

БЕЗОПАСНОСТЬ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 622.812.2; 622.82

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-6-87-97

Влияние процесса выделения метана на воздухораспределение в добычных участках калийных рудников

Николаев А. В.^{1*}, Максимов П. В.¹, Лялькина Г. Б.¹, Конотоп Д. А.¹

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия

*e-mail: nikolaev0811@mail.ru

Реферат

Введение. В работе установлено, что из-за процесса выделения в обрабатываемых камерах легких газов (в том числе метана) между горными выработками появляется дополнительная естественная тяга. Расчеты показали, что вследствие выделения из горного массива метана величина возникающей дополнительной естественной тяги невелика. Однако даже небольшая по величине дополнительная естественная тяга, взаимодействуя с тепловой депрессией, вызванной увеличением температуры в конвейерном штреке, изменяет в нем направление движения струи подаваемого воздуха. При этом в блоках и панелях, расположенных по восстанию пласта, результирующая естественная тяга способствует проветриванию, а в добычных участках, расположенных по падению пласта, она препятствует движению воздуха в требуемом направлении.

Методология исследований. Приведены методика и результаты расчета величины и направления естественной тяги для реальных панелей калийных рудников Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей при различных условиях, а также результаты моделирования процесса распространения метана в камере при точечном источнике его выделения.

Результаты. Модельные расчеты показали, что даже при малых объемах выделения газа из одиночного источника в тупиковой камере (шпура, пробуренного в кровле) концентрация газа в газозооной смеси, попадающей в конвейерный штрек, достигает 2 %.

Выводы. В целях обеспечения безопасности ведения горных работ, для снижения риска возникновения аварии при расчете объема воздуха, необходимого для проветривания добычных участков, требуется учитывать динамику выделения метана из горного массива и дальнейшего его распространения по горным выработкам.

Ключевые слова: безопасность; метан; естественная тяга; воздухораспределение.

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

Введение. Важнейшим условием безопасности работ на подземных горнодобывающих предприятиях является обеспечение устойчивости проветривания, т. е. способности вентиляционной сети сохранять заданный объемный расход и направление движения воздуха [1, 2]. Особенно сложно поддерживать устойчивый режим проветривания на калийных рудниках, обладающих малыми аэродинамическими сопротивлениями [3, 4].

На устойчивость проветривания в добычных участках калийных рудников существенное влияние оказывает естественная тяга, которая, согласно исследованиям [5, 6], даже при небольшом ее значении может изменить направление движения воздуха в горной выработке (в приведенных работах – в конвейерном штреке блока). В работах [5–9] утверждалось, что основным фактором, влияю-

щим на величину естественной тяги, является температура воздуха как наиболее значимая причина изменения его плотности, и потому использовалось понятие «тепловая депрессия».

В частности, в работе [5] установлен факт изменения величины естественной тяги между горными выработками из-за увеличения температуры (вследствие выделения тепла составными частями конвейера) в конвейерном штреке. При этом в добычных участках, расположенных по падению пласта, естественная тяга направлена встречно требуемому направлению движения воздуха, а в блоках и панелях, ориентированных по восстанию пласта, наоборот, она совпадает по направлению с общешахтной депрессией. При этом при возрастании температуры в конвейерном штреке, как и при возрастании концентрации выделяемого в камере метана, естественная тяга будет препятствовать проветриванию в добычных участках, расположенных по падению пласта, и способствовать этому процессу в добычных участках, расположенных по восстанию пласта.

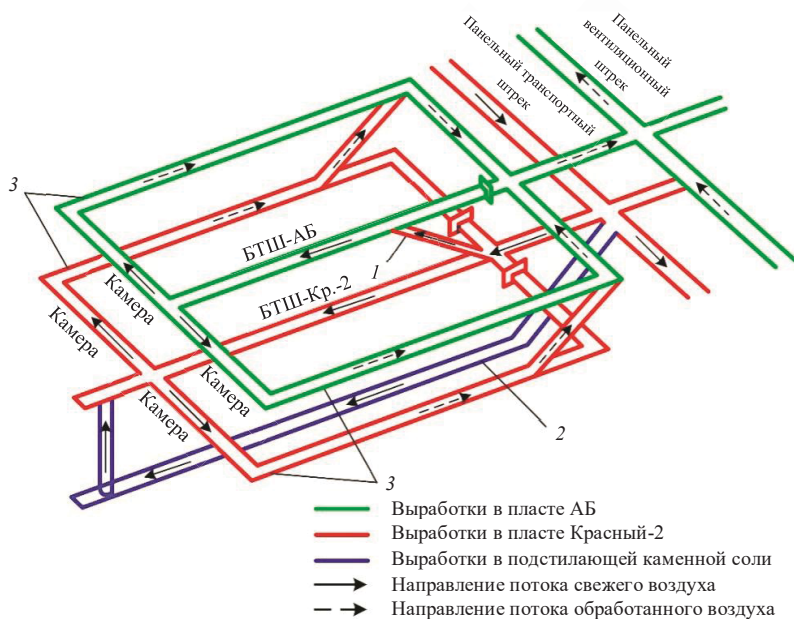


Рисунок 1. Схема проветривания добычного участка калийного рудника
Figure 1. Ventilation scheme for a potash mine production unit

Однако известно, что величина естественной тяги существенно зависит от плотности воздуха как таковой (при неизменной температуре), а также от разности высотных отметок сообщающихся выработок. При этом плотность воздуха будет изменяться не только при изменении его температуры, но и при изменении барометрического давления.

Кроме того, в работе [10] авторами сделан вывод, что сам механизм возникновения и изменения естественной тяги для газоносных и негазоносных подземных горнодобывающих предприятий будет отличаться, и потому в газоносных шахтах требуется учитывать плотность газозвушной смеси сложного состава с примесями различных газов. Таким образом, даже при неизменных значениях температуры и барометрического давления плотность воздуха может изменяться в зависимости от изменения концентрации в нем других газов.

При этом в каждом из добычных участков рудника складывается своя аэрологическая обстановка, динамика изменения которой в каждый момент времени

определяется не только геометрическими параметрами сообщающихся выработок, но и физическими характеристиками потоков газоздушных смесей, поступающих в него и вступающих во взаимодействие с примесями газов (в частности, метана), выделяемых массивом пород в процессе нарушения его целостности.

Влияние концентрации метана на воздухораспределение в горных выработках добычного участка при неизменных значениях температуры и барометрического давления. В калийных рудниках Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВКМКС) используется схема проветривания добычных участков (панелей и блоков), приведенная на рис. 1.

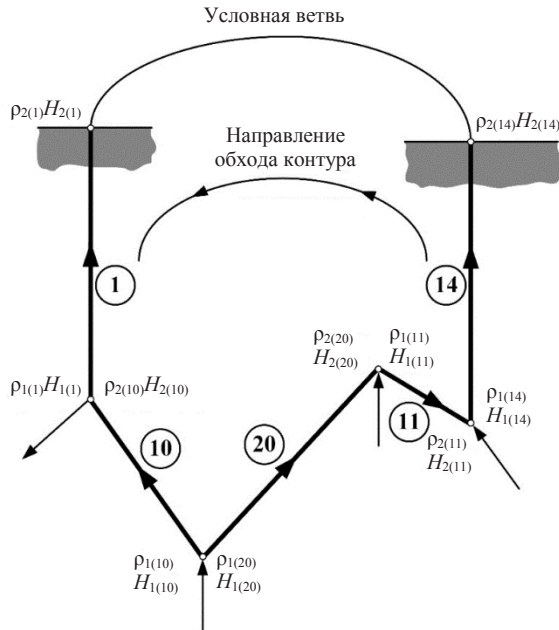


Рисунок 2. Контур вентиляционной сети в вертикальной плоскости

Figure 2. The outline of the ventilation vertically

Воздух поступает в блок из панельного транспортного штрека. Далее воздух идет в блоковый транспортный штрек, пройденный в пласте Красный-2 (БТШ-Кр.-2), и по уклону 1 в блоковый транспортный штрек, пройденный в пласте АБ (БТШ-АБ), а также в блоковый конвейерный штрек 2.

Далее свежий воздух поступает в рабочие (отрабатываемые) камеры и после их проветривания удаляется в блоковые вентиляционные штреки 3, а затем – в панельный вентиляционный штрек.

Для простоты изложения, чтобы определить саму возможность изменения воздухораспределения при изменении концентрации газа в атмосфере добычного участка, примем следующие допущения:

- в горных выработках выделяется только метан;
- метан после выделения в камере (из шпуров, пробуренных под анкерную крепь и из очистного забоя) равномерно и в полном объеме уходит в транспортный штрек;
- температура воздуха постоянна и одинакова во всех выработках.

Методика расчета воздухораспределения между горными выработками, приведенная в работе [5], с учетом перечисленных дополнительных условий примет следующий вид.

Пусть добычной участок разбит на ряд участков, каждый из которых ограничен своим замкнутым контуром. При этом каждый из контуров состоит из нескольких ветвей (горных выработок), причем направление обхода по каждому из контуров выбирается произвольным образом, вне зависимости от направления потока воздуха в ветвях (рис. 2). К примеру, для участка, приведенного на рис. 2, порядок обхода будет следующим: 1, 10, 20, 11, 14. Здесь 1, 10, ..., 14 – номера ветвей.

За начало i -й ветви принимается точка входа в нее потока воздуха, а за ее конец – точка стока воздуха из ветви. Значение плотности воздуха в начале i -й ветви принимается равным $\rho_{1(i)}$, а в конце ветви – $\rho_{2(i)}$. Высотные отметки в начале каждой из ветвей обозначаются через $H_{1(i)}$, а в ее конце – $H_{2(i)}$. В соответствии с выбранным направлением обхода контура начальной ветвью будет являться ветвь 1, в которой направление движения воздуха условно принимается от точки $(\rho_{2(1)}, H_{2(1)})$ к точке $(\rho_{1(1)}, H_{1(1)})$. Аналогичным образом по направлению обхода выделенного контура по очереди рассматриваются все ветви выбранного контура, начиная с ветви 1 и до последней из них (т. е. до ветви 14). После замыкания контура с помощью условной ветви (рис. 2) величина естественной тяги в нем может быть определена по формуле:

$$h_c^j = 9,81 \sum_{i=1}^{n_j} \rho_i H_i,$$

где h_c^j – естественная тяга в j -м контуре, Па; ρ_i – средняя плотность воздуха в i -й ветви j -го контура, кг/м³; n_j – количество ветвей в j -м контуре; H_i – перепад высот по длине i -й ветви, м, который определяется как разность ее высотных отметок.

Перепад H_i высот между начальной и конечной точкой i -й ветви определяется по формуле:

$$H_i = H_{1(i)} - H_{2(i)}.$$

Значение средней плотности газозадушной смеси, ввиду принятых допущений, можно найти по следующей формуле:

$$\rho_{\text{выр}} = \frac{\rho_{\text{мет}} Q_{\text{мет}} + \rho_{\text{в}} Q_{\text{в}}}{Q_{\text{выр}}},$$

где $Q_{\text{мет}}$, $Q_{\text{в}}$ – объем выделяющегося метана и поступающего в выработку воздуха соответственно, м³/с; $Q_{\text{выр}}$ – объемный расход газозадушной смеси, перемещающейся по выработке, м³/с; $\rho_{\text{мет}}$, $\rho_{\text{в}}$ – плотность метана и воздуха соответственно, кг/м³.

Тогда, согласно второму закону вентиляционных сетей [11], для j -го контура получим следующее равенство:

$$\sum_{i=1}^{n_j} R_i Q_i^2 \text{sign}(Q_i) + h_c^j \text{sign}(h_c^j) = 0, \quad (1)$$

где R_i , Q_i – аэродинамическое сопротивление ($\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$) и расход воздуха (м³/с) в i -й ветви, входящей в j -й контур, соответственно.

Здесь

$$\text{sign}(Q_i) \begin{cases} +1, \text{ если направление воздушного потока в ветви} \\ \text{совпадает с направлением обхода контура;} \\ -1, \text{ если направление воздушного потока в ветви} \\ \text{противоположно направлению обхода контура;} \end{cases}$$

$$\text{sign}(h_c^i) \begin{cases} +1, \text{ если направление действия естественной тяги} \\ \text{противоположно направлению обхода контура;} \\ -1, \text{ если направление действия естественной тяги} \\ \text{совпадает с направлением обхода контура.} \end{cases}$$

Равенство (1) означает, что суммарная потеря энергии в j -м контуре (т. е. алгебраическая сумма падений всех депрессий по всем ветвям контура) равна нулю.

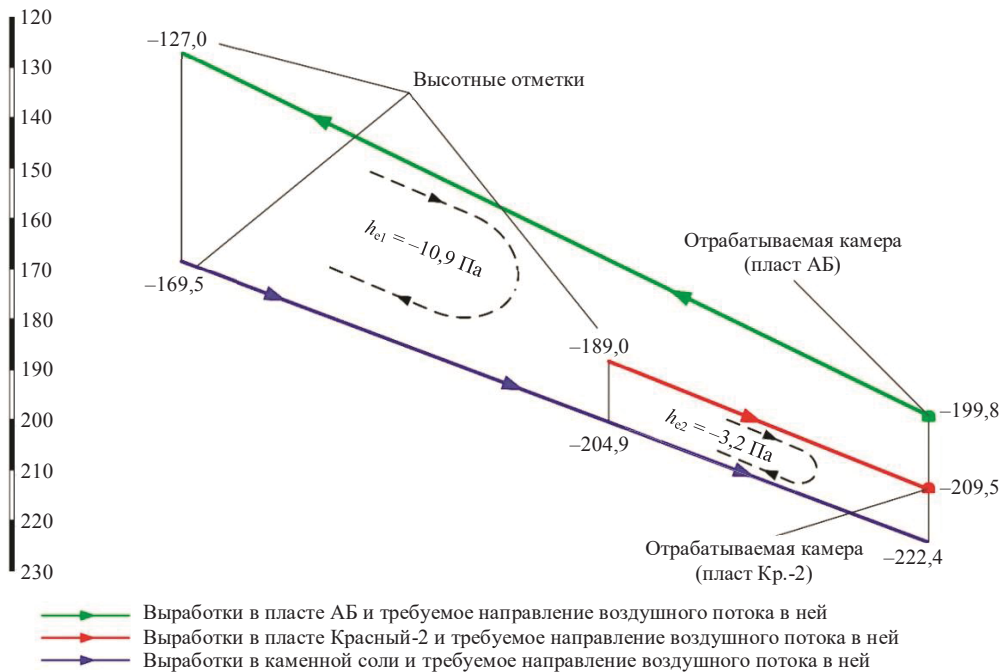


Рисунок 3. Профиль 1 СЗП рудника БКПРУ-4
Figure 3. Profile 1 the north-west panel (NWP) of BKPRU-4

Тогда расчет итогового значения естественной тяги в отдельном добычном участке сводится к алгоритму расчета совместной работы источников тяги в каждом из контуров, входящих в этот участок [5, 11]. Чтобы выяснить, каким образом на величину естественной тяги влияет ориентация добычного участка, расчеты проводились как для панелей, расположенных по падению пласта, так и для панелей, расположенных по восстанию пласта. При этом по отдельности каждый из блоков панели не рассматривался.

В работе выполнены расчеты для реальных добычных участков калийного рудника БКПРУ-4 (ПАО «Уралкалий», ВКМКС), параметры которых приведены в [5] (панель 1 СЗП и панель 8–9 ЮВП).

Среднее содержание метана в воздушной смеси, выходящей из пласта, принято в соответствии с данными, приведенными в работах [12–15].

В качестве добычного участка, ориентированного по падению пласта, рассматривалась северо-западная панель 1 СЗП рудника БКПРУ-4 (ПАО «Уралкалий»). Профиль панели построен на основании высотных отметок (рис. 3).

Расчетные значения естественной тяги, возникающей в добычном участке при выделении в камерах метана, обозначены следующим образом:

h_{e1} – величина естественной тяги, возникающей между транспортным штреком в пласте АБ и конвейерным штреком;

h_{e2} – величина естественной тяги, возникающей между транспортным штреком в пласте Красный-2 и конвейерным штреком.

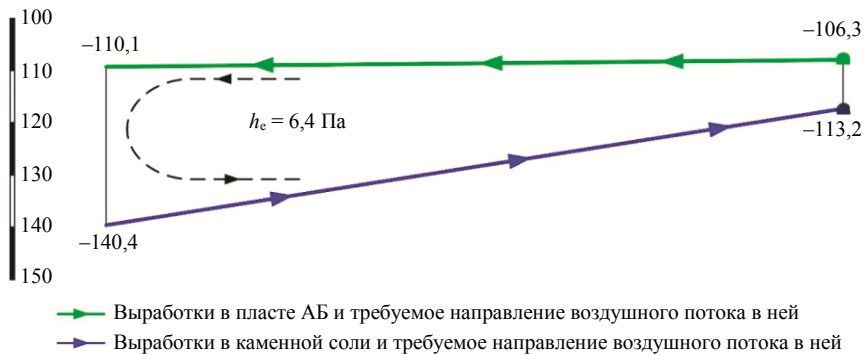


Рисунок 4. Профиль 8–9 ЮЗП рудника БКПРУ-4
Figure 4. Profile 8–9 the south-west panel (SWP) of BKPRU-4

В обоих случаях естественная тяга направлена навстречу требуемому направлению движения воздуха. Результирующее значение h_e величины естественной тяги, возникающей вследствие выделения метана, в добычном участке (панели 1 СЗП) составляет менее 10 % от потери общешахтной депрессии (167,3 Па). При этом, хотя тяга h_e не способна реверсировать поток в выработке, она явно осложняет подачу воздуха в панель, т. е. противодействует проветриванию.

В качестве панели, ориентированной по восстанию пласта, для расчетов использовалась юго-восточная панель 8–9 ЮВП рудника БКПРУ-4 (ПАО «Уралкалий»). Профиль панели приведен на рис. 4.

Как показано на рис. 4, расчетное значение естественной тяги в панели в целом составляет 6,4 Па, а направление ее действия совпадает с требуемым направлением движения воздуха. В этом случае возникающая из-за выделения метана дополнительная естественная тяга, хотя и в незначительной степени, способствует проветриванию рассматриваемой панели (8–9 ЮВП).

На основании выполненных расчетов установлено, что, при принятых допущениях, из-за выделения в обрабатываемых камерах метана между горными выработками возникает своя дополнительная естественная тяга. Полученные значения этой дополнительной тяги имеют небольшую величину. Однако ввиду малого аэродинамического сопротивления горных выработок калийных рудников даже небольшая по величине дополнительная тяга способна оказывать значимое влияние на воздухораспределение.

В реальных условиях количество газа, выделяемого на каком-либо из добычных участков, может значительно превышать расчетное среднестатистическое по рассматриваемому месторождению значение. Аналогичным образом величина падения общешахтной депрессии в добычном участке может значительно отли-

чаться от значений, полученных в рассмотренных случаях. Например, в панелях (блоках), расположенных на большом удалении от воздухоподающих стволов, величина падения может быть значительно меньше.

Модель процесса распространения метана в камере добычного участка при одиночном источнике метана. Результаты расчета. Известно, что основные источники выделения метана располагаются именно в рабочих камерах. К таким источникам относятся шпур, пробуренные под анкерную крепь, а также обнаженная порода в проходимой толще полезного ископаемого. В связи с этим необходимо рассмотреть процесс распространения метана в камере добычного участка.

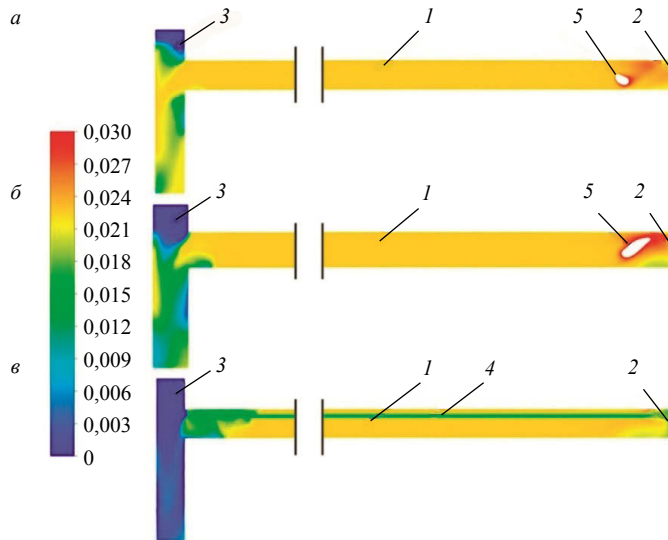


Рисунок 5. Распределение концентрации метана в горизонтальных сечениях тупиковой камеры:

a – сечение на высоте 2,7 м; *б* – сечение на высоте 1,5 м; *в* – сечение на высоте 0,3 м

Figure 5. The distribution of methane concentration in the horizontal sections of the blind room:

a – section at a height of 2.7 m; *б* – section at a height of 1.5 m; *в* – section at a height of 0.3 m

В качестве одиночного (точечного) источника выделения метана рассмотрен шпур, пробуренный в кровле камеры на расстоянии 10 м от забоя. Для оценки характера распределения метана в блоке рудника рассматривается тупиковая камера (проходимая, не имеющая соединения с вентиляционным штреком), примыкающая к блоковому транспортному штреку (рис. 5, где 1 – камера; 2 – забой; 3 – блоковый транспортный штрек; 4 – трубопровод; 5 – точечный источник выделения метана (шпур)). Воздух из транспортного штрека в забой камеры подается по воздуховоду при помощи вентилятора местного проветривания. Длина тупиковой камеры – 200 м, ширина – 5 м, высота – 3 м. Упрощенная форма сечения камеры представлена на рис. 5 и 6.

Математическая постановка задачи об определении концентрации метана в движущейся газовой среде включает осредненные по Рейнольдсу нестационарные уравнения Навье–Стокса, а также уравнение конвекции–диффузии. В расчетах с целью определения рейнольдсовых напряжений, для замыкания уравнений Навье–Стокса [16–20] использовалась модель турбулентности SST $k-\omega$ [21]. Численная реализация поставленной задачи осуществлялась с использованием программного пакета ANSYS Fluent.

Результаты моделирования приведены на рис. 5 и 6. На рис. 5 представлено распределение концентрации метана в различных сечениях, расположенных на разной высоте камеры 1.

На рис. 6 приведен фронтальный разрез камеры 1 (в вертикальном сечении), цифрой 2 обозначен забой; 3 – блоковый транспортный штрек; 4 – точечный источник выделения метана (шпур).

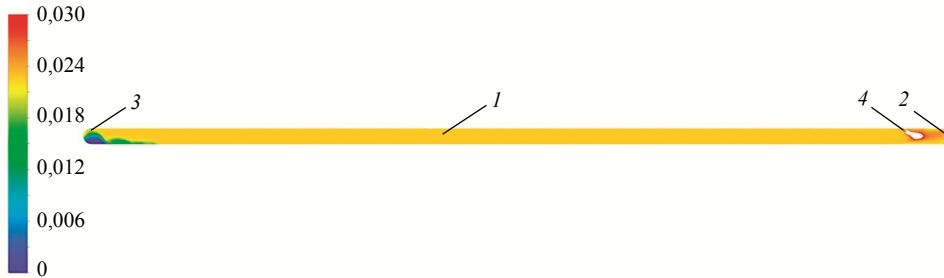


Рисунок 6. Распределение концентрации метана в вертикальном сечении камеры
Figure 6. The distribution of methane concentration in the vertical section of the room

В забое 2, куда принудительно из блокового транспортного штрека 3 от вентилятора местного проветривания через трубопровод 4 подается воздух, образуется вихрь, способствующий его перемешиванию с метаном, поступающим сверху из точечного источника 5 (рис. 5). Далее газозвдушная смесь движется в сторону транспортного штрека 3. При заданном расходе газа, поступающего из шпура, концентрация метана в смеси составляет немногим более 2 %.

В области сопряжения камеры 1 и транспортного штрека 3 происходит смешение газозвдушной смеси с воздушным потоком. Наблюдается выход метана в воздушный поток, который далее направляется в конвейерный штрек. При этом концентрация метана оказывается распределенной неравномерно по высоте сечения. В частности, наблюдаются зоны повышенной концентрации в верхней части выработки (рис. 6).

Результаты моделирования показали, что даже при таком незначительном источнике метана концентрация его в исходящей струе достигает 2 %. Следовательно, при более мощных источниках выделения метана появляется угроза повышения концентрации до взрывоопасных значений и попадания газозвдушной смеси в конвейерный штрек – потенциально пожароопасный участок.

Закключение. Выделяемые горным массивом в процессе добычи полезного ископаемого легкие газы (в том числе метан) инициируют появление дополнительной естественной тяги между горными выработками. В добычных участках, ориентированных по падению пласта, эта тяга направлена навстречу требуемому направлению движения воздуха в конвейерном штреке. Совместно с естественной тягой, возникающей при увеличении температуры воздуха в конвейерном штреке, в нем изменяется направление движения струи воздуха. В результате этого газозвдушная смесь из камеры поступает в конвейерный штрек, являющийся потенциально опасным по возможности возникновения в нем пожара.

Модельные расчеты показали, что даже при небольших выделениях газа из одиночного источника (шпура, пробуренного в кровле) концентрация газа в попадающей в конвейерный штрек смеси достигает 2 %. При больших значениях выделяемого газа возникает опасность достижения взрывоопасной концентрации в конвейерном штреке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каледина Н. О., Кобылкин С. С. Моделирование процессов вентиляции шахт для обеспечения метанобезопасности горных работ // Горный журнал. 2011. № 7. С. 101–103.
2. Пучков Л. А., Каледина Н. О. Динамика метана в выработанных пространствах угольных шахт. М.: МГГУ, 1995. 313 с.
3. Алыменко Н. И. Исследование и разработка методов и средств повышения эффективности и надежности проветривания подземных рудников с большим эквивалентным отверстием (на примере калийных рудников): дис. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 1998. 334 с.
4. Мохирев Н. Н. Разработка современных методов и средств обеспечения высокоэффективного проветривания рудников, обладающих малыми аэродинамическими сопротивлениями: дис. ... д-ра техн. наук. Пермь, 1994. 302 с.
5. Николаев А. В. Управление тепловыми депрессиями в системах вентиляции калийных рудников: дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2012. 159 с.
6. Алыменко Н. И., Николаев А. В. Расчет эквивалентного аэродинамического сопротивления подземной части проектируемого рудника для определения естественной тяги, действующей между стволами // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2010. № 12. С. 68–69.
7. Chang X. The transient-state simulation of mine ventilation systems. Michigan Technological University, 1987. 324 p.
8. Cheng J., Wu Y., Xu H., Liu J., Yang Y., Deng H., Wang Y. Comprehensive and integrated mine ventilation consultation model // Tunneling and Underground Space Technology. 2015. Vol. 45. P. 166–180.
9. Gendler S. G. The justification of new technique ventilation at contraction of working with two exits in soil surface // Eurasian Mining. 2016. No. 2. P. 41–44.
10. Aitao Z., Wang K. Role of gas ventilation pressure on the stability of airway airflow in underground ventilation // Journal of Mining Science. 2018. Vol. 54. No. 12. P. 111–119.
11. Мохирев Н. Н., Радько В. В. Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация. М.: Недра-Бизнесцентр, 2007. 324 с.
12. Чайковский И. И., Иванов О. В. Новые данные по геохимии газов калийных месторождений // Вестник Пермского университета. 2014. Вып. 4(25). С. 56–65.
13. Андрейко С. С., Галкин В. И., Шаманский Г. П. Некоторые особенности распределения углеводородных газов по разрезу Верхнекамского месторождения калийных солей // Разработка соляных месторождений: межвуз. сб. науч. тр. / Перм. политех. ин-т. Пермь, 1980. С. 82–87.
14. Андрейко С. С., Лукьянец Е. В. Анализ факторов газоносности и тектонического строения сальвинитовых пластов в надвиговых и сдвиговых зонах шахтных полей рудников БКПРУ-2 и БКПРУ-4 ПАО «Уралкалий» // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. № 6. С. 31–40.
15. Андрейко С. С., Лялина Т. А. Исследования газовыделений из геологоразведочных скважин на Верхнекамском месторождении калийных солей // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 2. С. 33–38.
16. Борисов В. Е., Рыков Ю. Г. Моделирование течений многокомпонентных газовых смесей с использованием метода двойного потока // Математическое моделирование. 2020. Т. 32. № 10. С. 3–20.
17. Горский В. В., Оленичева А. А. О применимости закона бинарной диффузии к расчету тепло- и массообмена в газовых смесях сложного химического состава // Теплофизика высоких температур. 2011. Т. 49. № 1. С. 69–72.
18. Обухова Е. В., Рагозина В. Е. О гиперболической теории массопереноса в двухкомпонентных несжимаемых смесях // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2006. № 4(128). С. 103–105.
19. Келбалиев Г. И., Расулов С. Р., Валиев Н. Г. Математическое моделирование процессов осаждения и всплытия твердых частиц, капель и пузырей в изотропном турбулентном потоке // Известия УГГУ. 2020. Вып. 4(60). С. 123–145. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-4-123-145
20. Косарев Н. П., Макаров В. Н., Угольников А. В., Матеров А. Ю., Макаров Н. В., Лифанов А. В. Критерии подобия гидровихревой локализации взрывов на горных предприятиях // Известия УГГУ. 2019. Вып. 3(55). С. 124–132. DOI: 10.21440/2307-2091-2019-3-124-132
21. Menter F. R. Two-equation Eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. Vol. 32. No. 8. P. 1598–1605.

Поступила в редакцию 22 июля 2021 года

Сведения об авторах:

Николаев Александр Викторович – доктор технических наук, доцент, доцент кафедры горной электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: nikolaev0811@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4601-5780>

Максимов Петр Викторович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: pvmperm@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3617-5617>

Лялькина Галина Борисовна – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: gblyalkina@mail.ru

Конотоп Данил Алексеевич – аспирант кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: konotopda@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4037-7294>

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-6-87-97

The effect of methane emission on air distribution in potash mine production units

Aleksandr V. Nikolaev¹, Petr V. Maksimov¹, Galina B. Lialkina¹, Danil A. Konotop¹

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia.

Abstract

Introduction. It has been found that due to light gas (including methane) emission in rooms under development, there develops an additional natural draught between the mine workings. The calculation has shown that methane emission from the rock mass conditions the low value of the additional natural draught. However, even minor additional natural draught interacting with a thermal drop of pressure caused by temperature rise in the conveyor shaft changes the direction of the delivery air stream. While in up the dip blocks and panels the resultant natural draught promotes ventilation, in the down the dip production units it prevents air circulation in the required direction.

Research methods. The methods and results of calculating the value and direction of the natural draught for real panels of potash mines at the Upper Kama potash deposit under various conditions have been presented together with the simulation observations of methane distribution in the room with a point source of emission.

Results. Model analysis has shown that even under the low amount of gas emission out of the point source in the blind room (of a hole drilled in the roof), the concentration of gas in the gas-air mixture entering the belt heading reaches 2%.

Conclusions. To ensure the safety of mining and reduce the risk of emergency when calculating the volume of air required to ventilate the production units, the dynamics of methane emission out of the rock mass should be taken into account as well as its further distribution across the mine workings.

Keywords: safety; methane; natural draught; air distribution.

Acknowledgements. The research has been funded by the Russian Foundation of Basic Research and the Perm region under scientific project no. 20-45-596025.

REFERENCES

1. Kaledina N. O., Kobytkin S. S. Simulation of pits ventilation processes for methane-safety providing during mining works. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2011; 7: 101–103. (In Russ.)
2. Puchkov L. A., Kaledina N. O. *The dynamics of methane in mine goafs*. Moscow: MSMU Publishing; 1995. (In Russ.)
3. Alymenko N. I. *Studying and developing the methods and means to improve the efficiency and reliability of ventilating the underground mines with a large equivalent orifice (by the example of potash mines): DSc in Eng. thesis*. St. Petersburg; 1998. (In Russ.)
4. Mokhired N. N. *Developing advanced methods and means of high-efficiency ventilation of mines with low air flow resistance: DSc in Eng. thesis*. Perm; 1994. (In Russ.)
5. Nikolaev A. V. *Controlling thermal drops of ventilation pressure in potash mines ventilation: PhD in Eng. thesis*. Perm; 2012. (In Russ.)
6. Alymenko N. I., Nikolaev A. V. Calculation of equivalent aerodynamic resistance of underground part of a projected mine to define natural draught operating between shafts. *Geologiya, geofizika i razrabotka nefitnykh i gazovykh mestorozhdenii = Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. 2010; 12: 68–69. (In Russ.)
7. Chang X. *The transient-state simulation of mine ventilation systems*. Michigan Technological University; 1987. 324 p.
8. Cheng J., Wu Y., Xu H., Liu J., Yang Y., Deng H., Wang Y. Comprehensive and integrated mine ventilation consultation model. *Tunneling and Underground Space Technology*. 2015; 45: 166–180.
9. Gendler S. G. The justification of new technique ventilation at contraction of working with two exits in soil surface. *Eurasian Mining*. 2016; 2: 41–44.
10. Aitao Z., Wang K. Role of gas ventilation pressure on the stability of airway airflow in underground ventilation. *Journal of Mining Science*. 2018; 54(12): 111–119.
11. Mokhired N. N., Radko V. V. *Engineering analysis of mine ventilation. Construction. Reconstruction. Operation*. Moscow: Nedra-Biznestsentr Publishing; 2007. (In Russ.)
12. Chaikovskii I. I., Ivanov O. V. New data on the geochemistry of gases in the potash deposits. *Vestnik Permskogo universiteta = Bulletin of Perm University. Geology*. 2014; 4(25): 56–65. (In Russ.)

13. Andreiko S. S., Galkin V. I., Shamanskii G. P. Some distinguishing features of hydrocarbon distribution along the section of the Upper Kama potash mine. In: *Salinas development: intercollegiate proceedings*. Perm: Perm Polytechnic Institute Publishing; 1980. p. 82–87. (In Russ.)

14. Andreiko S. S., Lukyanets E. V. Analysis of the factors of the gas content and the tectonic structure of silvinit banks in the overthrust and strike-slip belts of mine-fields of mine BKPRU-2 and BKPRU-4 PJSC Uralkaliy. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2017; 6: 31–40. (In Russ.)

15. Andreiko S. S., Lialina T. A. The analysis of gas emission out of geologic prospecting wells at Verkhnekamskoye deposit of potassium salts. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2017; 2: 33–38. (In Russ.)

16. Borisov V. E., Rykov Iu. G. Numerical simulation of multicomponent gas flows using double-flux method. *Matematicheskoe modelirovanie = Mathematical Models and Computer Simulations*. 2020; 32(10): 3–20. (In Russ.)

17. Gorskii V. V., Olenicheva A. A. Validity of the binary diffusion law in calculating heat and mass transfer in gas mixtures with complex chemical composition. *Teplofizika vysokikh temperatur = High Temperature*. 2011; 49(1): 69–72. (In Russ.)

18. Obukhova E. V., Ragozina V. E. About hyperbolic theory of mass transfer in two-component mixtures. *Vestnik Dalnevostochnogo otdeleniia Rossiiskoi akademii nauk = Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2006; 4(128): 103–105. (In Russ.)

19. Kelbaliev G. I., Rasulov S. R., Valiev N. G. Mathematical modeling of sedimentation processes and surfacing of solids, droplets and bubbles in an isotropic turbulent flow. *Izvestiia Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta = News of the Ural State Mining University*. 2020; 4(60): 123–145. Available from: doi: 10.21440/2307-2091-2020-4-123-145 (In Russ.)

20. Kosarev N. P., Makarov V. N., Ugolnikov A. V., Materov A. Iu., Makarov N. V., Lifanov A. V. Similarity parameters for hydro-vortex blast isolation in mining enterprises. *Izvestiia Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta = News of the Ural State Mining University*. 2019; 3(55): 124–132. Available from: doi: 10.21440/2307-2091-2019-3-124-132 (In Russ.)

21. Menter F. R. Two-equation Eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994; 32(8): 1598–1605. (In Russ.)

Received 22 July 2021

Information about authors:

Aleksandr V. Nikolaev – DSc (Engineering), Associate Professor, associate professor of the Electrical Engineering Department, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: nikolaev0811@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4601-5780>

Petr V. Maksimov – PhD (Engineering), Associate Professor, associate professor of the Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: pvmperm@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3617-5617>

Galina B. Lialkina – DSc (Physico-mathematical Sciences), Professor, professor of the Department of Civil Defense, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: gblyalkina@mail.ru

Danil A. Konotop – PhD student, Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: konotopda@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4037-7294>

Для цитирования: 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. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-6-87-97

For citation: Nikolaev A. V., Maksimov P. V., Lialkina G. B., Konotop D. A. The effect of methane emission on air distribution in potash mine production units. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 6: 87–97 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-6-87-97