообильность — объем газа, выделившегося при добыче (разрушении) 1 т полезного ископаемого. Другими словами, понятие газообильности используют для оценки опасности шахт и рудников по газовому фактору.

Полученные значения газообильности в результате проведения газовой съемки используются не только как показатель газовыделения при оценке опасности по газу рабочих зон и рудника в целом; в задачах проветривания рудника значения газообильности, определенные в ходе газовой съемки, используются при расчете количества воздуха, необходимого для разбавления газов в рабочих зонах рудника, и выборе наиболее эффективного способа проветривания тупиковой выработки [4], а также при разработке комплекса мероприятий, совокупность которых называется «газовым режимом».

Расчет количества воздуха по «газовому» фактору выполняется с целью определения требуемого количества воздуха для постоянного проветривания свежей струей воздуха [5] призабойного пространства выработки (места, где размещено действующее оборудование и находятся постоянные рабочие места) от выделяющихся газов в процессе работы добычного оборудования.

При известной (определенной в ходе газовой съемки) относительной газообильности соответствующих газов расчет количества воздуха для рабочей зоны выполняется по следующей формуле:

$$Q_3 = \frac{100 \times q \times J}{(C - C_0)}, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (1)$$

где q — относительная газообильность выработок рабочей зоны по соответствующим газам, м³/т; J — производительность комбайна, т/мин; C — предельно допустимая концентрация соответствующих газов, %; C_0 — концентрация соответствующих газов в рудничном воздухе, поступающем к забою, %.

На угольных шахтах наиболее распространены и намного более интенсивны выходы метана и углекислого газа из массива [6], поэтому под газообильностью шахт на отечественных и зарубежных угольных месторождениях обычно подразумевают углекислотообильность и метанообильность выработок [7]. Значения относительной метанообильности на угольных шахтах применяются для прогноза проектируемых шахт или новых участков действующих шахт. Величина абсолютной метанообильности помогает определить количество воздуха, которое должно подаваться для разбавления выделяющихся вредных примесей до концентраций ниже предельно допустимых, надлежащего проветривания выработок в шахте и безопасного ведения горных работ [8]. Для определения абсолютной метанообильности не-

обходимо знать среднее содержание метана в исходящей струе шахты (n , %) и объем воздуха, проходящий по выработке, где был произведен замер концентрации (V , м³/мин). Формула для расчета абсолютной метанообильности следующая:

$$Q = \frac{n}{100} \times V \times 1440, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (2)$$

где 1440 — количество минут в одних сутках.

Поскольку на калийных рудниках ВМКМС интенсивность газовыделений значительно ниже, чем на угольных шахтах [9], а основная часть газовыделений происходит непосредственно при разрушении массива, определяющим фактором при расчете количества воздуха и отнесении рабочих зон к группам опасности служит значение относительной газообильности. В условиях калийных рудников при определении значения относительной газообильности, как отмечалось ранее, оценивается объем выделившегося газа при разрушении 1 т массива горных пород, м³/т.

Согласно «Специальным мероприятиям», отбор проб рудничного воздуха и расчет относительной газообильности на калийных рудниках ВМКМС выполняется следующим образом:

- определяется количество горючих газов, проходящих через точку замера (I_i):

$$I_i = 0,01 \times Q \times C, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (3)$$

где Q — расход воздуха в пункте замера, м³/мин; C — концентрация условного метана в воздухе, % по объему;

- определяется среднее количество газа, проходящего по выработке (I_{cp}):

$$I_{cp} = \sum I_i / n, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (4)$$

где n — число проб воздуха для исходящей струи, $n = 3$;

- определяется относительная газообильность данной рабочей зоны по формуле

$$g = 180 \times (I_{cp.исх} - I_{св}) / \sum A, \text{ м}^3/\text{т}, \quad (5)$$

где $\sum A$ — суммарное количество руды, отбитое комбайновым комплексом в течение 3 ч, когда производились замеры, т; $I_{cp.исх}$ — среднее количество газа, проходящего по выработке на исходящей струе, м³/мин; $I_{св}$ — количество газа, проходящего по выработке на свежей струе, м³/мин.

При расчете по указанным формулам концентрация должна приниматься в «%» по объему. Если замеры концентрации проводятся в «%» НКПР, тогда при расчете 1% НКПР = 0,05% по объему.

Для определения концентрации газа в выработке, согласно методике отбора проб рудничного воздуха, используется «мокрый способ» отбора проб (метод вытеснения). Также на рудниках ВМКМС применяются альтернативные способы отбора проб, не уступающие «мокрому способу» в показателях надежности хранения, выборки и транспортировки пробы. Эти методы отбора позволяют определить нерастворимые и не взаимодействующие с водой газовые компоненты: метан, углеводороды метанового ряда $C_n H_{n+2}$, водород, кислород, оксид и диоксид углерода.

Анализ недостатков

Прежде всего, необходимо понимать, что определение относительной газообильности для задач проветривания рабочих зон рудника и для оценки количества газа, выделяющегося в руднике, — это разные задачи. В первом случае необходимо определить максимальную концентрацию газа, которая может выделиться в рабочей зоне, а в случае оценки газовыделения — среднее значение количества газа, отнесенное ко времени [10]. Использование общей формулы для определения газообильности при решении таких разных задач не дает возможности учета всех особенно-

стей производственного процесса, которые впоследствии могут повлиять на расчет требуемого количества воздуха.

Учитывая многолетний опыт проведения газовых съемок, наблюдения за особенностями технологических процессов добычного оборудования и проветривания рабочих зон, стал актуальным вопрос рассмотрения возможности разделения формулы расчета показателя относительной газообильности в зависимости от его назначения. В данной работе рассмотрена возможность смены подхода к определению относительной газообильности, используемой для решения задач вентиляции и расчета количества воздуха для проветривания рабочих зон на рудниках ВМКМС.

В классической формуле временной интервал проведения замеров определяется как 180 мин. Согласно методике проведения газовой съемки, необходимо сделать не менее трех проб (n) рудничного воздуха, затем определить среднее количество газа, проходящее по выработке за время проведения замеров. После чего произведение показателя среднего количества газа ($I_{\text{ср.исх}}$) и времени, за которое были взяты пробы (180 мин), разделить на суммарное количество отбитой руды за время проведения заме-

ров в исследуемой рабочей зоне (ΣA). При таком подходе к определению относительной газообильности нет гарантий, что при отборе проб в рабочей зоне будут учтены максимальные (пиковые) значения концентрации выделенного газа, что очень важно для условий проветривания рабочей зоны.

Отсутствие таких гарантий связано с тем, что на рудниках ВМКМС работа добычного оборудования, а именно комбайнового комплекса, весьма сложный циклический процесс [11], который включает в себя комплекс задач, таких как работа самого очистного комбайна, работа самоходного вагона, осуществляющего доставку руды от комбайна до рудоспускной скважины, работа ленточных конвейеров, настройка вентиляции добычного забоя, работа маркшейдерской службы, регулярная «перепитка» ввиду увеличения удаленности комплекса от подстанции, геологические особенности и прочее [12]. Все эти факторы не дают возможности прогнозировать режим работы добычного оборудования в течение смены, а также обеспечить непрерывную работу в течение всего времени отбора проб.

Для примера на рис. 1 представлен режим времени работы комбайнового

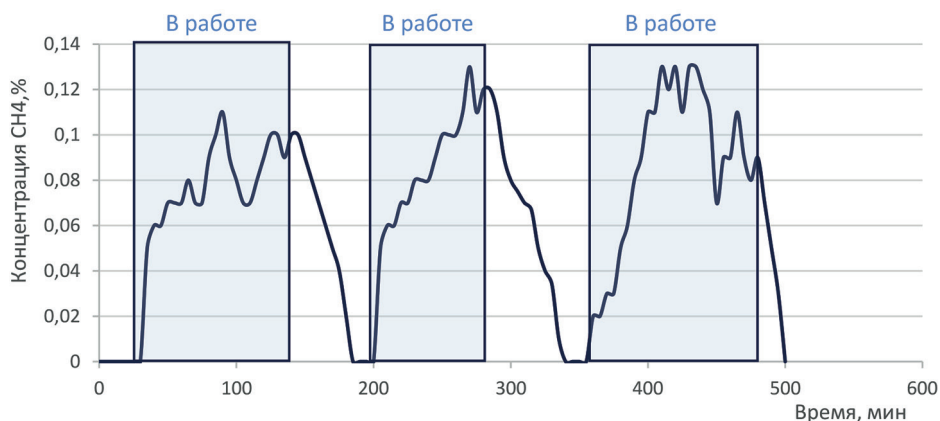


Рис. 1. Время работы комбайна в течение смены
Fig. 1. The time of combine during the shift

комплекса в течение одной из обычных смен реальной рабочей зоны рудника БКПРУ-4 ПАО «Уралкалий» и условный график выделения газа.

Выше было отмечено, что согласно действующей методике для определения относительной газообильности определяется средний объем газа, проходящего по выработке путем равномерного отбора проб ($n \geq 3$) за время проведения замеров (180 мин). Но в условиях цикличности режима работы комбайнового комплекса в рабочей зоне (см. рис. 1) при определении среднего объема газа за 180 мин существует вероятность снижения значения средней концентрации, если часть проб воздуха будут отобраны во время простоя комбайнового комплекса. Если поместить точки времени отбора проб на приведенный график выделения газа в рабочей зоне (рис. 2), можно увидеть, что равномерный отбор проб во времени не учитывает максимальные значения, следовательно, при определении среднего значения концентрации газа значительно занижаются возможные пиковые значения, что может привести к некорректному расчету количества воздуха, требуемого для проветривания рабочей зоны. Использование классической формулы (4) в таких усло-

виях будет корректно только при непрерывном осуществлении отбора проб воздуха в рабочей зоне в течение 180 мин, что трудноосуществимо на практике.

Для этого необходимы специальные поточные пробоотборники [13] или иные методы постоянного контроля рудничной атмосферы [14], но серийных конструкций таких пробоотборников, удовлетворяющих всем требованиям газового режима, не существует.

Важно, что определение относительной газообильности, в рамках задач проветривания, — это, прежде всего, оценка количества газа [15], выделяющегося при разрушении 1 т массива в процессе работы добычного оборудования, для дальнейшего расчета количества воздуха, необходимого для разбавления этого газа в рабочей зоне. Поэтому, применяя действующую методику по определению относительной газообильности, нам необходимы максимально возможные (пиковые) значения концентрации выделившегося газа при отборе проб воздуха в рабочей зоне, в этом случае исключен риск занижения реальных значений, как при определении средней концентрации газа. Максимальные значения концентрации газа возможно получить только при отборе проб непосредственно во время

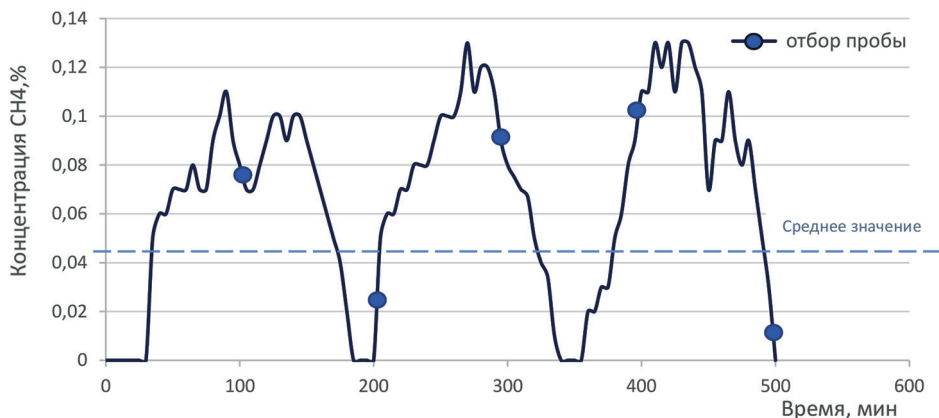


Рис. 2. Точки отбора проб в течение смены

Fig. 2. Sampling points during the shift

работы добычного оборудования в рабочей зоне.

Задача

Описанные выше наблюдения говорят о том, что расчет относительной газообильности по средним (во времени) значениям концентрации в условиях цикличности работы комбайнового комплекса имеет значительный риск погрешности и, как следствие, занижения определяемых значений необходимого количества воздуха для проветривания рабочей зоны. Но в вопросах вентиляции основной целью расчета газообильности является корректное определение количества воздуха для разбавления максимально возможных концентраций газа, которые могут выделяться при разрушении массива в процессе работы добычного оборудования.

Так как классическое понятие относительной газообильности не упоминает об определении средних концентраций газа при расчете, а говорит лишь об обязательном соответствии в формуле значения времени проведения замера и значения количества отбитой руды за это время — предлагается рассмотреть возможность производить единоразовый отбор проб непосредственно во время работы добычного оборудования, учитывая при этом техническую производительность комбайнового комплекса (т/мин). Такие изменения гарантированно позволят учесть пиковые значения концентрации газа, выделяющегося из массива в момент отбора пробы, а также избежать высоких трудозатрат при длительном процессе отбора проб в рабочих зонах рудника при проведении газовых съемок. Также для сохранения корректности результатов необходимо использовать среднее значение концентрации газа (в пространстве), отбирая не менее трех проб ($n \geq 3$) в разных точках поперечного сечения выработки. Учитывая

все условия изменения подхода к определению относительной газообильности, внести соответствующие изменения в формулу по определению значения относительной газообильности.

Изменение подхода

Основная идея усовершенствования формулы заключается в изменении значения времени отбора пробы (1 мин) и показателя добытой руды за время проведения замера (т/мин):

$$g = (I_{\text{ср.исх}} - I_{\text{св}}) / A, \text{ м}^3/\text{т}, \quad (6)$$

где A — техническая производительность комбайнового комплекса (т/мин); $I_{\text{ср.исх}}$ — среднее (в пространстве) количество газа, проходящего по выработке на исходящей струе; $I_{\text{св}}$ — количество газа, проходящего по выработке на свежей струе.

Такой временной показатель отбора проб обусловлен тем, что отбор проб занимает не больше одной минуты, а показатель технической производительности комбайна определяется как т/мин.

Таким образом, использование нового подхода позволяет избежать описанные выше недостатки при отборе проб и определении относительной газообильности.

Применяя такой подход, где отбор проб производится точно и в течение короткого промежутка времени, не стоит забывать о факторе неравномерности содержания газа в массиве [16] — другими словами, нельзя исключать вероятность, что в момент отбора пробы из массива выделялось не максимальное количество газа, которое могло бы выделяться или может выделяться позднее с продвижением горных работ в пределах обследуемой рабочей зоны. Следовательно, использование предлагаемой формулы абсолютно справедливо при условии принятия в формуле коэффициента неравномерности содержания газа

в массиве, с помощью которого получить избежать таких рисков.

Для определения такого коэффициента необходимо понимать, как распределяется газ в массиве. Сотрудниками «ГИ УрО РАН» было рассмотрено несколько подходов для оценки неравномерности распределения газа в массиве. Общую картину распределения концентраций газа в массиве в пределах шахтного поля рудника, где находится исследуемая рабочая зона, можно увидеть с помощью прогнозных карт газодинамических явлений и газоносности для условий шахтных полей рудников ПАО «Уралкалий», разработанных специалистами лаборатории геотехнологических процессов и рудничной газодинамики «ГИ УрО РАН». Для примера прогнозная карта газоносности шахтного поля рудника БКПРУ-4 ПАО «Уралкалий» представлена на рис. 3.

Такие прогнозные карты распределения газоносности составляются для шахт-

ного поля каждого рудника ВМКМС. Принимается среднее значение газоносности для всего шахтного поля на основе множества натуральных замеров по всему исследуемому участку. Участки со стабильно ярко выраженными повышенными значениями относительно общей картины обозначаются на карте цветовым градиентом. Такие карты с продвижением горных работ регулярно актуализируются, тем самым иллюстрируя газоносность отдельных участков рудника.

На прогнозных картах газоносности представлена количественная оценка содержания газа в массиве на разных участках шахтного поля. Но чтобы оценить неравномерность его выделения из массива, необходимо знать диапазон отклонений значений концентраций при выделении газа из массива, другими словами, процент разброса между максимальным и минимальным значением концентрации выделяющегося газа при

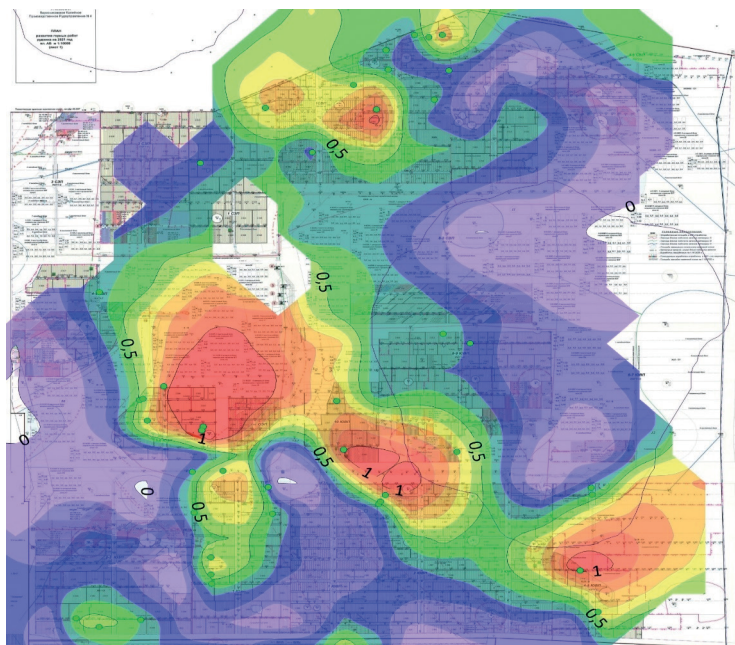


Рис. 3. Прогнозная карта газоносности шахтного поля рудника БКПРУ-4
Fig. 3. Predictive map of the gas content of the mine field of the mine BKPRU-4

ведении горных работ [17]. Такую оценку возможно провести с помощью замеров газообильности в рабочей зоне, непосредственно при ведении горных работ.

Сотрудниками Горного института был предложен вариант оценки неравномерности газовыделения на основе нескольких способов обработки собранной базы измерений на участке шахтного поля одного из рудников ВМКМС. Далее описана концепция метода сбора таких измерений и приведены результаты опытных исследований для оценки эффективности предложенного метода.

Коэффициент неравномерности газовыделения

Исследования неравномерности газовыделения [18] включали в себя серию замеров концентрации метана в пределах одной очистной камеры длиной 200 м пласта «АБ» одного из рудников ВМКМС. Замеры концентрации метана выполнялись за комбайновым комплексом (30 м от груди забоя) во время его работы, при стабильном режиме проветривания, «мокрым способом» и экспресс-газоанализатором с интервалом за-

меров 5 м. За время эксперимента (две рабочих смены) удалось зафиксировать, как меняется концентрация газа [19], выделяющегося из массива на отрезке 65 м. Далее с помощью статистической обработки полученных результатов были рассмотрены несколько вариантов определения коэффициента неравномерности.

Исходные данные

На рис. 4 представлена выборка измеренных концентраций метана в очистной камере (14 замеров).

Среднее значение концентрации метана $m = 0,185\%$.

Определить коэффициент неравномерности газовыделения можно несколькими способами. Самый простой способ — это отношение максимальной и минимальной измеренных концентраций метана:

$$K = \frac{C_{\max}}{C_{\min}} = 1,69. \quad (7)$$

Недостатком такой оценки является то, что она построена по относительно небольшой выборке значений и не учитывает того, что фактически концент-

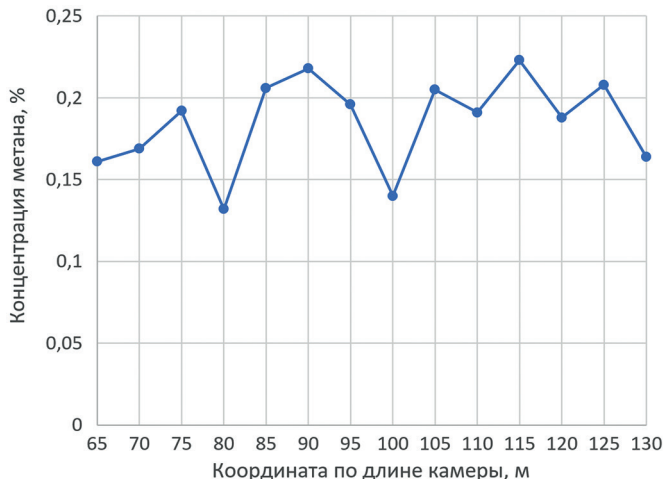


Рис. 4. Измеренные концентрации метана по длине камеры

Fig. 4. Measured methane concentrations along the length of the chamber

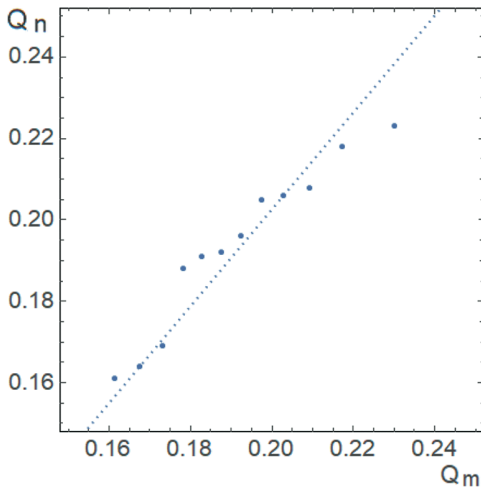


Рис. 5. Квантильный Q–Q график
Fig. 5. Quantile Q–Q plot

рация в другое время отбора проб может не попадать в интервал $[C_{\min}, C_{\max}]$. Поэтому помимо данной оценки можно рассмотреть и проанализировать еще несколько возможных оценок, однако для этого потребуется провести статистическую обработку полученной выборки (см. рис. 2).

*Статистическая обработка,
проверка нормальности*

Для статистической обработки данной выборки требуется задаться гипотезой о том, что она удовлетворяет нормальному распределению. Для этого был построен квантильный Q–Q график, представляющий собой графический метод сравнения двух вероятностных распределений (идеального нормального и фактического) путем построения их квантилей друг против друга (рис. 5).

По степени близости отдельных точек (экспериментальные данные) к наклонной линии (теоретическое нормальное распределение) можно заключить о приемлемой близости выборки к нормальному закону распределения.

Помимо этого, для оценки нормальности выборки был применен тест Ша-

пиро-Уилка. В рамках этого теста значение $p = 0,37$, что больше $0,05$. Исходя из полученного результата, также можно предположить нормальность выборки.

По имеющейся выборке было рассчитано среднеквадратическое отклонение концентрации метана, оно составляет $\sigma = 0,028\%$. Коэффициент вариации выборки равен $0,15$, что позволяет судить о выборке как о достаточно однородной.

В этом случае для оценки неравномерности выделения метана из пород и расчета соответствующего коэффициента может быть использовано правило «трех сигм». Правило «трех сигм» заключается в том, что при нормальном распределении случайной величины практически все значения этой величины с вероятностью $99,73\%$ лежат не далее 3σ в любую сторону от математического ожидания, то есть находятся в диапазоне

$$[m - 3\sigma; m + 3\sigma] = [0,101; 0,269]. \quad (8)$$

Соответствующий коэффициент неравномерности получается равен

$$K = \frac{m + 3\sigma}{m - 3\sigma} = 2,66. \quad (9)$$

Недостатком общепринятого правила «трех сигм» является то, что фактически мы наблюдаем концентрации метана в гораздо более узком диапазоне $[0,132; 0,223]$ по сравнению с диапазоном (8), имеющим полуширину 3σ . Это связано с тем, что при расчете диапазона (8) закладывается очень высокая вероятность для нахождения величины в нем.

Если задаться интервалом (диапазоном) с полушириной $1,645\sigma$, то с 90% вероятностью измеряемая концентрация метана попадет в интервал $[m - 1,645\sigma; m + 1,645\sigma]$. А коэффициент неравномерности получается равен

$$K = \frac{m + 1,645\sigma}{m - 1,645\sigma} = \frac{0,231}{0,139} = 1,66. \quad (10)$$

Данная величина близка к величине (7), рассчитанной более простым методом. Однако достоинством расчетной формулы (10) для коэффициента неравномерности по сравнению с (7) является статистическая оценка доверительной вероятности попадания измеряемой величины в доверительный интервал $[m - 1,645\sigma; m + 1,645\sigma]$. Таким образом, коэффициент (10) имеет более четкий физический смысл.

Сравнительный анализ

В предлагаемом подходе к определению относительной газообильности формула для расчета этого показателя будет иметь следующий вид:

$$g = 1(I_{\text{ср.исх}} - I_{\text{св}}) \times K_n / A, \text{ м}^3/\text{т}, \quad (11)$$

где A — техническая производительность комбайнового комплекса (т/мин); $I_{\text{ср.исх}}$ — среднее (в пространстве) количество газа, проходящего по выработке на исходящей струе, м³/мин; $I_{\text{св}}$ — количество газа, проходящего по выработке на свежей струе, м³/мин; K_n — коэффициент неравномерности газовыделения.

После определения коэффициента неравномерности необходимо понять, как будут меняться значения относительной газообильности, применяя разные подходы к их определению.

Далее приведен анализ результатов, полученных при разном подходе к расчету относительной газообильности.

Показатели относительной газообильности по формуле (4) и по формуле (11) приведены в таблице. Расчет произведен на основе взятых проб в одинако-

вых условиях на рассматриваемом руднике ВМКМС.

Пробы взяты в рабочей зоне тупикового забоя комбайнового комплекса Урал 20-Р с технической производительностью 7 т/мин, на пласте АБ. По результатам расчета относительная газообильность по формуле (4) равна 0,01 м³/т, а по формуле (11) — 0,019 м³/т.

Количество воздуха, необходимое для проветривания призабойного пространства выработки (где размещено действующее оборудование и находятся постоянные рабочие места на проходческом комбайне), по факторам «взрывоопасные газы» или «природные ядовитые газы» определяются следующим образом. При известной (определенной в ходе газовой съемки) относительной газообильности рабочей зоны по соответствующим газам оно вычисляется по формуле

$$Q_3 = 100 \times q \times J / (C - C_0), \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (12)$$

где q — относительная газообильность выработок рабочей зоны по соответствующим газам, м³/т; J — производительность комбайна, т/мин; C — предельно допустимая концентрация соответствующих газов, %; C_0 — концентрация соответствующих газов в рудничном воздухе, поступающем к забою, %.

Далее в таблице приведены результаты расчета относительной газообильности и количества воздуха для рабочей зоны по разным формулам.

Сравнительный расчет, произведенный с применением разных подходов, показывает, что требуемое количество

Пример расчета по разным формулам (для одной рабочей зоны) An example of calculation using different formulas (for one working area)

	$I_{\text{ср.исх}} / I_{\text{лик}}$	Формула (4) (добыча 600 т)	Формула (11)
CH ₄	0,035/0,08	0,010(м ³ /т)	0,019 (м ³ /т)
H ₂ S	0,0003/0,0007	0,00009 (м ³ /т)	0,000166 (м ³ /т)
Q _{рабочей зоны}		89 (м ³ /мин)	163 (м ³ /мин)

воздуха при применении нового подхода увеличилось приблизительно в два раза относительно результатов, рассчитанных по классической формуле (4). Как и предполагалось, средние значения концентрации выделяемого газа в рабочей зоне, используемые для расчета, впоследствии значительно занижают значения относительной газообильности, что может негативно сказаться при определении требуемого количества воздуха, для проветривания рабочей зоны, а как следствие — и на безопасности ведения горных работ.

Заключение

В проделанной работе проанализированы средние показатели концентраций горючего и ядовитого газа, фиксируемые в рабочих зонах рудников ВМКМС за время наблюдений. В соответствии с опытом проведения газовых съемок и наработанной базе проб, отобранных в «проблемных» по газу рабочих зонах, значения концентрации могут быть значительно выше приведенных в работе, а также значительно выше ПДК (предельно допустимых концентраций). Анали-

зируя порядок изменения значений газообильности и, как следствие, значений требуемого количества воздуха, можно сделать вывод, что при применении нового подхода те рабочие зоны, где фактор при расчете количества воздуха был «минимальная скорость воздуха», может смениться на фактор «взрывоопасные газы» [20] и «сероводород», что показывает непосредственную актуальность и важное значение проделанной работы в области контроля рудничной атмосферы.

Для полноты результатов данной работы и применения их на практике в будущем целесообразно провести такие исследования по определению коэффициента неравномерности газовыделения для каждого шахтного поля рудников ВМКМС. Это позволит закрепить такие коэффициенты для каждого отдельного рудника и использовать в дальнейшем новый подход к определению относительной газообильности при проведении газовых съемок, что, безусловно, повысит условия труда и безопасность ведения горных работ в подземных горных выработках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Исаевич А. Г., Стариков А. Н., Мальцев С. В.* Совершенствование метода отбора проб воздуха для определения относительной газообильности горючих газов в рудничной атмосфере // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 4. — С. 143–153. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_143.
2. *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.
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. *Левин Л. Ю., Исаевич А. Г., Семин М. А., Газизуллин Р. Р.* Исследование динамики пылевоздушной смеси при проветривании тупиковой выработки в процессе работы комбайновых комплексов // Горный журнал. — 2015. — № 1. — С. 72–75. DOI: 10.17580/gzh.2015.01.13.
5. *Зайцев А. В., Трушкова Н. А.* Исследование рециркуляционного проветривания при наличии источника газовой выделенности в рабочей зоне и внутренних утечек воздуха // Горный

информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 3. — С. 34–46. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_34.

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

7. *Wanting Song, Jianwei Cheng, Wenhe Wang, Yi Qin, Zui Wang, Marek Borowski, Yue Wang, Purushotham Tukkaraja* Underground mine gas explosion accidents and prevention techniques—an overview // *Archives of Mining Sciences*. 2021, vol. 66, no. 2. DOI: 10.24425/ams.2021.137463.

8. *Fakai Wang, Xusheng Zhao, Yunpei Liang, Xuelong Li, Yulong Chen* Calculation model and rapid estimation method for coal seam gas content // *Processes*. 2018, vol. 6, no. 11, article 223. DOI: 10.3390/pr6110223.

9. *Чайковский И. И.* О природе крупной антиклинальной складки на Верхнекамском месторождении солей, ее геомеханической и газовой-геохимической зональности // *Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки*. — 2021. — Т. 163. — № 3. — С. 490–499. DOI: 10.26907/2542-064X_2021_3.490-499.

10. *Бобров Д. А.* Информационно-справочная система газодинамических явлений и газоносности для условий шахтных полей рудников ПАО «Уралкалий» // *Проблемы недропользования*. — 2016. — № 2(9). — С. 12–18. DOI: 10.18454/2313-1586.2016.02.012.

11. *Sidorenko A. A., Sirenko Y. G., Sidorenko S. A.* Influence of face advance rate on geo-mechanical and gas-dynamic processes in longwalls in gassy mines // *Eurasian Mining*. 2018, vol. 1, pp. 3–8. DOI: 10.17580/em.2018.01.01.

12. *Загвоздкин И. В., Лесов Г. П., Янович Д. М.* Обеспечение безопасности и безаварийной работы комбайновых комплексов на рудниках ОАО «Уралкалий» // *Безопасность труда в промышленности*. — 2013. — № 9. — С. 46–49.

13. *Лаптев В. Н., Исаевич А. Г., Норина Н. В., Южанин А. С., Дудина Е. Н., Ковин К. А., Мальцев С. В., Трушкова Н. А., Газизуллин Р. Р., Стариков А. Н.* Патент № 157165 РФ. Устройство для непрерывного отбора газовой-воздушной смеси за заданный промежуток времени; заявитель и патентообладатель ГИ УрО РАН. № 2015111928; заявл. 1.04.15; опубл. 30.10.15, Бюл. № 32.

14. *Li M., Dubaniewicz T., Dougherty H., Addis J.* Evaluation of fiber optic methane sensor using a smoke chamber // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018, vol. 28, no. 6, pp. 969–974 DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.05.010.

15. *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.

16. *Grgic D., Al Sahyouni F., Golfier F., Moumni M., Schoumacker L.* Evolution of gas permeability of rock salt under different loading conditions and implications on the underground hydrogen storage in salt caverns // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2022, vol. 55, no. 2, pp. 691–714. DOI: 10.1007/s00603-021-02681-y.

17. *Николаев А. В.* Оценка адекватности математических моделей и зависимостей распределения газовой-воздушной смеси в пределах тупиковой выработки калийного рудника // *Уголь*. — 2022. — № 10 (1159). — С. 60–65. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-10-60-65.

18. *Dong J., Cheng L.* Evaluation method of coal mine mode gas control mode based on analytic hierarchy process // *Chemical Engineering Transactions*. 2018, vol. 71, pp. 319–324. DOI: 10.3303/CET1871054.

19. *Ang Liua, Shimin Liua, Gang Wang, Derek Elswortha* Predicting fugitive gas emissions from gob-to-face in longwall coal mines: coupled analytical and numerical modeling // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020, vol. 15, article 119392. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119392.

20. Каледина Н. О., Чечель К. Н. Анализ газового баланса выемочного участка в обеспечении аэрологической безопасности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 10-1. — С. 5—16. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_101_0_5. **ПТЭБ**

REFERENCES

1. Isaevich A. G., Starikov A. N., Maltsev S. V. Improvement of air sampling method to determine relative concentration of combustion gases in mine air. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 4, pp. 143—153. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_143.

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

3. Butuzov D. M. Component composition of free gases of hydrochloric rocks of the Verkhnekamsk potash deposit. *Problemy razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh.* 2016, no. 1, pp. 238—240. [In Russ].

4. Levin L. Yu., Isaevich A. G., Semin M. A., Gazizullin R. R. Investigation of the dynamics of the dust-air mixture during the ventilation of a dead-end working during the operation of combine complexes. *Gornyi Zhurnal.* 2015, no. 1, pp. 72—75. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2015.01.13.

5. Zaitsev A. V., Trushkova N. A. Recirculating ventilation in the presence of gas emission source and internal air leaks in operating space. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 3, pp. 34—46. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_34.

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

7. Wanting Song, Jianwei Cheng, Wenhe Wang, Yi Qin, Zui Wang, Marek Borowski, Yue Wang, Purushotham Tukkaraja Underground mine gas explosion accidents and prevention techniques—an overview. *Archives of Mining Sciences.* 2021, vol. 66, no. 2. DOI: 10.24425/ams.2021.137463.

8. Fakai Wang, Xusheng Zhao, Yunpei Liang, Xuelong Li, Yulong Chen Calculation model and rapid estimation method for coal seam gas content. *Processes.* 2018, vol. 6, no. 11, article 223. DOI: 10.3390/pr6110223.

9. Chaikovskiy I. I. On the nature of a large anticline fold at the Verkhnekamsk salt deposit, its geomechanical and gas-geochemical zoning. *Proceedings of Kazan university. Natural sciences series.* 2021, vol. 163, no. 3, pp. 490—499. [In Russ]. DOI: 10.26907/2542-064X_2021_3_490-499.

10. Bobrov D. A. Information and reference system of gas-dynamic phenomena and gas content for the conditions of mine fields of mines of PJSC Uralkali. *Problems of Subsoil Use.* 2016, no. 2(9), pp. 12—18. [In Russ]. DOI: 10.18454/2313-1586.2016.02.012.

11. Sidorenko A. A., Sirenko Y. G., Sidorenko S. A. Influence of face advance rate on geomechanical and gas-dynamic processes in longwalls in gassy mines. *Eurasian Mining.* 2018, vol. 1, pp. 3—8. DOI: 10.17580/em.2018.01.01.

12. Zagvozhkin I. V., Lesov G. P., Yanovich D. M. Ensuring the safety and trouble-free operation of combine complexes at the mines of JSC Uralkali. *Occupational Safety in Industry.* 2013, no. 9, pp. 46—49. [In Russ].

13. Laptev V. N., Isaevich A. G., Norina N. V., Yrzhaniy A. S., Dudina E. N., Kovin K. A., Mal'tsev S. V., Trushkova N. A., Gazizullin R. R., Starikov A. N. Patent RU 157165. 30.10.15. [In Russ].

14. Li M., Dubaniewicz T., Dougherty H., Addis J. Evaluation of fiber optic methane sensor using a smoke chamber. *International Journal of Mining Science and Technology.* 2018, vol. 28, no. 6, pp. 969—974 DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.05.010.

15. 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.

16. Grgic D., Al Sahyouni F., Golfier F., Moumni M., Schoumacker L. Evolution of gas permeability of rock salt under different loading conditions and implications on the underground hydrogen storage in salt caverns. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2022, vol. 55, no. 2, pp. 691 – 714. DOI: 10.1007/s00603-021-02681-y.

17. Nikolaev A. V. Evaluation of the adequacy of mathematical models and the dependence of the distribution of the gas-air mixture within the blind working of a potash mine. *Ugol'*. 2022, no. 10 (1159), pp. 60 – 65. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-10-60-65.

18. Dong J., Cheng L. Evaluation method of coal mine mode gas control mode based on analytic hierarchy process. *Chemical Engineering Transactions*. 2018, vol. 71, pp. 319 – 324. DOI: 10.3303/CET1871054.

19. Ang Liua, Shimin Liua, Gang Wang, Derek Elswortha Predicting fugitive gas emissions from gob-to-face in longwall coal mines: coupled analytical and numerical modeling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020, vol. 15, article 119392. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119392.

20. Kaledina N. O., Chechel K. N. Analysis of the gas balance of the extraction site in ensuring aerological safety. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 10-1, pp. 5 – 16. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_101_0_5.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Стариков Алексей Николаевич¹ – младший научный сотрудник,
e-mail: starikov4488@mail.ru,

Мальцев Станислав Владимирович¹ – канд. техн. наук,
зав. сектором рудничной вентиляции,
e-mail: stasmalcev32@gmail.com,

Исаевич Алексей Геннадьевич¹ – канд. техн. наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: aero_alex@mail.ru,

¹ Горный институт Уральского отделения РАН.

Для контактов: Стариков А.Н., e-mail: starikov4488@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.N. Starikov¹, Junior Researcher,
e-mail: starikov4488@mail.ru,

S.V. Maltsev¹, Cand. Sci. (Eng.),
Head of Mine Ventilation Sector,
e-mail: stasmalcev32@gmail.com,

A.G. Isaevich¹, Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher,
e-mail: aero_alex@mail.ru,

¹ Mining Institute of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 614000, Perm, Russia.

Corresponding author: A.N. Starikov, e-mail: starikov4488@mail.ru.

Получена редакцией 28.10.2022; получена после рецензии 27.03.2023; принята к печати 10.08.2023.

Received by the editors 28.10.2022; received after the review 27.03.2023; accepted for printing 10.08.2023.