

Научная статья

УДК 533.6:622.4

doi: 10.17223/19988621/79/7

Моделирование вентиляции угольных шахт с учетом выработанных пространств

Григорий Александрович Колегов¹, Алексей Юрьевич Крайнов²

^{1, 2} Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ zergferr@gmail.com

² akrainov@ftf.tsu.ru

Аннотация. Выработанные пространства угольных шахт являются важным элементом шахтных вентиляционных сетей. В статье представлены результаты расчетов аэродинамики проветривания выработанных пространств с использованием разработанного метода включения выработанных пространств угольных шахт в математические модели шахтных вентиляционных систем посредством представления пористой среды сетью фиктивных ветвей, учитывающих свойства элементарных репрезентативных объемов. Аэродинамические параметры фиктивных ветвей вычисляются с использованием квадратичных сопротивлений, соблюдая законы Кирхгофа. Используется адаптированная формула Эргуна для расчета сопротивлений ветвей выработанных пространств. Разработанный метод задания аэродинамического сопротивления выработанного пространства был применен для оценки градиентов давления в выбранном выработанном пространстве шахты «Распадская». Проведено моделирование различных сценариев изменения аэродинамических параметров вентиляционной системы с оценкой распределения избыточных давлений в выработанном пространстве.

Ключевые слова: вентиляция, вентиляционная сеть, математическая модель, выработанное пространство, аэродинамическое сопротивление

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 21-71-10034.

Для цитирования: Колегов Г.А., Крайнов А.Ю. Моделирование вентиляции угольных шахт с учетом выработанных пространств // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 79. С. 78–88. doi: 10.17223/19988621/79/7

Original article

Simulation of the coal mine ventilation with account for gob areas

Grigoriy A. Kolegov¹, Aleksey Yu. Krainov²

^{1,2} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ zergferr@gmail.com

² akrainov@ff.tsu.ru

Abstract. Mine ventilation network models are widely used in underground coal mining in Russia. The models cover a variety of practical problems ranging from simple air distribution in active mine workings to changes in the static air pressure gradient associated with complex technological or hazardous processes occurring in mines. Isolated gob areas are integral parts of ventilation networks in coal mines. The most commonly used underground coal extraction technology in Russia is the longwall mining. A gob forms when a coal seam is extracted, and the upper layers of the rock cave in. Gobs are isolated from active mine entries with seals, but there is always air leakages from active faces inducing the air circulation in isolated areas. Gobs join different coal seams and often become the sources of underground fires. Therefore, the inclusion of gobs in mine ventilation network models would help contain accidents and eliminate the caused damage. The study uses the method of representative elementary volumes to incorporate a porous medium into mine ventilation network models. Quadratic resistances are assigned to the edges of the model, where Kirchhoff's laws are valid. The aerodynamic resistances of the gob edges are calculated using the Ergun equation. The proposed method has been used to evaluate pressure gradients in the gob area of the Rapsadskaya mine. Several scenarios of the aerodynamic resistance variation in the active mine workings surrounding the gob area, such as partial flooding and drilling of boreholes from the surface, have been simulated, and the corresponding changes in pressure gradients have been analyzed.

Keywords: ventilation, mine ventilation network, mathematical model, gob, aerodynamic resistance

Acknowledgments: This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 21-71-10034).

For citation: Kolegov, G.A., Krainov, A.Yu. (2022) Simulation of the coal mine ventilation with account for gob areas. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 79. pp. 78–88. doi: 10.17223/19988621/79/7

Введение

Математическое моделирование является неотъемлемой частью современных производственных процессов. Моделирование шахтовой вентиляции позволяет организовать проветривание рабочих участков угольных шахт, дегазацию рудничной атмосферы, решает задачи обеспечения объектов проветривания требуемыми расходами воздуха, разработки планов ликвидации аварий. От качества моделей зависит эффективность мероприятий, разрабатываемых на их основе. В настоящее время выработанные обрушенные пространства угольных шахт не учитываются в моделях шахтной вентиляционной сети (ШВС). Однако разрабо-

танные пространства угольных шахт являются постоянными источниками метана, и учет их в некоторых ситуациях организации добычи угля критически важен.

Настоящая работа посвящена теме применения метода включения выработанных пространств в модели шахтных вентиляционных систем. Выработанные пространства представляют собой пористые среды, проветривающиеся в основном в фильтрационном режиме. В работах [1–3] проводится моделирование выработанных пространств методами вычислительной гидродинамики, и постулируется неверность применения квадратичных сопротивлений для описания свойств этих сред. Тем не менее единственным применяющимся в инженерной практике инструментом моделирования ШВС являются программные комплексы, в частности наиболее распространенный на предприятиях угледобычи «Вентиляция 2» [4]. Сеть выработок шахты и вентиляционные системы представляются связными графами, в которых соблюдаются законы сетей (нулевая сумма входящих в узел и исходящих из него объемных расходов и нулевая сумма депрессий замкнутого контура), а также закон сохранения энергии (суммарная потеря энергии в контуре равна поступающей энергии источников).

При этом депрессия i -й ветви в контуре определяется в соответствии с выражением

$$h_i = R_i Q_i^2, \quad (1)$$

где Q_i – объемный расход в ветви i , м³/с; R_i – аэродинамическое сопротивление ветви i , н·с²/м⁸; h_i – перепад давления (депрессия) в ветви i , Па.

В работе [5] используется формула Эргуна для определения аэродинамического сопротивления в обрушенном выработанном пространстве. В [5] оценивается влияние ламинарной и турбулентной составляющих при определении аэродинамического сопротивления, делается вывод о возможности расчета удельных сопротивлений ветвей в виде:

$$R_{уд} = \frac{28\rho(1-\varepsilon)}{\pi^2 d_s^5 \varepsilon^3} \quad (2)$$

где ρ – плотность газа, кг/м³, ε – пористость среды, дол. ед., d_s – эквивалентный диаметр структурных элементов среды выработанного обрушенного пространства, м, $R_{уд}$ – удельное сопротивление ветви на 1 м, н·с²/м⁹.

В [5] дано описание метода учета аэродинамических параметров выработанных пространств в моделях ШВС, представлены результаты верификации этого подхода с использованием перепадов давлений на изолирующих выемочный участок перемычках в качестве контрольных параметров.

Настоящая работа посвящена применению метода [5] к включению выработанных пространств угольных шахт в математические модели ШВС и анализу результатов решения практических задач рудничной аэродинамики.

Учет изменения распределения пористости в выработанном обрушенном пространстве

В [5] представлено распределение пористостей и давлений в выработанном пространстве лавы 5а-7-34 шахты «Распадская» (рис. 1, 2). Пористость изменялась от 0.6 до 0.2 по направлению от очистного забоя к монтажной камере, а эквивалентный диаметр структурных элементов варьировал соответственно от 2.5

до 2 м. Выработанное пространство формируется при движении очистного забоя от монтажной камеры возле фланговых уклонов блока 5 (левая часть рисунков) к уклонам блока 4 (правая часть), на рисунках приведена горизонтальная проекция выработок шахты. Ширина выемочного столба составляет 305 м, а длина зоны выработанного пространства (расстояние монтажной камеры до очистного забоя) составляет 1 664 м.

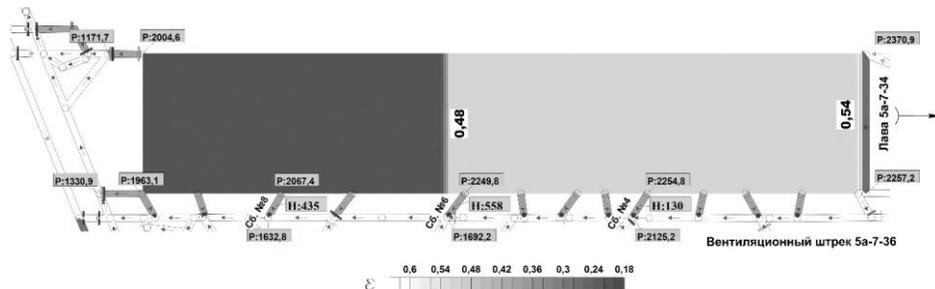


Рис. 1. Распределение пористости вдоль выемочного столба
 Fig. 1. Porosity distribution in a gob

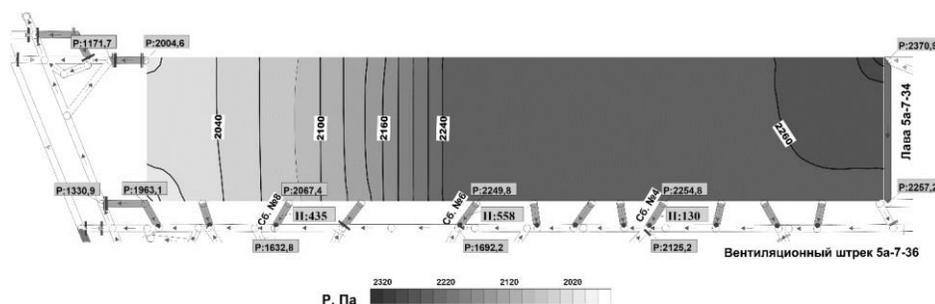


Рис. 2. Распределение избыточных давлений вдоль выемочного столба
 Fig. 2. Excess pressure distribution in a gob

В работе [1] приведено распределение коэффициента проницаемости в выработанном пространстве выемочного столба, полученное на основании моделирования геомеханических процессов. Используя уравнение Кармана–Козени [6] для расчета коэффициента проницаемости разрыхленных пород с учетом их постепенного уплотнения, вычислим распределение пористости по длине выемочного столба:

$$K = \frac{K_0}{0,241} \left(\frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \right), \quad (3)$$

где K – коэффициент проницаемости, Д, K_0 – коэффициент проницаемости обрушенных и уплотненных пород, Д. Приняв максимальный коэффициент проницаемости в [1] за проницаемость уплотненных пород, полагаем $K_0 = 1\ 000$. В табл. 1 приведены значения коэффициентов проницаемости, принятых в соответствии с [1], и соответствующие им значения пористости.

Значения коэффициентов проницаемости и соответствующая им пористость

Коэффициент проницаемости, Д	Пористость, дол. ед.
100	0.24
170	0.28
240	0.30
310	0.32
380	0.34
450	0.36
520	0.37
590	0.38
660	0.39
730	0.40
800	0.41

На рис. 3 представлено распределение пористости в выработанном обрушенном пространстве, рассчитанное по данным [1] с использованием формулы (3). Эквивалентные диаметры структурных элементов принимались в соответствии с [5].

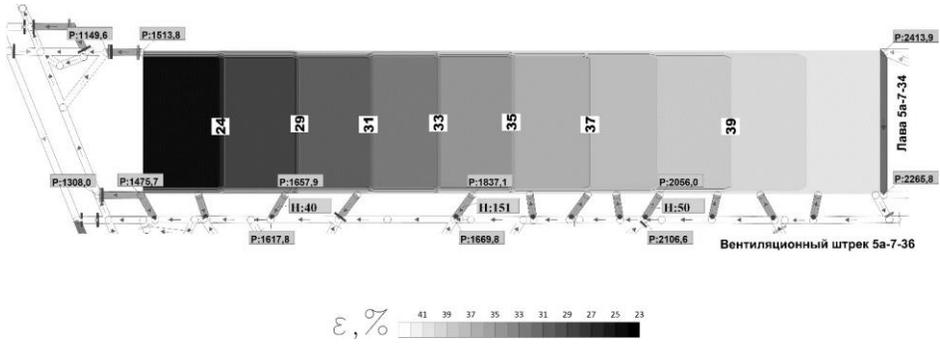


Рис. 3. Распределение пористости вдоль выемочного столба на основании геомеханического моделирования
 Fig. 3. Geomechanical model-based gob porosity distribution

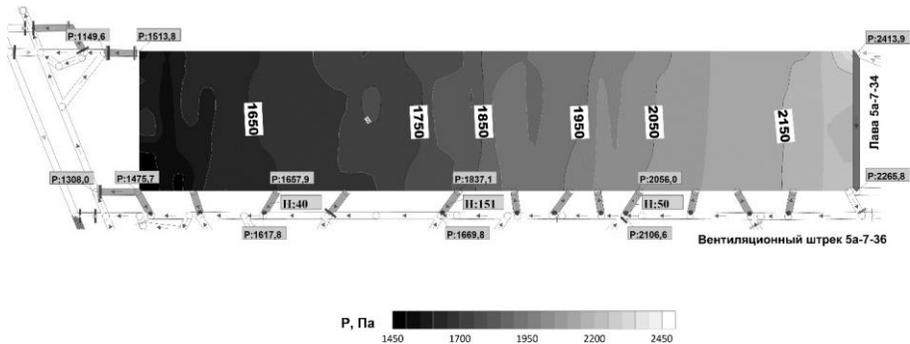


Рис. 4. Распределение избыточных давлений при расчете пористости на основании геомеханического моделирования
 Fig. 4. Excess pressure distribution in a gob corresponding to a geomechanical model-based porosity distribution

По выражению (2) были вычислены удельные аэродинамические сопротивления ветвей выработанного пространства. С использованием метода [5] и программы «Вентиляция 2» [4], полагая расход воздуха в вентиляционном штреке 5а-7-34 перед сопряжением с лавой равным $50.5 \text{ м}^3/\text{с}$ и сопротивления действующих выработок известными, было рассчитано распределение давления в выработанном обрушенном пространстве, представленное на рис. 4. Будем этот вариант проветривания называть «штатным».

Расчетное распределение давлений, представленное на рис. 4, соответствует распределению давления в пределах выемочного участка, полученного авторами в [1].

Моделирование сценариев изменений в ШВС

1. Увеличение аэродинамического сопротивления сквозной выработки в результате ее подтопления

Рассмотрим вариант увеличения сопротивления ветви вентиляционного штрека 5а-7-36 до $1 \text{ н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$, что соответствует уменьшению свободного поперечного сечения до 1.3 м^2 . Подобная ситуация может возникнуть в результате обрушения либо затопления части выработки, повторяющей чашеобразное залегание пласта (мульдовой части), при неисправности насосных установок и переполнении водосборника. На рис. 5 продемонстрировано расположение частично подтопленного участка относительно выемочного столба 5а-7-34. На рис. 6 показано привносимое в модель дополнительное сопротивление в виде перемычки в ветви № 6246.

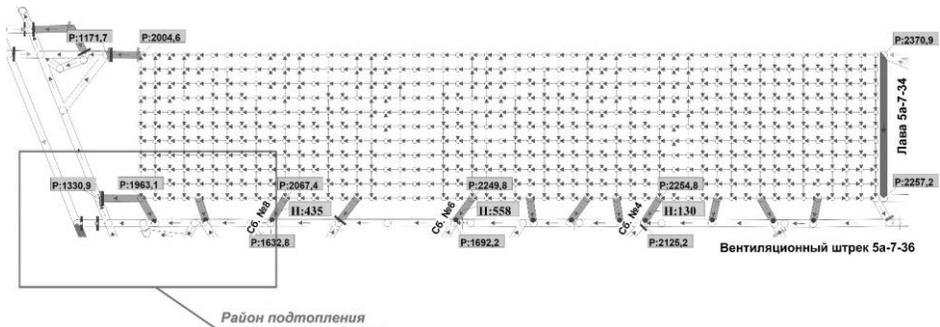


Рис. 5. Расположение участка подтопления

Fig. 5. Partially flooded area location

Данный сценарий частично имитирует ход аварии, произошедшей на шахте «Распадская» 10 мая 2018 г, когда произошло возгорание метана в очистном забое 5а-7-32. После снятия электроэнергии с аварийного участка была нарушена работа участков водосточников по лаве 5а-7-32(2), в результате чего произошло частичное подтопление вентиляционного штрека 5а-7-34 между сбойками № 6 и № 9. Вычисление распределения градиента избыточного давления в выработанном пространстве и действующих выработках требовалось для разработки рациональных мероприятий по организации проветривания аварийного участка.

В моделируемом варианте распределение избыточных давлений в выработанном пространстве выемочного столба 5а-7-34, установившееся после подтопления

мульдовой части вентиляционного штрека 5а-7-36, приведено на рис. 7. Избыточное давление в действующих выработках в моделируемой ситуации изменяется с 3 166 до 307 Па, при этом в выработанном пространстве выемочного столба избыточное давление варьирует от 3 147 до 285 даПа. Как видно из рис. 7, возрастает абсолютное значение избыточного давления в выработанном пространстве, при этом распределение падений давления вдоль выемочного столба остается неизменным. Распределение перепадов давлений и утечек через изоляционные перемычки в сбойках, отделяющих выработанное пространство от действующих выработок, приведено в табл. 2.

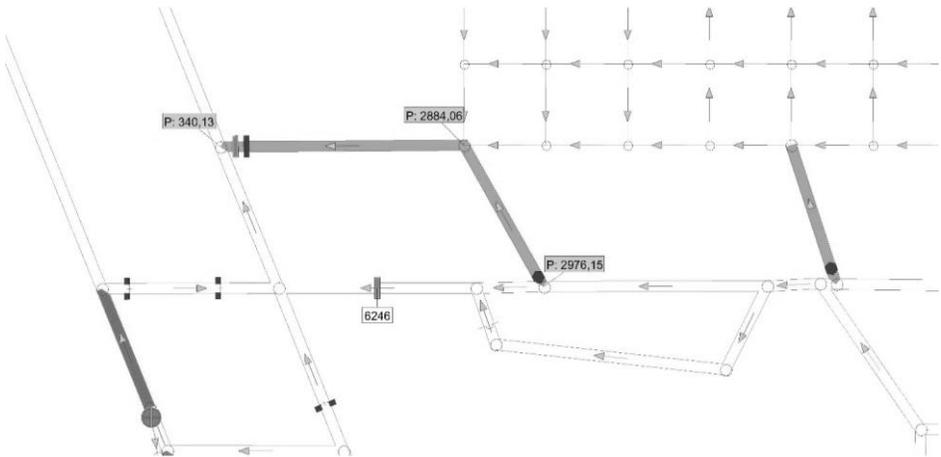


Рис. 6. Моделирование изменения сопротивления в действующей выработке
Fig. 6. Modeling of the resistance variation in an active airway

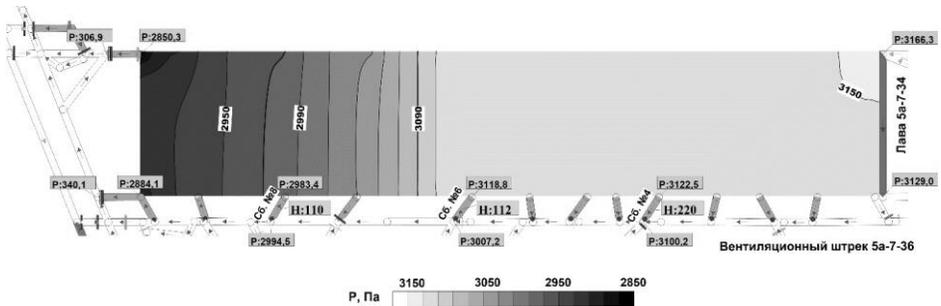


Рис. 7. Распределение давления в изолированном пространстве выемочного столба после подтопления вентиляционного штрека 5а-7-36
Fig. 7. Pressure distribution in an insulated gob after partial flooding of a ventilation entry 5а-7-36

Результаты моделирования показывают, что максимальное избыточное давление в выработанном пространстве лавы 5а-7-34 в результате частичного подтопления вентиляционного штрека 5а-7-36 возрастает на 39%, при этом перепады давления по длине столба снизятся на 68%. Утечка через перемычку в сбойке № 8 изменит свое направление, утечки через остальные перемычки снизятся на 80%, что позволяет говорить о вероятности изменения направления всех утечек при

увеличении зоны подтопления, и это в сочетании со снижающимся количеством воздуха, поступающего для проветривания выемочного участка, может быть условием формирования взрывоопасных метановоздушных концентраций в изолированных пространствах.

Таблица 2

Распределение перепадов давлений и расходов на изоляционных перемычках, обконтуривающих выемочный столб после подтопления части вентиляционного штрека 5а-7-36

Название	Расход, м ³ /с	Депрессия, Па	Изменение относительно «штатного» варианта, Па	Изменение относительно «штатного» варианта, %
Сбойка № 4	0.10	22	108	83%
Сбойка № 6	0.23	112	446	80%
Сбойка № 8	-0.07	11	446	103%

Такое предположение формируется исходя из факта активного поступления кислорода из действующих выработок через сбойки, в которых утечки изменили свои направления, а также из-за потери возможности контроля состава атмосферы в выработанном пространстве, поскольку на датчиках системы станций контроля параметров атмосферы (СКПА) начинает отображаться состав рудничного воздуха в действующем контуре. Полученная модель ШВС, включающая в себя выработанное пространство, может быть использована для разработки мероприятий по снижению вентиляционных напоров в действующих выработках до значений, позволяющих контролировать состав атмосферы в выработанном пространстве посредством утечек через изоляционные перемычки в сбойках.

2. Учет аэродинамической связи с атмосферой через контрольно-профилактические скважины

Рассмотрим вариант возникновения аэродинамической связи с поверхностью через контрольно-профилактические скважины, пробуренные в выработанное пространство лавы 5а-7-34. Расположение скважин представлено на рис. 8.

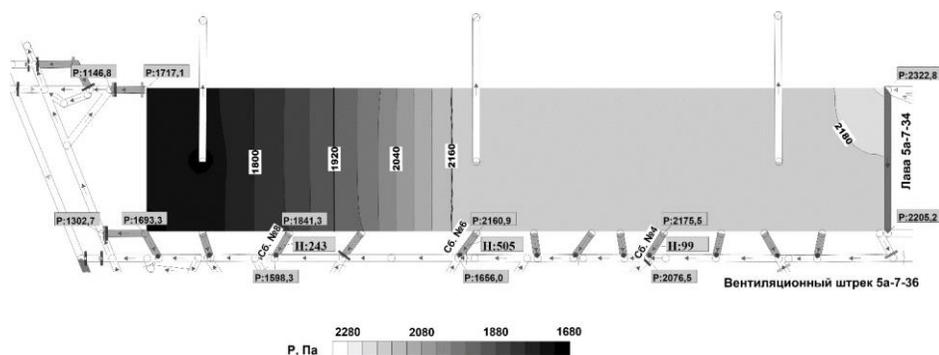


Рис. 8. Распределение давления в изолированном пространстве выемочного столба 5а-7-34 после пробуривания трех контрольно-профилактических скважин
Fig. 8. Pressure distribution in an insulated gob 5а-7-34 after three control boreholes drilling

Для скважин диаметром 0.5 м были рассчитаны суммарные сопротивления на основании справочных удельных значений, учитываемых в комплексе «Вентиляция 2». На рис. 8 приведено распределение избыточных давлений, устанавливающихся в выработанном пространстве лавы 5а-7-34 после добавления в модель «штатного» варианта трех контрольно-профилактических скважин.

В рассматриваемом варианте избыточное давление в действующих выработках, оконтуривающих выемочный столб, уменьшилось и стало изменяться в пределах от 2 323 до 1 147 Па. Избыточное давление внутри изолированного выработанного пространства изменяется в пределах от 2 260 до 1 693 Па, что на 359 Па, или на 39%, меньше значений давлений в «штатном». Распределение перепадов давлений и утечек через изоляционные перемычки в сбоях, отделяющих выработанное пространство от действующих выработок, приведено в табл. 3.

Таблица 3

Распределение перепадов давлений и расходов на изоляционных перемычках, оконтуривающих выемочный столб после пробуривания контрольно-профилактических скважин в выработанное пространство

Название	Расход, м ³ /с	Депрессия, Па	Изменение относительно «штатного» варианта, Па	Изменение относительно «штатного» варианта, %
Сбойка № 4	0.21	99	31	24%
Сбойка № 6	0.48	505	53	9%
Сбойка № 8	0.33	243	192	44%

Из анализа результатов расчетов можно сделать вывод, что наличие связи с атмосферой незначительно снижает избыточные давления внутри выработанного пространства с характеристикой пористости 0.5. Проведенные расчеты показали, что обустройство скважин в выработанное пространство с пористостью 0.2 снижает избыточное давление на 40%. Этот результат позволяет предполагать, что при известных характеристиках формирования выработанного пространства возможно моделирование оптимального расположения скважин. Другим возможным применением может быть моделирование связей с выработками выше- и нижележащих пластов с целью регулирования избыточных давлений в выработанных обрушенных пространствах.

Заключение

Выполненные расчеты вариантов изменения вентиляционной сети, предполагавшие подтопление части действующей выработки в непосредственной близости от изолированного пространства, бурение контрольно-профилактических скважин, продемонстрировали соответствующие увеличения и снижения избыточных давлений в выработанном пространстве при сохранении направления градиента, определяемого распределением пористости вдоль выемочного столба.

Разработанный метод учета выработанных пространств в моделях шахтных вентиляционных систем при расчете проветривания угольных шахт можно использовать для моделирования возможных причин фактического изменения направлений и значений перепадов давлений на перемычках, изолирующих выработанное пространство. Показано, что распределение пористости в выработанном

обрушенном пространстве возможно определять с использованием геомеханического моделирования, позволяющего определить коэффициенты проницаемости.

Список источников

1. Говорухин Ю.М., Фрянов В.Н., Палеев Д.Ю. Численное моделирование взаимодействующих геомеханических и аэродинамических процессов на выемочном участке // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. Вып. 2. С. 288–299.
2. Домрачев А.Н., Криволапов В.Г., Палеев Д.Ю., Балаганский М.Ю. Методология моделирования фильтрации газозвудушных смесей в выработанном пространстве // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2011 № 1. С. 72–76.
3. Палеев Д.Ю., Балаганский М.Ю., Кнышенко А.Н. О численном методе решения стационарной задачи проветривания горных выработок и выработанного пространства шахты // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2010. № 1. С. 31–34.
4. Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю. Программа расчета вентиляционных режимов в шахтах и рудниках // Горная промышленность. 2007. № 6. С. 20–23.
5. Колегов Г.А., Крайнов А.Ю. Метод учета аэродинамических пространств в моделях шахтных вентиляционных систем // Уголь. 2021 № 7. С. 33–38
6. Говорухин Ю.М. Разработка метода оценки параметров воздухо-распределения для снижения скорости окислительных процессов в выработанном пространстве угольных шахт : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Кемерово, 2012. 21 с

References

1. Govorukhin Yu.M., Fryanov V.N., Paleev D.Yu. (2019) Chislennoe modelirovanie vzaimodeystvuyushchikh geomekhanicheskikh i aerodinamicheskikh protsessov na vyemochnom uchastke [Numerical modeling of geomechanical and aerodynamical interacting processes in longwall panel]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle. – News of the Tula State University. Sciences of Earth.* 2. pp. 288–299.
2. Domrachev A.N., Krivolapov V.G., Paleev D.Yu., Balaganskiy M.Yu. (2011) Metodologiya modelirovaniya fil'tratsii gazovozdushnykh smesey v vyrabotannom prostranstve vyemochnogo uchastka [Modeling methods of air-gas mixtures filtration in the gob area of a coal extraction section]. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti – Industrial Safety.* 1. pp. 72–76.
3. Paleev D.Yu., Balaganskiy M.Yu., Knyshenko A.N. (2010) O chislennom metode resheniya statsionarnoy zadachi provetrivaniya gornyx vyrabotok i vyrabotannogo prostranstva shakhty [About numerical method of mine gob and working area ventilation stationary problem solution]. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti – Industrial Safety.* 1. pp. 31–34.
4. Paleev D.Yu., Lukashov O.Yu. (2007) Programma rascheta ventilyatsionnykh rezhimov v shakhtakh i rudnikakh [Program for calculation of mine ventilation conditions]. *Gornaya promyshlennost' – Russian Mining Industry.* 6. pp. 20–23.
5. Kolegov G.A., Krainov A.Yu. (2021) Metod ucheta aerodinamicheskikh prostranstv v modelyakh shakhtnykh ventilyatsionnykh sistem [Method to account for aerodynamic parameters of mined-out spaces in models of mine ventilation systems]. *Ugol' – Russian Coal Journal.* 7. pp. 33–38. doi: 10.18796/0041-5790-2021-7-33-38
6. Govorukhin Yu.M. (2012) *Razrabotka metoda otsenki parametrov vozdukhoraspredeleniya dlya snizheniya skorosti okislitel'nykh protsessov v vyrabotannom prostranstve ugol'nykh shakht* [Development of a method for estimating air distribution parameters to reduce the oxidization rate in a gob of coal mines]. Extended abstract of dissertation, Kemerovo.

Сведения об авторах:

Колегов Григорий Александрович – аспирант физико-технического факультета Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: zergferr@gmail.com

Крайнов Алексей Юрьевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой математической физики Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

Information about the authors:

Kolegov Grigoriy A. (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: zergferr@gmail.com

Krainov Aleksey Yu. (Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

Статья поступила в редакцию 23.06.2022; принята к публикации 03.10.2022

The article was submitted 23.06.2022; accepted for publication 03.10.2022