



II РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

DOI: 10.25558/VOSTNII.2022.11.42.004

УДК 622.812.2; 622.82

© А.В. Николаев, А.Н. Земсков, П.В. Максимов, Д.А. Конотоп, 2022

А.В. НИКОЛАЕВ

д-р техн. наук, доцент,
профессор кафедры
ПНИПУ, г. Пермь
e-mail: nikolaev0811@mail.ru



А.Н. ЗЕМСКОВ

д-р техн. наук, доцент,
генеральный директор
ООО «Зарубежшахтострой», г. Пермь
e-mail: aleks.zemskov1951@gmail.com



П.В. МАКСИМОВ

канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры
ПНИПУ, г. Пермь
e-mail: pvmperm@mail.ru



Д.А. КОНОТОП

аспирант
ПНИПУ, г. Пермь
e-mail: konotopda@gmail.com



ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ ПРОВЕТРИВАНИЯ ТУПИКОВЫХ ВЫРАБОТОК КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ

В статье при помощи компьютерного моделирования произведена оценка эффективности существующего и предлагаемых способов проветривания тупиковых выработок рудников Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. В результате исследований установлено, что на конечном этапе отработки тупиковой выработки (камеры) возникает частичная рециркуляция выходящей из нее газо-воздушной смеси на свежую струю.

Предложен способ проветривания, исключающий описанную проблему и позволяющий повысить эффективность проветривания.

Ключевые слова: МЕТАН, ГАЗЫ, ПРОВЕТРИВАНИЕ, БЕЗОПАСНОСТЬ, ТУПИКОВАЯ ВЫРАБОТКА, ЭФФЕКТ ЭЖЕКЦИИ.

Введение. При проходке камер в подземных горнодобывающих предприятиях необходимо осуществлять проветривание тупиковых забоев. В рудниках Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВКМКС) проветривание тупиковых выработок (камер) осуществляется вентиляторами местного проветривания (ВМП), которые доставляют воздух в забой по вентиляционным трубам [1, 2].

Способ проветривания тупиковой выработки (камеры), применяемый на калийных рудниках, приведен на рис. 1. Часть воздуха, движущегося по блоковому транспортному (выемочному) штреку при помощи ВМП по вентиляционной трубе, подается в забой тупиковой выработки (камеры). После проветривания камеры загрязненный воздух снова поступает в транспортный (выемочный) штрек.

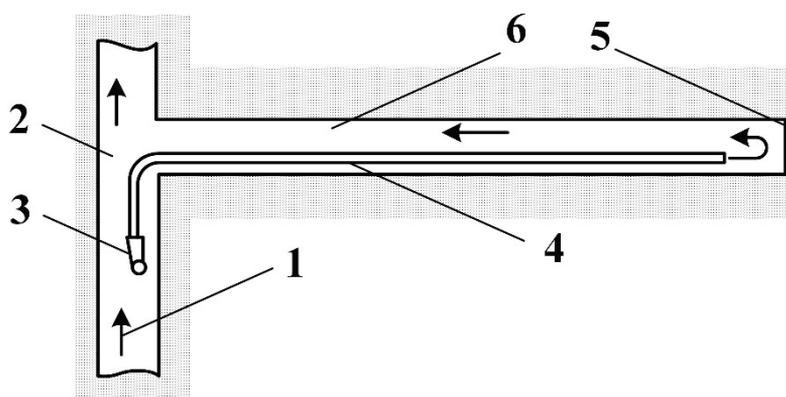


Рис. 1. Проветривание тупиковой выработки (камеры) калийного рудника ВКМКС: 1 — поступающий воздух; 2 — блоковый транспортный (выемочный) штрек; 3 — ВМП; 4 — вентиляционная труба; 5 — забой; 6 — тупиковая выработка (камера)

Способ подачи воздуха по вентиляционной трубе связан с рядом недостатков:

- необходимость проведения трудоемких работ по прокладке и обслуживанию вентиляционного трубопровода;

- невозможность обеспечения регламентируемого Правилами безопасности [3] отставания вентиляционной трубы от забоя на расстоянии не более 10 м при использовании стандартных труб длиной 20 м;

- высокие затраты электроэнергии на работу ВМП, вызванные преодолением аэродинамического сопротивления трубопровода.

Широкое применение в России и за рубежом нашел способ проветривания, при котором не используются вентиляционные трубы. В их числе воздушные эжекторы, используемые в США для проветривания тупиковых забоев угольных шахт, устанавливаемые на добычных комбайнах, струйные вентиляторы,

эжекторы на доставочной дизельной технике, работающей в тупиковых камерах небольшого объема (Швеция), импульсные и струйные вентиляторы для проветривания тупиковых выработок (Германия) и др. [4–10]

Для проветривания тупиковой выработки калийного рудника ВКМКС в работе [11] была предложена эжектирующая установка, позволяющая доставлять воздух в забой камеры без применения вентиляционной трубы.

Проветривание тупиковых выработок добычных участков в первую очередь осуществляется для обеспечения безопасных и комфортных условий горнорабочих, в связи с этим необходимо оценить, насколько существующие и предлагаемые способы проветривания эффективны с точки зрения снабжения рабочей зоны свежим воздухом и выноса из нее вредных и опасных газов.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТАНА В ТУПИКОВЫХ ВЫРАБОТКАХ

Среди газов, выделяющихся из горных пород калийных рудников, наиболее распространен метан [12]. При этом газ является взрывоопасным и оказывающим на организм человека вредное и опасное (легкое наркотическое) воздействие. Поэтому, несмотря на присутствие в рудничной атмосфере целого ряда других газов (гомологи метана, водорода) [12], правомерно оперировать термином «метан». В связи с этим, оценка эффективности способов проветривания тупиковых выработок калийных рудников в настоящей работе произведена с учетом распространения и изменения концентрации метана.

Выделение метана в тупиковой выработке калийного рудника осуществляется с обнаженных поверхностей из отбитой руды, в том числе из руды, с находящейся в бункере-перегрузателе и самоходном вагоне [12, 13]. Но из-за привязки этих процессов к конкретному месторождению, руднику и иногда даже к пласту этого рудника, а также к параметрам

комбайна, самоходного вагона и скорости проходки (может изменяться из-за гипсометрии пласта) в универсальном виде описать их проблематично.

В связи с этим для оценки эффективности используется вариант, предложенный в работе [14], когда учитывается метан, выделяющийся из дренажных шпуров и шпуров, пробуренных под анкерную крепь, пересекающих породные слои в кровле и высвобождающих газ из межслоевых скоплений. Этот фактор является определяющим с позиции оценки газовой обстановки в забое.

Для моделирования использовался вычислительный пакет ANSYS Fluent, в котором математическая модель описывает трехмерное турбулентное движение дифференциальными уравнениями в частных производных с использованием полуэмпирической модели типа SST $k-\omega$.

На рис. 2 приведены результаты моделирования распределения газо-воздушной смеси при беструбном проветривании тупиковой выработки с точечным источником выделения метана — шпур, пробуренный в кровле.

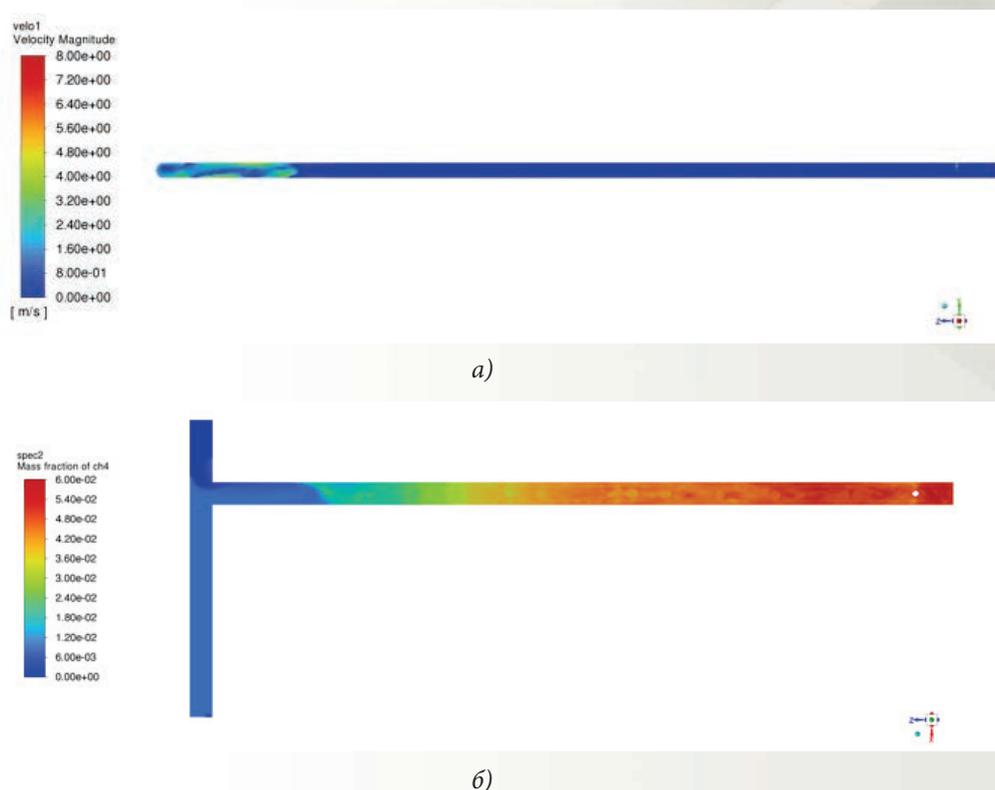


Рис. 2. Поле скоростей (а) и распределение концентрации метана (б) в тупиковой выработке: а — в вертикальном сечении; б — в горизонтальном сечении

Исходя из данных, представленных на рисунке, скорость потока воздуха по мере удаления ВМП падает до нуля (рис. 2а). Объясняется это тем, что поступающий и встречный потоки сталкиваются, в результате чего воздух начинает циркулировать на значительном удалении от забоя. В результате этого наблюдается скопление метана в рабочей зоне (рис. 2б). Концентрация метана при подобном способе проветривания велика даже при моделировании процесса выделения газа всего из одного шпура.

Таким образом, результаты исследований показали, что беструбный способ проветривания калийного рудника, представленный в работе [11], не позволяет эффективно проветривать тупиковую выработку и может стать причиной скопления газа в забое.

Но результаты работы [14] показывают, что применение традиционного способа проветривания также не позволяет в полной мере обеспечить все необходимые условия для безопасности ведения горных работ: установлено, что на конечном этапе проходки тупико-

вой выработки часть загрязненного воздуха, выходящего из нее, рециркулирует на свежую струю воздуха, то есть снова попадает в забой, увеличивая концентрацию газов в ней.

Такая ситуация возникает несмотря на выполнение требований, предписываемых Правилами безопасности [3]: производительность ВМП не должна превышать 70 % количества воздуха, подаваемого к его всасу за счет общешахтной депрессии; ВМП должен устанавливаться на свежей струе воздуха на расстоянии не менее 10 м от выхода исходящей струи.

Ввиду того, что производительность ВМП в настоящее время фактически не регулируется, для анализа эффективности применяемого способа проветривания в компьютерной модели было изменено его месторасположение: вместо 10 м отнесен на 20 м, что равно длине серийно выпускаемых вентиляторных труб для трубопроводов.

Результаты моделирования воздухораспределения приведены на рис. 3.

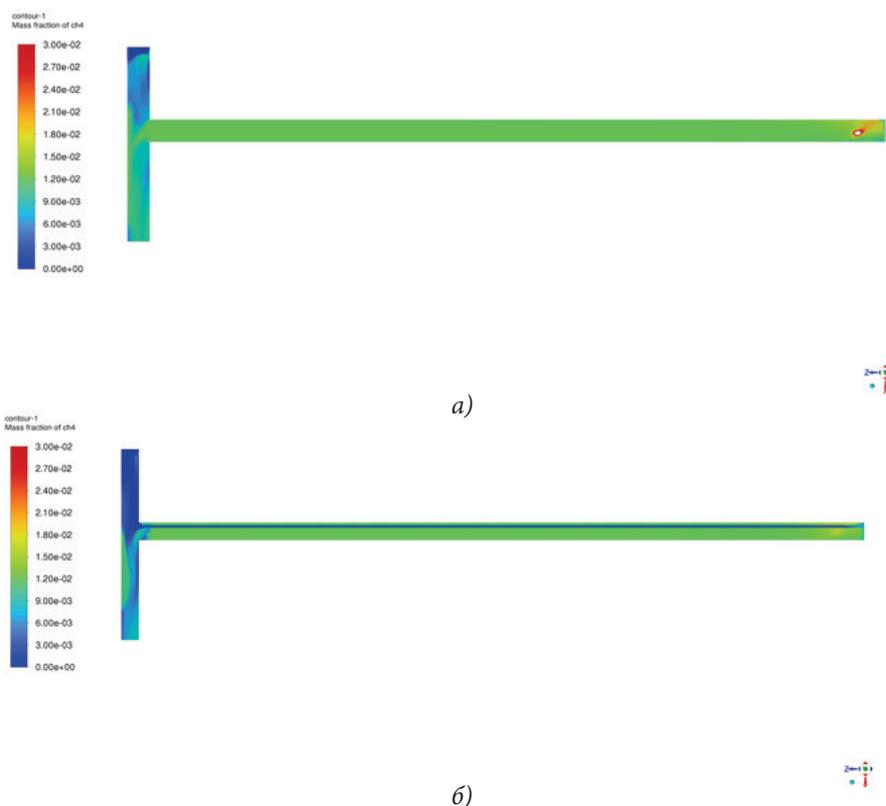


Рис. 3. Распределение концентрации метана в тупиковой выработке при расположении ВМП на расстоянии 20 м от выхода исходящей струи: а — в горизонтальном сечении на высоте 180 см от земли; б — в горизонтальном сечении на высоте 30 см от земли

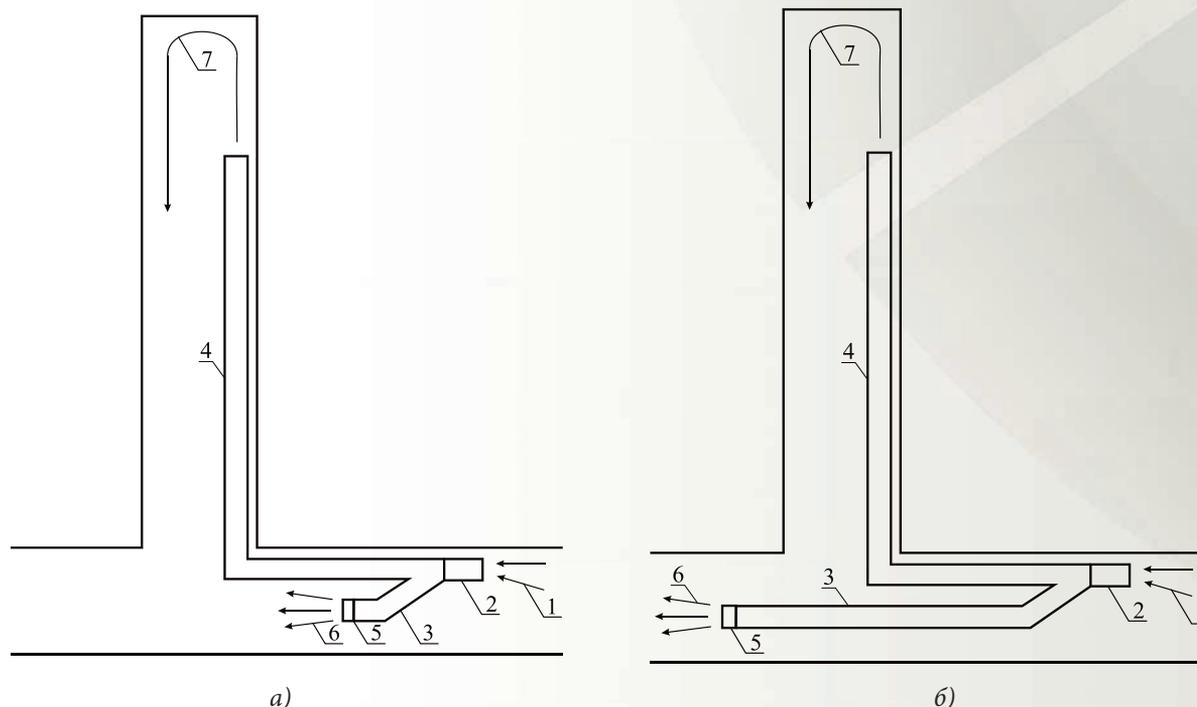
По распределению воздушных потоков видно, что на конечном этапе проходки в тупиковой выработке (камеры) не исчезает проблема рециркуляции газовой смеси. Следовательно, необходимо разработать способ проветривания тупиковой выработки, который обеспечит эффективное ее проветривание, вынос газовой смеси из нее и исключит рециркуляцию исходящей струи.

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ СПОСОБ ПРОВЕТРИВАНИЯ ТУПИКОВОЙ ВЫРАБОТКИ КАЛИЙНОГО РУДНИКА

Для решения указанной проблемы в настоящей работе предлагается использовать способ проветривания [15], который работает следующим образом.

По транспортному штреку движется поток воздуха, часть которого засасывается вентилятором местного проветривания и де-

лится на два потока в тройнике (рис. 4). За счет изменяющегося положения регулирующей задвижки, изменяется аэродинамическое сопротивление сбросного трубопровода. В открытом положении задвижки сбросной трубопровод будет иметь минимальное аэродинамическое сопротивление, в результате чего через него пойдет максимальный объем воздуха, а по вентиляционному трубопроводу — минимальный. При закрытом положении регулирующей задвижки по вентиляционному трубопроводу пойдет максимальный объем воздуха, примерно равный производительности вентилятора местного проветривания. За счет промежуточного регулирования положения задвижки изменяется расход воздуха, поступающего по вентиляционному трубопроводу, без применения дорогостоящих устройств регулирования производительности ВМП.



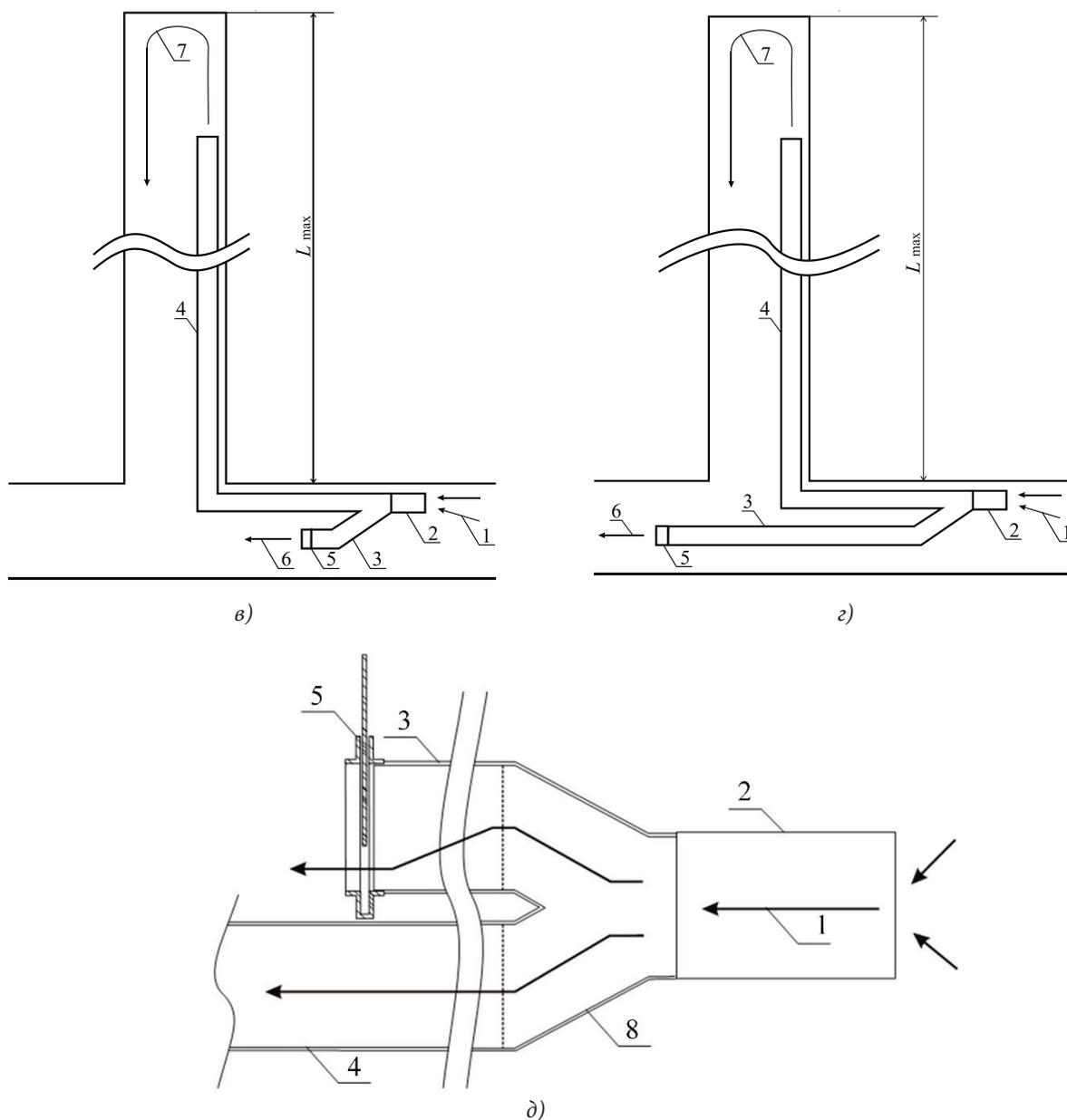


Рис. 4. Способ регулирования объемного расхода воздуха, подаваемого в тупиковую выработку:
a, б — проветривание тупиковой выработкой на начальном этапе отработки; *в, г* — проветривание тупиковой выработкой на конечном этапе отработки; *д* — трубопровод с переменным сечением;
 1 — поступающий поток воздуха; 2 — вентилятор местного проветривания; 3 — сбросной трубопровод;
 4 — вентиляционный трубопровод; 5 — регулирующая задвижка; 6 — сбрасываемый поток воздуха;
 7 — поток воздуха, омывающий рабочую зону; 8 — тройник

Исходящий из сбросного трубопровода воздух в транспортном (выемочном) штреке вызывает эффект эжекции («воздушного поршня») и тем самым способствует проветриванию, препятствует рециркуляции воздуха обратно в ВМП.

Предложено несколько вариантов расположения сбросного трубопровода по мере проходки камеры (рис. 4а-г). Наиболее под-

ходящий выбирается при известных параметрах горных выработок, технических характеристик и режимах работы ВМП.

Для расчета объемного расхода воздуха в работе [2] предложена формула, которая для приведенного способа примет вид:

$$Q = Q_0 \cdot \sqrt[3]{B \cdot \Delta \cdot \left[\frac{(S_1 - S_b)^2}{S_k^2} \cdot e - 1 \right]}, \quad (1)$$

где Q_s — объемный расход струи, исходящей из сбросного трубопровода, $\text{м}^3/\text{с}$; $\Delta = \rho/2g \approx 0,0612 \text{ кг}\cdot\text{с}^2/\text{м}^4$; ρ — плотность воздуха (рассчитывается при известных атмосферном давлении и температуре воздуха или берется равной 1,2), $\text{кг}/\text{м}^3$; g — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; S_l — сечение транспортного (выемочного) штрека, м^2 ; S_s — сечение, занимаемое вентилятором в выработке, м^2 ; S_k — сечение сбросного трубопровода (начальное сечение струи воздуха), м^2 ; e — коэффициент безразмерного запаса струи, равный $e = \frac{1,472 \cdot D}{(2 \cdot b_c + 0,0029 \cdot D)}$; D — диаметр сбросного трубопровода, м ; b_c — расстояние от оси вентилятора до наиболее удаленной стенки выработки, м .

Коэффициент B согласно [2] определяется по формуле:

$$B = S^2 \left/ \left((S_l - S_s)^2 \cdot \left[R \cdot S^2 + 1,091 \cdot \Delta \cdot S^3 \cdot \sqrt{\left(\frac{R}{2} \cdot \Delta \right)^3 - \Delta} \right] \right) \right., \quad (2)$$

где S — сечение выработки, в котором происходит раскрытие струи. Так как выработка имеет постоянное сечение, то $S_l = S$.

Аэродинамическое сопротивление транспортного (выемочного) штрека вычисляется по формуле [2, 16]:

$$R = (0,0961 \cdot K \cdot H) / S^{2,5}, \quad (3)$$

где K — коэффициент, определяющий степень

шероховатости выработки, способ ее проходки и назначение; L, S — соответственно длина (м) и сечение (м^2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного анализа установлено, что существующие способы проветривания не способны исключить попадания загрязненного исходящего из тупиковой выработки (камеры) калийного рудника на свежую струю на конечном этапе проходки. Решить настоящую проблему можно путем регулирования производительности ВМП. Однако, ввиду дороговизны такой системы управления подобное решение не находит применения на практике. Кроме того, в этом случае режим работы ВМП необходимо привязывать к концентрации метана в тупиковой выработке, в результате чего необходимо полностью автоматизировать процесс проветривания по всему руднику. Высокая стоимость подобных проектов становится причиной низкой их реализации.

Предложенный в настоящей работе способ позволит осуществлять проветривание тупиковой выработки по заранее расчетным режимам, привязанным к этапам проходки камеры и исключить (снизить) вероятность рециркуляции загрязненного воздуха.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-45-596025.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алыменко Н.И., Минин В.В. Вентиляторные установки и их применение. Екатеринбург, 1999. С. 224.
2. Мохирев Н.Н., Радько В.В. Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация. М., 2007. 324 с.
3. Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых: федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2014. Сер. 03. Вып. 78. 276 с.
4. Алыменко Н.И., Алыменко Д.Н., Коровин А.И., Пшеничников С.В. Вентиляторные эжекторные установки для рудников // Горный журнал. 2013. № 6. С. 73–77.
5. Мохирев Н.Н. Определение режимов работы и мест установки вентиляторов-эжекторов // Вентиляция шахт и рудников. 1980. № 7. С. 50–55.

6. Мохирев Н.Н. Исследование работы эжектирующих установок в рудничных вентиляционных сетях: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук // Мохирев Николай Николаевич. Пермь. 1974. С. 217.

7. Alymenko N.I., Nikolaev A.V., Kamenskikh A.A., Petrov A.I. Ejector fan installations used in mines of Russia // Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2017). Tomsk Polytechnic University. Paris; Amsterdam; Hong Kong: Atlantis Press, 2017. P. 54–60.

8. Morris I.N., Walker G. Changes in the approach to ventilation in recent years // The Mining Eng. 1982. Vol. 141. No. 244. P. 401–413.

9. Kaledina N.O., Kobylkin S.S., Kobylkin A.S. The calculation method to ensure safe parameters of ventilation conditions of goaf in coal mines // Eurasian Mining. 2016. No. 1. P. 41–44.

10. Филин А.Э., Овчинникова Т.И., Зиновьева О.М., Меркулова А.М. Развитие пульсирующей вентиляции в горном производстве // Горный журнал. 2020. № 3. С. 67.

11. Красноштейн А.Е., Алыменко Н.И., Минин В.В. Энергосберегающее проветривание рудников с малым аэродинамическим сопротивлением (на примере калийных рудников) // Горный вестник. 1995. № 4. С. 55–59.

12. Земсков А.Н., Кондрашев П.И., Травникова Л.Г. Природные газы калийных месторождений и меры борьбы с ними. Пермь, 2008. 414 с.

13. Файнбург Г.З. Цифровизация процессов проветривания калийных рудников. Пермь-Екатеринбург, 2020. 422 с.

14. Николаев А.В., Максимов П.В., Лялькина Г.Б., Конотоп Д.А. Влияние процесса выделения метана на воздухораспределение в добычных участках калийных рудников // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 6. С. 87–97.

15. Патент 2631946 Российская Федерация, МПК E21F 1/08. Способ проветривания тупиковой выработки / Петров А.И., Каменских А.А., Николаев А.В., Алыменко Н.И.; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» — № 2016126242; заявл. 29.06.16; опубл. 29.09.17. Бюл. № 28.

16. Николаев А.В., Алыменко Н.И., Садыков Р.И. Расчет величины поверхностных утечек воздуха на калийных рудниках // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2012. Т. 11. № 5. С. 115–121.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2022.11.42.004

UDC 622.812.2; 622.82

© A.V. Nikolaev, A.N. Zemskov, P.V. Maksimov, D.A. Konotop, 2022

A.V. NIKOLAEV

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor,
Professor of the Department
PNRPU, Perm
e-mail: nikolaev0811@mail.ru

A.N. ZEMSKOV

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor,
General Director
LLC «Zarubezhshakhtostroy», Perm
e-mail: aleks.zemskov1951@gmail.com

P.V. MAKSIMOV

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department
PNRPU, Perm
e-mail: pvmperm@mail.ru

D.A. KONOTOP

Graduate Student
PNRPU, Perm
e-mail: konotopda@gmail.com

EVALUATION OF EFFICIENCY OF METHODS OF VENTILATION OF DEAD-END MINING OF POTASH MINES

The paper used computer simulations to assess the effectiveness of existing and proposed methods of ventilation of dead-end mine workings in the Verkhnekamskoye deposit of potassium-magnesium salts. As a result of studies, it was found that at the final stage of development of the dead-end mine (chamber), partial recirculation of the gas-air mixture leaving it to a fresh jet occurs.

Invention proposes a ventilation method eliminating the described problem and making it possible to increase ventilation efficiency.

Keywords: METHANE, GASES, VENTILATION, SAFETY, DEAD-END PRODUCTION, EJECTION EFFECT.

REFERENCES

1. Alymenko N.I., Minin V.V. Fan units and their application. Yekaterinburg, 1999. P. 224. [In Russ.].
2. Mohirev N.N., Radko V.V. Engineering calculations of mine ventilation. Construction. Reconstruction. Operation. M., 2007. 324 p. [In Russ.].
3. Safety rules for mining and processing of solid minerals: federal norms and rules in the field of industrial safety. M.: CJSC «Scientific and Technical Center for Industrial Safety Research», 2014. Series 03. Issue 78. 276 p. [In Russ.].
4. Alymenko N.I., Alymenko D.N., Korovin A.I., Pshenichnikov S.V. Fan ejector installations for mines // Mining Journal [Gornyj zhurnal]. 2013. No. 6. P. 73–77. [In Russ.].
5. Mohirev N.N. Determination of operating modes and places of installation of fans-ejectors // Ventilation of mines and mines [Ventilyaciya shaht i rudnikov]. 1980. No. 7. P. 50–55. [In Russ.].
6. Mohirev N.N. Investigation of the work of ejecting installations in mine ventilation networks: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences // Mohirev Nikolay Nikolaevich. Perm. 1974. P. 217. [In Russ.].
7. Alymenko N.I., Nikolaev A.V., Kamenskikh A.A., Petrov A.I. Ejector fan installations used in mines of Russia // Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2017). Tomsk Polytechnic University. Paris; Amsterdam; Hong Kong: Atlantis Press, 2017. P. 54–60.
8. Morris I.N., Walker G. Changes in the approach to ventilation in recent years // The Mining Eng. 1982. Vol. 141. No. 244. P. 401–413.
9. Kaledina N.O., Kobylkin S.S., Kobylkin A.S. The calculation method to ensure safe parameters of ventilation conditions of goaf in coal mines // Eurasian Mining. 2016. No. 1. P. 41–44.
10. Filin A.E., Ovchinnikova T.I., Zinovieva O.M., Merkulova A.M. The development of pulsating ventilation in mining production // Mining Journal [Gornyj zhurnal]. 2020. No. 3. P. 67. [In Russ.].
11. Krasnoshtein A.E., Alymenko N.I., Minin V.V. Energy-saving ventilation of mines with low aerodynamic resistance (on the example of potash mines) // Mining bulletin [Gornyj Vestnik]. 1995. No. 4. P. 55–59. [In Russ.].

12. Zemskov A.N., Kondrashov P.I., Travnikova L.G. Natural gases of potash deposits and measures to combat them. Perm, 2008. 414 p. [In Russ.].

13. Feinburg G.Z. Digitalization of the processes of ventilation of potash mines. Perm-Yekaterinburg, 2020. 422 p. [In Russ.].

14. Nikolaev A.V., Maksimov P.V., Lyalkina G.B., Konotop D.A. The effect of the methane release process on air distribution in potash mining sites // News of universities. Mining Journal [Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal]. 2021. No. 6. P. 87–97. [In Russ.].

15. Patent 2631946 Russian Federation, MPK E21F 1/08. A.I. Petrov, A.A. Kamenskikh, A.V. Nikolaev, N.I. Alymenko; applicant and patent holder of the Perm National Research Polytechnic University — No. 2016126242; declared 29.06.16; publ. 29.09.17. Bul. No. 28. [In Russ.].

16. Nikolaev A.V., Alymenko N.I., Sadykov R.I. Calculation of the value of surface air leaks at potash mines // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining [Vestnik Permskogo nacionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo]. 2012. Vol. 11. No. 5. P. 115–121. [In Russ.].