

Оценка адекватности математических моделей и зависимостей распределения газовой смеси в пределах тупиковой выработки калийного рудника*

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-10-60-65>

НИКОЛАЕВ А.В.

Доктор техн. наук, доцент,
профессор кафедры
«Горная электромеханика» ПНИПУ,
614990, г. Пермь, Россия,
e-mail: nikolaev0811@mail.ru

МАКСИМОВ П.В.

Канд. техн. наук,
доцент кафедры «Вычислительная математика,
механика и биомеханика» ПНИПУ,
614990, г. Пермь, Россия,
e-mail: pvtpermt@mail.ru

ЗЕМСКОВ А.Н.

Доктор техн. наук, доцент,
заместитель генерального директора ООО «ПТУР»
по инновациям и международному сотрудничеству,
614000, г. Пермь, Россия,
e-mail: permtzem28@mail.ru

КОНОТОП Д.А.

Аспирант кафедры «Вычислительная математика,
механика и биомеханика» ПНИПУ,
614990, г. Пермь, Россия,
e-mail: konotopda@gmail.com

КУИМОВ С.А.

Главный специалист
АО «ВНИИ Галургии»,
614002, г. Пермь, Россия

БАРТОЛОМЕЙ М.Л.

Канд. техн. наук,
старший научный сотрудник
АО «ВНИИ Галургии»,
614002, г. Пермь, Россия

Интенсификация выемки калийных руд, широкое применение высокопроизводительных комбайновых комплексов, вовлечение в отработку газоносных пластов поставили перед разработчиками ряд новых и сложных проблем. Способом, исключая (снижая) ошибки работников вентиляционных служб рудников при отборе проб и оценке газовой опасности, является способ имитационной (математической) модели переноса газовой смеси в системе горных выработок. С этой целью была разработана имитационная модель, позволяющая определить характер распределения газов по горным выработкам и их концентрацию. С использованием созданной компьютерной модели переноса газовой смеси определены основные закономерности распределения метана в выработанном пространстве в процессе проветривания тупиковых выработок. Произведенная в работе сравнительная оценка реальных измеренных данных с данными, полученными в ходе математического моделирования, показала высокую степень сходимости. При этом установлено, что полученные при отборе проб значения соответствуют среднему значению концентрации газа по сечению выработки. Учитывая, что газ по сечению распределяется неравномерно, применяемую методику оценки газовой обстановки в горных выработках необходимо изменять с учетом газовой стратификации.

Ключевые слова: метан, газы, проветривание, безопасность, тупиковая выработка, моделирование, вычислительная газодинамика, газоздушная смесь.

Для цитирования: Оценка адекватности математических моделей и зависимостей распределения газовой смеси в пределах тупиковой выработки калийного рудника / А.В. Николаев, П.В. Максимов, А.Н. Земсков и др. // Уголь. 2022. № 10. С. 60-65. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-10-60-65.

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

ВВЕДЕНИЕ

Уровень безопасности подземных горнодобывающих предприятий напрямую зависит от эффективности проветривания подземных горных выработок [1, 2, 3, 4, 5]. Особое значение этот процесс имеет для шахт и рудников, опасных по выделению газа. При проходе тупиковых выработок, где происходит интенсивное выделение газа, от процесса проветривания зависит безопасность ведения горных работ.

Определить характер загазованности горной выработки можно путем проведения измерений непосредственно в шахте или руднике или расчетным путем. В первом случае необходимо производить отбор проб непосредственно в горных выработках. Ввиду того, что этот процесс является трудо- и времязатратным, особенно в силу характера своей периодичности, получать оперативно информацию о газовой обстановке в забое тупиковой выработки предлагается с использованием методов математического моделирования [6, 7, 8, 9], при этом, параметрами моделей являются данные по текущей обстановке в выработках [10]. В связи с этим необходимо понять, какими математическими моделями и зависимостями можно пользоваться для расчета загазованности выработок, насколько они точны, и определить их зависимость от технологического процесса (скорости проходки выработки, времени остановок комбайнового комплекса и транспортировки добытой руды, количества пробуренных дренажных шпуров и т.д.).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проветривание добычного участка калийного рудника производится по схеме, представленной на рис. 1. Воздух в добычной участок поступает по панельному транспортному штреку, разделяясь на потоки: одна часть поступает в блоковый транспортный (выемочный) штрек, другая – по уклону в блоковый конвейерный штрек.

Тупиковая выработка (камера) проветривается при помощи вентилятора местного проветривания (ВМП), который по трубопроводу направляет часть воздуха из блокового транспортного (выемочного) штрека в забой. После проветривания тупиковой выработки воздух вновь поступает в блоковый транспортный (выемочный) штрек и затем через отработанные камеры удаляется сначала в блоковый вентиляционный штрек и далее в панельный вентиляционный штрек.

Также в вентиляционный штрек по уклону поступает воздух из блокового конвейерного штрека.

В связи с тем, что наиболее интенсивно горючие газы выделяются в проходимых тупиковых выработках, отборы проб производятся в добычных участках, где производится их проходка.

Ввиду сложности состава горючих газов и большой взрывоопасности водорода и тяжелых углеводородных газов, по сравнению с метаном, все газы приводят к условному метану по формуле [11, 12]:

$$n_{\text{CH}_4 \text{ усл}} = n_{\text{CH}_4} + 2n_{\text{H}_2} + 2,5n_{\text{C}_n\text{H}_{2n+2}} \quad (1)$$

где n – объемы выделений удельных газов; n_{CH_4} – концентрация метана; n_{H_2} – удвоенная концентрация двухатомно-

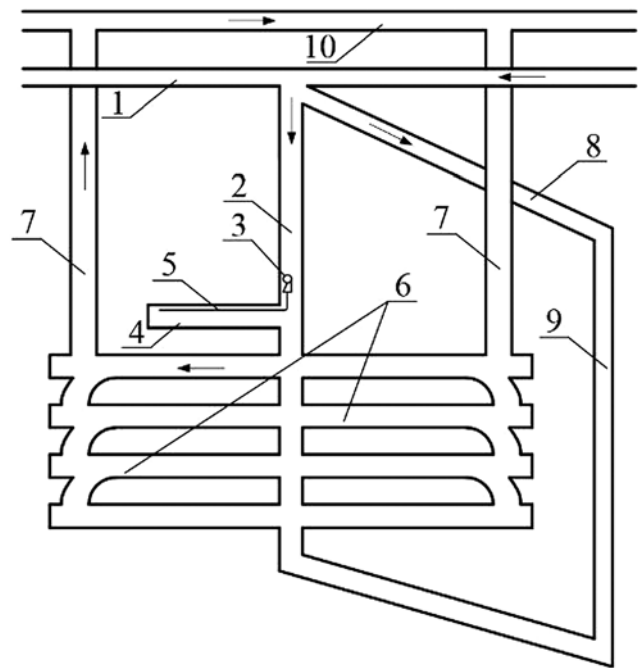


Рис. 1. Схема проветривания добычного участка калийного рудника: 1 – панельный транспортный штрек; 2 – блоковый транспортный (выемочный) штрек; 3 – вентилятор местного проветривания (ВМП); 4 – тупиковая выработка (камера); 5 – трубопровод; 6 – отработанные камеры; 7 – блоковый вентиляционный штрек; 8 – уклон; 9 – блоковый конвейерный штрек; 10 – панельный вентиляционный штрек

Picture 1. Scheme of ventilation of the mining area of a potash mine: 1 – panel drift; 2 – block transport (excavation) drift; 3 – local ventilation fan; 4 – dead-end working (chamber); 5 – pipeline; 6 – used cameras; 7 – block ventilation drift; 8 – slope; 9 – block conveyor drift; 10 – panel ventilation drift

го водорода; 2 и 2,5 – коэффициенты, учитывающие активность водорода и предельных углеводородов [11].

Определение газообильности включает измерение количества воздуха, поступающего в выработку, и отбор проб воздуха для определения содержания в нем горючих газов. В соответствии с [13, 14] отбор проб воздуха производится на входящей и исходящей струях на расстоянии не менее 20-30 м от места непосредственного ведения работ. Число проб воздуха, отбираемых на исходящих струях при любых технологических операциях должно быть не менее трех. На входящей струе достаточно отобрать одну пробу. Порядок производства замеров концентрации горючих газов следующий:

- производится замер концентрации горючих газов в свежей струе воздуха, поступающей на проветривание рабочей зоны; замер производится перед ВМП, но не далее 10 м от места его установки;

- производится три замера концентрации горючих газов в вентиляционном штреке рабочей зоны.

Для сравнительной оценки реальных измеренных данных с данными, полученными в ходе математического моделирования, были произведены замеры на одном из калийных рудников Верхнекамского месторождения

Химический состав рудничного воздуха и значения относительной газообильности в рабочих зонах калийного рудника ВКМКС

Наименование рабочей зоны	Пласт	Струя	Сумма горючих газов, % об $2(\text{H}_2) + \text{CH}_4$	CH_4	H_2	H_2S	CO	CO_2	O_2	N_2	Прочие газы
Западный блок (1 ПОГУ**)	Кр. II	Вход.	0,0395	0,0337	0,0029	0	0,0015	0,0730	20,20	79,00	0,65
	Кр. II	Исход.	0,0897	0,0830	0,0034	0	0,0017	0,078	20,18	79,00	0,56
Газообильность по условному метану рабочей зоны ($\text{м}^3/\text{т}$) = 0,0715											
Восточный блок (1 ПОГУ)	АБ	Вход.	0,0385	0,0365	0,0010	0	0,0014	0,064	20,71	79,00	0,15
	АБ	Исход.	0,0922	0,0868	0,0027	0,0000409	0,0016	0,059	20,65	79,00	0,11
Газообильность по условному метану рабочей зоны ($\text{м}^3/\text{т}$) = 0,0242											
Западный блок (2 ПОГУ)	АБ	Вход.	0,0117	0,0102	0,0007	0	0,0011	0,062	20,60	79,00	0,31
	АБ	Исход.	0,0286	0,0267	0,0010	0,0000225	0,0013	0,069	20,55	79,00	0,32
Восточный блок (2 ПОГУ)	Вс	Вход.	0,0280	0,0264	0,0008	0	0,0011	0,058	20,70	79,00	0,19
	Вс	Исход.	0,0478	0,0460	0,0009	0,0000246	0,0012	0,060	20,60	79,00	0,24

Газообильность по условному метану рабочей зоны ($\text{м}^3/\text{т}$) = 0,0306.

** ПОГУ – Подземный очистной горный участок.

калийно-магниевого состава (ВКМКС). Измерения проводились на трех пластах: Красный II (Кр. II), АБ и Вс (В силивникового состава).

Результаты замеров приведены в таблице.

Представленные в таблице результаты замеров в выработках по пласту Кр. II калийного рудника ВКМКС соответствуют рабочей зоне рудника, в которой изменение газообильности происходит вследствие выделения метана и его гомологов (далее – метана) с поверхности вскрытой породы. Концентрация метана, измеренная на входящей струе, составила величину 0,0337 процента, на исходящей струе – 0,0830 процента, разница в концентрациях, обусловленная процессом дополнительного выделения метана в тупиковой выработке, составила 0,0492 процента (для выбранного в качестве исследуемого Западного блока).

Далее оценим изменение концентрации метана в транспортном (выемочном) штреке с использованием созданной модели массопереноса газа в области тупиковой выработки и в зоне ее примыкания к транспортному штре-

ку. В качестве причины повышения концентрации метана в исследуемой области рассматривается истечение метана в выработанное пространство с обнаженной поверхности выработки. Массовый расход в процессе выделения метана пропорционален площади обнаженной поверхности выработки.

Математическая постановка задачи включает уравнение неразрывности, уравнение импульса, соотношения для модели турбулентности SST k- ω [15], конвективно-диффузионные соотношения. Конфигурация расчетной области представлена на рис. 2.

В качестве краевых условий в модели задается расход воздуха 10 кг/с с нулевым содержанием метана на входе в зону 3, а также нулевое избыточное давление на выходе из зоны 4. ВМП рассматривается как локальный источник повышенного давления, характеристика вентилятора описывается кусочно-линейным законом по точкам, взятым из паспорта устройства [16]. Поступление газо-воздушной смеси в выработанное пространство задается в виде граничных условий Неймана, наложенных на всю поверхность стен тупиковой камеры (массовый поток). Поставленная задача решается численно с использованием инженерной CAE-системы общего назначения ANSYS Fluent. При решении задачи используется расчетная методика динамического наложения (Dynamic Layering Method), обеспечивающая автоматическую генерацию расчетной сетки в области с изменяемыми границами. Используется связанный решатель на основе давления (pressure-based solver в ANSYS Fluent), который решает систему газодинамических уравнений для скоростей и давлений одновременно как единую систему. Используемая степень дискретизации системы, а также выбранные алгоритмы и методы решения обеспечивают сходимость получаемых результатов по абсолютному критерию на уровне ниже $1 \cdot 10^{-6}$.

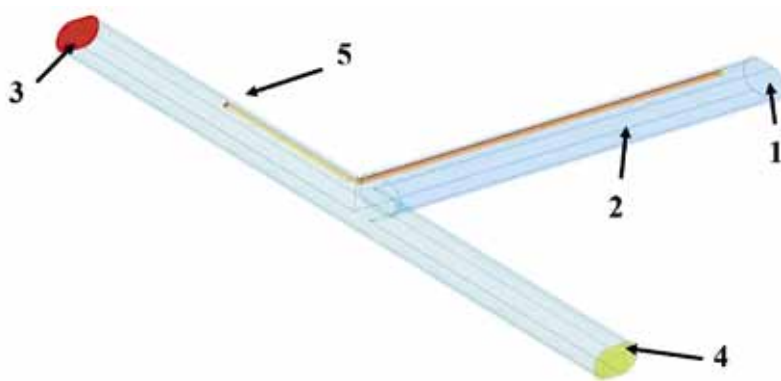


Рис. 2. Конфигурация расчетной области: 1 – забой; 2 – тупиковая выработка; 3 – входящая струя; 4 – исходящая струя; 5 – вентилятор местного проветривания

Picture 2. Computational domain configuration: 1 – face; 2 – dead-end working; 3 – incoming flow; 4 – outgoing flow; 5 – local ventilation fan

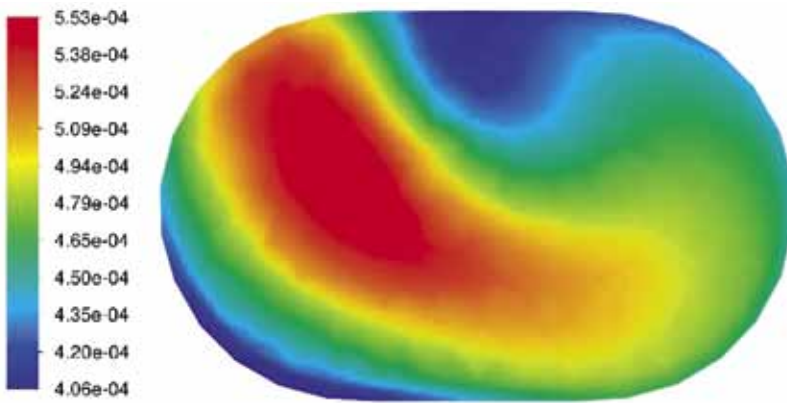


Рис. 3. Распределение концентрации метана в исходящей струе в крайнем сечении на выходе расчетной области (длина выработки – 200 м)

Picture 3. Distribution of methane concentration in the outgoing flow in the extreme section at the outlet of the computational domain (length of working – 200 m)

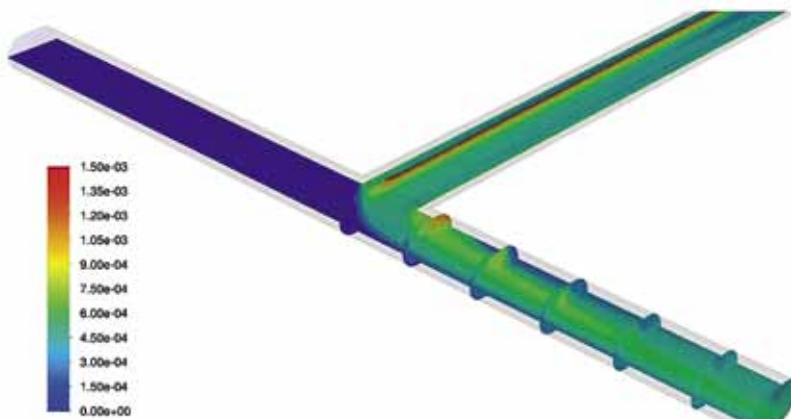


Рис. 4. Распределение концентрации метана в различных сечениях исходящей струи (длина выработки – 200 м)

Picture 4. Distribution of methane concentration in different sections of the outgoing flow (length of working – 200 m)

Определенная в процессе численного моделирования для заданной, исходя из рассматриваемых физических условий, интенсивности поверхностного выделения метана со стенок тупиковой выработки средняя концентрация метана в области 4 составила 0,0483 процента, что соответствует результатам замеров, представленных в таблице для выбранного в качестве исследуемого Западного блока калийного рудника пласта Кр.II.

На рис. 3 представлено распределение метана в исходящей струе в крайнем сечении на выходе расчетной области (см. зону 4, рис. 2).

Наблюдается неоднородное распределение газовой смеси по сечению – в силу достаточно малого расстояния от места попадания воздушной смеси из тупиковой выработки в транспортный штрек процессы перемешивания воздушных потоков и их объединение не завершены. Кроме того, на рис. 4 представлено распределение метана в различных сечениях исходящей струи.

В процессе моделирования определено, что высокая концентрация метана на выходе из тупиковой камеры характерна для верхней части сечения около кровли. Попадая в транспортный штрек, газозвушное облако начинает движение в исходящей струе, при этом наблюдается повышенная концентрация метана в области низкой скорости потока. Распыление облака в исходящей струе происходит, но не интенсивно, положение газозвушного облака (зоны с высокой концентрацией метана) зависит от расстояния до забоя тупиковой выработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в работе результаты численного моделирования процесса массопереноса газозвушной смеси в тупиковой камере и в месте ее примыкания к транспортному (выемочному) штреку свидетельствуют о том, что:

- в условиях выделения газов с обнаженной поверхности выработки не наблюдается ярко выраженного массового скопления метана около кровли тупиковой выработки, в отличие от точечного истечения метана (например, из шпура в кровле выработки) [17, 18, 19, 20];

- при поступлении газозвушной смеси в транспортный штрек не происходит активного разжижения газового облака в исходящей струе. На рассматриваемых масштабах и длинах выработок наблюдается неравномерное распределение метана в сечениях транспортного штрека;

- характер распределения метана в сечениях на расстоянии 20-30 м от места примыкания тупиковой выработки к транспортному штреку свидетельствует о возможной неточности определения компонентов состава рудничного воздуха, полученного методом отбора проб непосредственно в горной выработке, так как способ выполнения работниками службы вентиляции требования равномерного заполнения емкости для отбора пробы рудничного воздуха по сечению выработки слабо формализован в регламентирующих документах и зависит исключительно от действий самого работника. Контроль состава воздуха на значительном удалении от тупиковой выработки, где воздушная среда становится гомогенизированной по составу, порой представляется невозможным, так как для оценки безопасности работ в руднике необходимо оценивать массоперенос метана с учетом взаимного влияния всех элементов добычного участка, в том числе в блоке с уже отработанными камерами и далее в блоковом вентиляционном штреке, находящихся в непосредственной близости от тупиковой выработки;

– целесообразна формализация методики сбора рудничного воздуха, учитывающей реальную картину возду-

– целесообразна формализация методики сбора рудничного воздуха, учитывающей реальную картину возду-

хораспределения в зависимости от условий в руднике, параметров реализуемых технологических процессов. Созданная имитационная модель оценки переноса метана может составить математическую и программную основу методики оперативного контроля степени загазованности воздушной среды в добычном участке.

Примечание: изложенные в настоящей статье подходы к оценке газовой опасности и их реализация для условий калийных рудников во многом могут быть использованы для условий угольных шахт.

Список литературы

1. Забурдяев В.С., Харченко А.В. Метановая опасность высокопроизводительных угольных шахт // Горный журнал. 2022. № 3. С. 58-63.
2. Wei J.P., Wang H.L., Wang D.K., Yao B.H. An improved model of gas flow in coal based on the effect of penetration and diffusion // Journal of China University of Mining & Technology. 2016. Vol. 45. No 5. P. 873-878.
3. Effect of protective coal seam mining and gas extraction on gas transport in a coal seam / B. Yao, Q. Ma, J. Wei et al. // International Journal of Mining Science and Technology. 2016. Vol. 26. No 4. P. 637-643.
4. Вибрационное воздействие через скважины и технология дегазационной подготовки низкопроницаемого угольного пласта / М.В. Павленко, Н.Г. Барнов, Д.А. Кузиев и др. // Уголь. 2020. № 1. С. 36-40. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-1-36-40.
5. Факторы воздействия комбайна при добыче угля на увеличение метаноотдачи массива в рабочее пространство лавы / М.В. Павленко, М.П. Хайдина, Д.А. Кузиев и др. // Уголь. 2019. № 4. С. 8-11. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-4-8-11.
6. Tutak M., Brodny J. Analysis of the Impact of Auxiliary Ventilation Equipment on the Distribution and Concentration of Methane in the Tailgate // Energies. 2018. Vol. 11. No 11. P. 3076.
7. Investigations of ventilation airflow characteristics on a longwall face – a computational approach / Z. Wang, T. Ren, L. Ma et al. // Energies. 2018. Vol. 11. No 6. P. 1564.
8. Krawczyk J. A preliminary study on selected methods of modeling the effect of shearer operation on methane propagation and ventilation at longwalls // International Journal of Mining Science and Technology. 2020. Vol. 30. No 5. P. 675-682.
9. Brodny J., Tutak M. Applying computational fluid dynamics in research on ventilation safety during underground hard coal mining: A systematic literature review // Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 151. P. 373-400.
10. Прогнозирование геомеханического состояния массива при отработке соляных месторождений с закладкой / Я. Рыбак, М.М. Хайрутдинов, Д.А. Кузиев и др. // Записки Горного института. 2022. Т. 253. С. 61-70.
11. Земсков А.Н., Кондрашев П.И., Травникова Л.Г. Природные газы калийных месторождений и меры борьбы с ними. Пермь: Типография купца Тарасова, 2008. 412 с.
12. Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых: приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 8 декабря 2020 года № 505. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности.
13. Инструкция по аэрологической безопасности угольных шахт: приказ от 8 декабря 2020 года № 506. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности.
14. Медведев И.И., Красноштейн А.Е. Аэрология калийных рудников. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. 249 с.
15. Menter F.R. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective // International Journal of Computational Fluid Dynamics. 2009. Vol. 23. No 4. P. 305-316.
16. Мохирев Н.Н., Радько В.В. Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация. М.: ООО Недр-Бизнесцентр, 2007. 324 с.
17. Земсков А.Н., Полянина Г.Д., Красюк Н.Ф. Определение размеров зоны разрушения пород вокруг шпура. В Межвузовском сборнике научных трудов: Разработка соляных месторождений. Пермь: ПермПИ, 1980. С.169-174.
18. Земсков А.Н. О факторах, определяющих режим газовой выделения в шпуры. В Межвузовском сборнике научных трудов: Разработка калийных месторождений. Пермь: ПермПИ, 1989. С.121-126.
19. Влияние процесса выделения метана на воздухораспределение в добычных участках калийных рудников / А.В. Николаев, П.В. Максимов, Г.Б. Лялькина и др. // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 6. С. 87-97.
20. The results of air treatment process modeling at the location of the air curtain in the air suppliers and ventilation shafts / A. Nikolaev, N. Alymenko, V. Nikolaev et al. // E3S Web of Conferences. 2017. Vol. 15. pp. 02004.

Original Paper

UDC 622.831+502.604 © A.V. Nikolaev, P.V. Maksimov, A.N. Zemskov, D.A. Konotop, S.A. Kuimov, M.L. Bartolomey, 2022
 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2022, № 10, pp. 60-65
 DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-10-60-65>

Title

ASSESSMENT OF THE ADEQUACY OF MATHEMATICAL MODELS AND DEPENDENCES OF THE DISTRIBUTION OF THE GAS-AIR MIXTURE WITHIN THE DEAD-END DEVELOPMENT OF A POTASSIUM MINE

Authors

Nikolaev A.V.¹, Maksimov P.V.¹, Zemskov A.N.², Konotop D.A.¹, Kuimov S.A.³, Bartolomey M.L.³

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation

² «PTUR» LLC, Perm, 614000, Russian Federation

³ «VNII GALURGI» JSC, Perm, 614002, Russian Federation

MINE VENTILATION

Authors information

Nikolaev A.V., Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of the Mining Electromechanics Department, e-mail: nikolaev0811@mail.ru

Maksimov P.V., PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics, e-mail: pvmperm@mail.ru

Zemskov A.N., Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Deputy General Director for Innovation and International Cooperation, e-mail: permzem28@mail.ru

Konotop D.A., Postgraduate student of the Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics, e-mail: konotopda@gmail.com

Kuimov S.A., Chief Specialist

Bartolomey M.L., PhD (Engineering), Senior Researcher

Abstract

The intensification of the extraction of potash ores, the widespread use of high-performance combine complexes, and the involvement in the development of gas-bearing formations posed a number of new and complex problems for the developers. A method that eliminates (reduces) errors of mine ventilation service workers when sampling and assessing gas hazards is a method of simulating (mathematical) model of gas-air mixture transfer in the mine workings system. For this purpose, a simulation model was developed to determine the nature of the distribution of gases in mine workings. Using the created computer model of the process of transferring the gas-air mixture, the main regularities of the distribution of methane in the mined-out space during the ventilation of dead-end workings were determined. The comparative evaluation of real measured data with the data obtained in the course of mathematical modeling, carried out in the work, showed a high degree of convergence. At the same time, it was found that the values obtained during sampling correspond to the average value of the gas concentration over the working section. Considering that the gas is unevenly distributed over the cross section, the applied method for assessing the gas situation in mine workings must be changed taking into account gas stratification.

Keywords

Methane, Gases, Ventilation, Safety, Blind working, Modeling, Computational gas dynamics, Gas-air mixture

References

- Zaburdaev V.S. & Kharchenko A.V. Methane hazard in high-performance coal mines. *Gornyi Zhurnal*, 2022, (3), pp. 58-63. (In Russ.)
- Wei J.P., Wang H.L., Wang D.K. & Yao B.H. An improved model of gas flow in coal based on the effect of penetration and diffusion. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, (45), pp. 873-878.
- Yao B., Ma Q., Wei J., Ma J. & Cai D. Effect of protective coal seam mining and gas extraction on gas transport in a coal seam. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016, (26), pp. 637-643.
- Pavlenko M.V., Barnov N.G., Kuziev D.A., Kenzhabaev K.N. & Monzoev M.V. Vibration impact through wells and the technology of degassing of the preparation of low-permeability coal seam. *Ugol'*, 2020, (1), pp. 36-40. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2020-1-36-40.
- Pavlenko M.V., Khaidina M.P., Kuziev D.A., Pihorinskiy D. & Muratov A.Z. Impacts of the combine harvester in the production of coal to increase methane recovery array in the workspace lava. *Ugol'*, 2019, (4), pp. 8-11. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2019-4-8-11.
- Tutak M. & Brodny J. Analysis of the Impact of Auxiliary Ventilation Equipment on the Distribution and Concentration of Methane in the Tailgate. *Energies*, 2018, (11), pp. 3076.

- Wang Z., Ren T., Ma L. & Zhang J. Investigations of ventilation airflow characteristics on a longwall face – a computational approach. *Energies*, 2018, (11), pp. 1564.
- Krawczyk J. A preliminary study on selected methods of modeling the effect of shearer operation on methane propagation and ventilation at longwalls. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2020, (30), pp. 675-682.
- Brodny J. & Tutak M. Applying computational fluid dynamics in research on ventilation safety during underground hard coal mining: A systematic literature review. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, (151), pp. 373-400.
- Rybak J., Khayrutdinov M.M., Kuziev D.A., Kongar-Syuryun C.B. & Babyr N.V. Prediction of the geomechanical state of the rock mass when mining salt deposits with stowing. *Zapiski Gornogo instituta*, 2022, (253), pp. 61-70. (In Russ.)
- Zemskov A.N., Kondrashev P.I. & Travnikova L.G. Natural gases of potash deposits and measures to combat them. Perm, Tipografiya kuptsa Tarasova Publ., 2008, 412 p. (In Russ.)
- Safety rules for mining operations and processing of solid minerals: order of the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision dated December 8, 2020. No. 505. Federal norms and rules in the field of industrial safety. (In Russ.)
- Instructions for the aerological safety of coal mines: order dated December 8, 2020 No. 506. Federal norms and rules in the field of industrial safety. (In Russ.)
- Medvedev I.I. & Krasnoshtein A.E. Aerology of potash mines. Sverdlovsk, Ural'skoye otdeleniye akademii nauk SSSR Publ., 1990, 249 p. (In Russ.)
- Menter F.R. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 2009, (23), pp. 305-316.
- Mokhiev N.N. & Radko V.V. Engineering calculations of mine ventilation. Construction. Exploitation. Moscow, OOO Nedra-Biznestsentr Publ., 2007, 324 p. (In Russ.)
- Zemskov A.N., Polyana G.D. & Krasnyuk N.F. Determining the size of the rock destruction zone around the hole. In *Razrabotka solyanykh mestorozhdeniy*. Perm, PermPI Publ., 1980, pp.169-174. (In Russ.)
- Zemskov A.N. On the factors determining the regime of gas release into boreholes. In *Razrabotka solyanykh mestorozhdeniy*. Perm, PermPI Publ., 1989. pp. 121-126. (In Russ.)
- Nikolaev A.V., Maksimov P.V., Lyalkina G.B. & Konotop D.A. The effect of methane emission on air distribution in potash mine production units. *Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal*, 2021, (6), pp. 87-97. (In Russ.)
- Nikolaev A., Alymenko N., Kamenskih A. & Nikolaev V. The results of air treatment process modeling at the location of the air curtain in the air suppliers and ventilation shafts. *E3S Web of Conferences*, 2017, (15), 7 p.

Acknowledgements

The reported study was funded by RFBR and Perm Territory, project number 20-45-596025.

For citation

Nikolaev A.V., Maksimov P.V., Zemskov A.N., Konotop D.A., Kuimov S.A. & Bartolomey M.L. Assessment of the adequacy of mathematical models and dependences of the distribution of the gas-air mixture within the dead-end development of a potassium mine. *Ugol'*, 2022, (10), pp. 60-65. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-10-60-65.

Paper info

Received June 20, 2022

Reviewed July 18, 2022

Accepted September 26, 2022