

Метод учета аэродинамических параметров выработанных пространств в моделях шахтных вентиляционных систем*

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2021-7-33-38>

КОЛЕГОВ Г.А.

Аспирант кафедры математической физики
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский государственный университет» (ТГУ),
634050, г. Томск, Россия,
e-mail: zergferr@gmail.com

КРАЙНОВ А.Ю.

Заведующий кафедрой математической физики
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский государственный университет» (ТГУ),
634050, г. Томск, Россия,
e-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

Выработанные пространства угольных шахт являются важным элементом рудничных вентиляционных сетей. В статье предложен метод 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 предлагается вычислять с использованием квадратичных сопротивлений, соблюдая законы Кирхгофа. Обоснован и верифицирован способ расчета аэродинамических сопротивлений ветвей выработанных пространств согласно формуле Эргуна. Разработанный метод задания аэродинамического сопротивления выработанного пространства был применен для оценки градиентов давления в выбранном выработанном пространстве шахты «Распадская», для которого имеются измеренные значения перепадов давления. Приведены результаты расчетов. Определена практическая значимость полученных результатов, обозначены пути дальнейшего развития методологии.

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

Для цитирования: Колегов Г.А., Крайнов А.Ю. Метод учета аэродинамических параметров выработанных пространств в моделях шахтных вентиляционных систем // Уголь. 2021. № 7. С. 33-38. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-7-33-38.

ВВЕДЕНИЕ

Математическое моделирование является неотъемлемой частью современных производственных процессов. Моделирование шахтовой вентиляции решает задачи как организации обеспечения объектов проветривания требуемыми расходами воздуха, так и разработки планов ликвидации аварий. От качества моделей зависит эффективность мероприятий, разрабатываемых на их основе. Качество определяется условиями и объектами, учитываемыми моделями, а также соответствием вводных данных и получаемых результатов фактически наблюдаемой ситуации в шахте. Помимо этого, инструменты и методы моделирования, широко применяемые на горнодобывающих предприятиях, должны обладать достаточной простотой при сохранении определенного уровня точности и не быть требовательными к вычислительным мощностям. Программный комплекс «Вентиляция 2» [1], наиболее распространенный на Российских предприятиях подземной угледобычи, соответствует этим требованиям, позволяя пользователю решать широкий спектр задач аэродинамики в масштабах шахтной вентиляционной сети (ШВС). В программном обеспечении (ПО) [1] вентиляционные сети представлены связным ориентированным графом, в котором 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. 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 , кмюрг; h_i – перепад давления (депрессия) в ветви i , даПа.

Выражение (1) называют квадратичным законом сопротивления, описывающим движение воздушных потоков по горным выработкам при развитом турбулентном режиме [1]. В таком подходе величину сопротивления определяют геометрические формы каналов, и не учитываются вязкие трения слоев потока. Аэродинамические со-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания № 0721-2020-0036.

противления определяются прямыми замерами во время воздушно-депресссионных съёмок, а также расчетным путем на основании экстраполяции коэффициентов аэродинамических сопротивлений, полученных эмпирическим путем для характерных типов выработок.

Выработанные пространства угольных шахт, применяющих столбовую систему разработки с полным обрушением, представляют собой пористые среды, в которых преобладают фильтрационные режимы движения газов [2]. Определение аэродинамических параметров выработанных пространств является задачей, решавшейся с момента возникновения рудничной вентиляции как научного направления [3]. На современном этапе преобладает подход к их расчету с использованием средств вычислительной гидродинамики [4, 5, 6, 7, 8]. Данный подход обеспечивает точность вычислений, учитывает взаимодействие выработанного пространства с ШВС в виде данных, задаваемых на основании одноразовых измерений и не позволяет оперативно учитывать изменяющиеся условия в шахте [6]. Существуют исследования, позволяющие учитывать аэродинамику в выработанных пространствах, рассчитываемую методами конечных объемов, в модели ШВС [9, 10]. Однако такие подходы требуют значительных вычислительных мощностей. В настоящей работе представлен метод расчета аэродинамики в выработанном пространстве совместно с расчетом аэродинамики проветривания сети выработок шахты.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Для возможности включения выработанного пространства в существующие средства моделирования ШВС необходимо определить метод описания пористой среды выработанных пространств ветвями связанных графов. Для перехода от трехмерной задачи фильтрации потоков через каналы переменного сечения и пространственной ориентации обрушенной среды используем подход репрезентативного элементарного объема, описанный Теруелом и Аддином [11], представленный на рис. 1.

Полагается, что зона L формируется из участков D , характеризующихся вариациями размеров структурных элементов выработанного пространства и расстояний между ними p . Предположим, что один элементарный участок D с усредненными по нему характеристиками пористости и эквивалентного диаметра структурного элемента может быть представлен ветвью в модели ШВС.

В работе [4] сопротивление движению потока в остаточных каналах выработанного пространства задано формулой Эргуна:

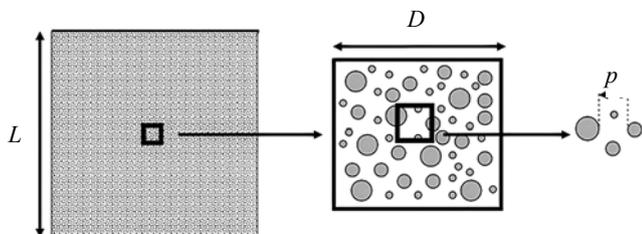


Рис. 1. Формирование зоны выработанного пространства из элементарных объемов

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150\eta u(1-\varepsilon)^2}{d_s^2 \varepsilon^3} + \frac{1.75\rho u^2(1-\varepsilon)}{d_s \varepsilon^3}, \tag{2}$$

где η – динамическая вязкость, Па·с; ρ – плотность, кг/м³; u – скорость фильтрации, м/с; ε – пористость; d_s – эквивалентный диаметр структурного элемента, м.

Первое слагаемое в выражении обозначим линейным удельным падением давления, а второе – квадратичным удельным падением давления. Предположим, что выражение (2) возможно использовать для расчета интегральных аэродинамических сопротивлений фиктивных ветвей выработанного пространства в квазистационарной постановке задачи с целью включения этих ветвей в общую модель вентиляционной сети. Все средства моделирования шахтной вентиляции используют в настоящий момент квадратичные сопротивления. Предполагая типичные условия эксплуатации шахт, оценим влияние каждой переменной в уравнении Эргуна на результирующие удельные потери давления при фиксированных значениях других величин. Динамическая вязкость и плотность изменяются в зависимости от температуры при постоянном давлении. Динамическая вязкость определяется выражением:

$$\eta = \eta_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}}, \tag{3}$$

где η_0 – величина вязкости при температуре T_0 , Па·с; T – температура, К; T_0 – контрольная температура, $T_0 = 291,15$ К; C – постоянная Сазерленда, для воздуха $C = 120$ К.

Плотность изменяется в зависимости от температуры в соответствии с уравнением состояния идеального газа:

$$\rho = \frac{pM}{RT}, \tag{4}$$

где p – давление, Па; M – молярная масса, кг/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

Проведем оценку вклада первого слагаемого в выражении (2) в общую величину удельного падения давления. Запишем отношение первого слагаемого ко второму, получим выражение:

$$A = \frac{150\eta(1-\varepsilon)}{1.75d_s \rho u}. \tag{5}$$

Оценим максимальную величину (5) в интервалах изменения переменных, входящих в (5): $10 \leq T \leq 29^0\text{C}$; $0,1 \leq u \leq 1$ м/с; $0,1 \leq \varepsilon \leq 0,9$; $0,2 \leq d_s \leq 5,0$ м. Такие интервалы выбраны исходя из характерных величин для обрушенного пространства [12, 13]. При изменении температуры в выбранном интервале вязкость газа (3) изменяется в интервале $1,787 \cdot 10^{-5} \leq \eta \leq 1,881 \cdot 10^{-5}$ Па·с, плотность газа (4) $1,235 \geq \rho \geq 1,157$ кг/м³. Выбирая крайние значения величин из выбранных интервалов их изменения, которые приводят к получению максимального значения величины A , получим:

$$A = \frac{150 \cdot 1,881 \cdot 10^{-5} (1-0,1)}{1,75 \cdot 0,2 \cdot 1,157 \cdot 0,1} = 0,0627.$$

Первое слагаемое выражения (2) в интервале выбранных значений параметров обрушенной среды не превышает 6,27%. Изменение температуры через изменение динамической вязкости и плотности влияет на изменение удельных перепадов давления в наименьшей степени.

Поэтому принимаемый в рамках модели всей ШВС изотермический режим позволяет без значительной для конечного результата погрешности рассматривать эти величины постоянными. Следовательно, в рамках общей ШВС, в которой используется квадратичный закон сопротивления, формулу Эргуна можно использовать в следующем виде:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{1,75\rho u^2(1-\varepsilon)}{d_3\varepsilon^3} \quad (6)$$

Предполагая постоянными плотность газовой смеси, а также скорость в фиктивных ветвях, получим удельное падение давления, зависящее от параметров выработанного пространства: приведенной пористости и эквивалентного диаметра структурных элементов. На рис. 2 приведена зависимость удельных квадратичных падений давления от эквивалентного диаметра (ΔP_d) при постоянной пористости и падений давления от пористости при постоянном эквивалентном диаметре (ΔP_ε).

Из рис. 2 следует, что в максимально зажатой среде больший вклад в изменение давления вносит пористость, при увеличении пористости и эквивалентного диаметра эквивалентный диаметр вносит более значимый вклад.

Разделив выражение (6) на квадрат расхода воздуха и переведя перепад давлений в декапаскалы (даПа), получим формулу для вычисления удельного сопро-

тивления фиктивных ветвей выработанного пространства, зависящего от распределения пористости вдоль выемочного столба:

$$R_{y\partial} = \frac{2,8\rho(1-\varepsilon)}{\pi^2 d_3^5 \varepsilon^3} \quad (7)$$

Такая форма выражения сопротивления пригодна для использования в программных продуктах, использующих квадратичный закон перепадов давлений, в частности, в ПО «Вентиляция». Предполагается задание сетки с шагом, меньшим характерного изменения величины пористости вдоль выемочного столба. Пористость возможно вычислять на основании экспорта из специализированного геомеханического ПО наподобие FLAC3D либо вычислять на основании изменения коэффициента проницаемости, определяемого по соответствующим методикам [4, 11, 12, 13].

АПРОБАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ

Разработанный метод задания аэродинамического сопротивления выработанного пространства был применен для оценки градиентов давления в выработанных пространствах выемочных столбов, включенных в общую модель ШВС. Для выработанного пространства лавы № 5а-7-34 шахты «Распадская» было сделано предположение о равномерном распределении пористости по ширине столба и переменным по его длине. Удельные сопротивления рассчитывались для каждого значения пористости, присвоенного фиктивным ветвям расчетной сети на основании (7) и приведены в табл. 1.

Шаг сетки принимался равным около 30 м. На рис. 3 приведено принятое распределение пористости выработанного пространства, рис. 4 иллюстрирует результирующее

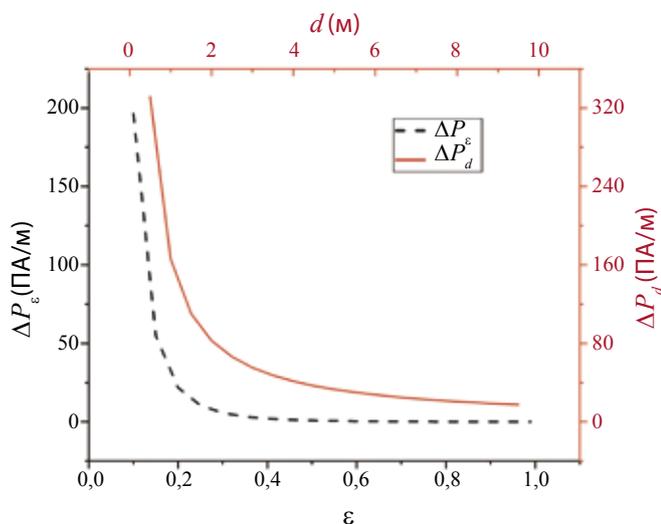


Рис. 2. Изменение квадратичного удельного падения давления

Таблица 1
Значения удельных сопротивлений, используемые в расчетной сети выработанного пространства лавы № 5а-7-34

Пористость ε	Эквивалентный диаметр d , м	$R_{y\partial}$, кц
0,6	3,0	0,002636
0,5	3,0	0,005694
0,2	2,3	0,543007

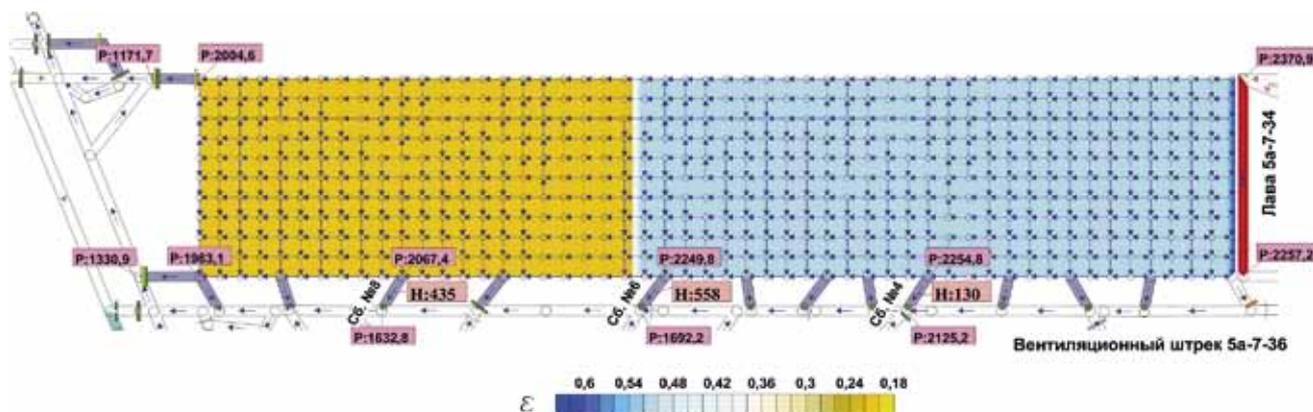


Рис. 3. Моделируемое распределение пористости вдоль выемочного столба 5а-7-34

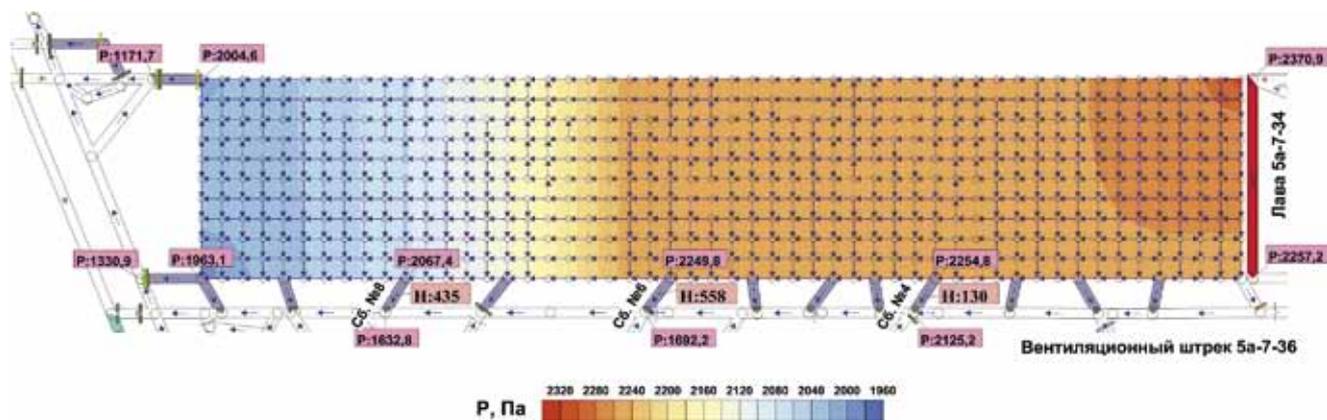


Рис. 4. Распределение избыточных давлений вдоль выемочного столба 5а-7-34

распределение избыточного давления в выработанном пространстве.

Как следует из результатов, вслед за пористостью, падение давления распределено равномерно вдоль отработанной части выемочного столба. При этом избыточное давление в действующих выработках варьируется от 2371 до 1172 Па, а давление внутри столба падает от 2317,6 до 1963,1 Па.

Единственным способом контроля расчетных характеристик выработанного пространства являются сопоставление расчетных перепадов давления на изоляционных перемычках в сбойках с фактическими значениями, предполагая, что распределение перепадов давлений в действующих выработках также соответствует действительности. Изменения перепадов давлений на перемычках также можно использовать для оценки реакции моделируемой пористой обрушенной среды на изменения во внешнем контуре, а также для моделирования связей выработанного пространства с атмосферой или выработками, пройденными по пластам-спутникам. Полученные перепады давлений на перемычках и расходы, а также результаты расчета депрессий на перемычках в модели и показания датчиков СКПА, усредненные за неделю, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Распределение перепадов давлений и расходов на контролируемых перемычках

Название	Расход, м³/с	Депрессия из расчета по модели, Па	Депрессия на датчиках СКПА, Па
Сбойка №4	0,24	130	100
Сбойка №6	0,50	558	600
Сбойка №8	0,44	435	400

Одновременно расходы служат способом контроля направления утечки – при его изменении расходы станут отрицательными. Для верификации полученных в модели ШВС значений использовались данные системы станций контроля параметров атмосферы (СКПА), применяющейся на шахте «Распадская». На рис. 5 приведены изменения перепада давления на перемычках в сбойках № 4, № 6 и № 8 между вентиляционным штреком № 5а-7-36 и конвейерным штреком № 5а-7-34.

В рамках погрешностей датчиков СКПА можно говорить о совпадении расчетных значений с усредненными по времени данными о фактических перепадах давлений на контролируемых перемычках.

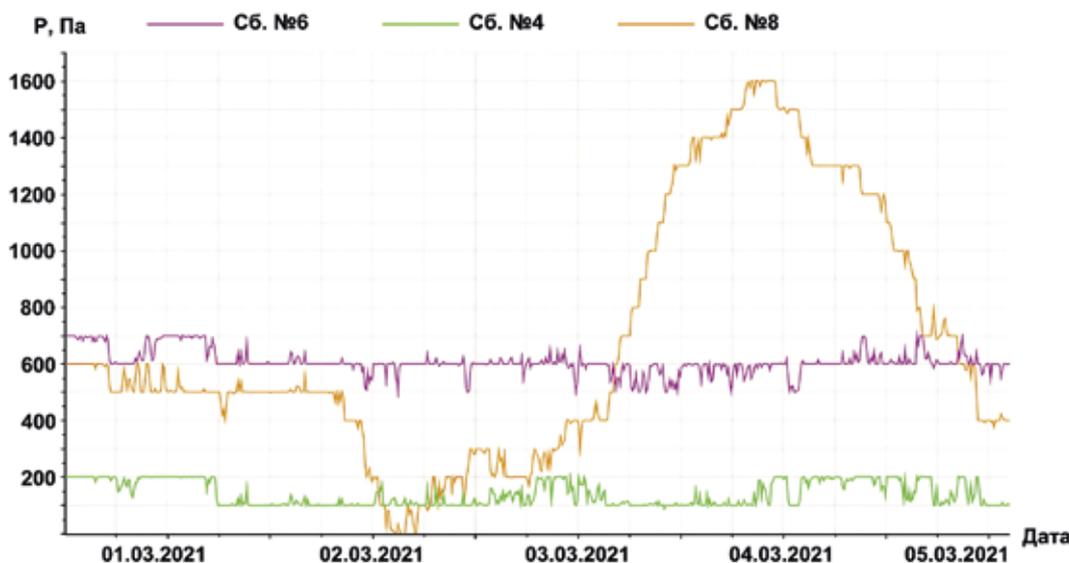


Рис. 5. Перепады давлений на контролируемых СКПА перемычках, Па

ВЫВОДЫ

Предложен метод включения выработанных пространств угольных шахт в математические модели шахтных вентиляционных систем посредством представления пористой среды сетью фиктивных ветвей, учитывающих свойства элементарных репрезентативных объемов. Обоснован и верифицирован способ расчета аэродинамического сопротивления ветвей выработанных пространств.

Использование подхода разделения пористой среды выработанного пространства на репрезентативные элементарные объемы позволяет моделировать аэродинамику в выработанном обрушенном пространстве с использованием ПО «Вентиляция».

Численный анализ формулы Эргуна демонстрирует вклад сил вязкости, не превышающий 6,5% в суммарные удельные потери давления при скоростях фильтрации, составляющих десятки сантиметров в секунду, что позволяет использовать лишь квадратичное слагаемое для оценки градиентов давления в сети фиктивных ветвей выработанного пространства. Факторами, определяющими сопротивление выработанного пространства, являются распределения пористостей и эквивалентных диаметров структурных элементов.

При включении выработанных пространств в модели шахтных вентиляционных систем верифицируемыми индикаторами адекватности расчетов являются перепады давлений на перемычках, отделяющих выработанное пространство от действующих выработок.

Список литературы

1. Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю. Программа расчета вентиляционных режимов в шахтах и рудниках // Горная промышленность. 2007. № 6. С. 20-23.
2. Ушаков К.З. Аэромеханика вентиляционных потоков в горных выработках. М.: Недра, 1975. 167 с.
3. Скочинский А.А., Комаров В.Б. Рудничная вентиляция. М.-Л.: Углетехиздат, 1949. 442 с.
4. Кобылкин С.С. Обоснование метода расчета параметров вентиляции шахт на основе объемного моделирования аэрогазодинамических процессов: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.26.03: защищена 2011 / С.С. Кобылкин. М., 2011. 161 с.

5. 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.

6. Gilmore R.C. Computational fluid dynamics modeling of underground coal longwall gob ventilation systems using a developed meshing approach. Dr. Mechanical Engineering diss. Colorado School of Mines, 2015. 280 p. URL: <http://hdl.handle.net/11124/20176> (дата обращения: 15.06.2021).

7. Lolon S. Computational Modeling of Barometric Pressure Fluctuation Effects on Explosive Methane-Air Mixtures in a Longwall Mine Gob. PhD (Mining and Earth Systems Engineering) diss., 2017. 190 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.22535.19360>.

8. Jing Shen, Mingran Chang. Effect of nitrogen injection on the variation of oxidation in coal mine gob based on numerical simulation // The Open Fuels and Energy Science Journal. 2016. Vol. 9. P. 47-54.

9. Wedding W.C. Multiscale modeling of mine ventilation system and flow through the gob. Dr. of Philosophy diss. Lexington, Kentucky, 2014. 249 p. URL: https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1014&context=mng_etds (дата обращения: 15.06.2021).

10. Wu F-I, Luo Y, Chang X-t. Coupling simulation model between mine ventilation network and gob flow field. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2019. URL: <https://www.researchgate.net/publication/337580509> (дата обращения: 15.06.2021).

11. Teruel E.F., Uddin R. Macroscopic modeling of turbulence in porous media flows, Mecánica Computacional Vol. XXVII, págs. San Luis, Argentina, 2008. P. 265-280.

12. Long Fan, Shimin Liu. A conceptual model to characterize and model compaction behavior and permeability evolution in coal mine gobs // International Journal of Coal Geology. 2017. Vol. 172. P. 60-70.

13. Петушкев Б.Л. Решение трехмерной задачи газовой динамики и переноса метана в угольной шахте с использованием параллельных вычислений. Дис. ...канд. физ.-мат. наук: спец. 01.02.05: защищена 2010 / Б.Л. Петушкев. Томск, 2010. 150 с.

Original Paper

UDC 533.6:622.4 © G.A. Kolegov, A.Yu. Krainov, 2021
ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2021, № 7, pp. 33-38
DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2021-7-33-38>

Title

METHOD TO ACCOUNT FOR AERODYNAMIC PARAMETERS OF MINED-OUT SPACES IN MODELS OF MINE VENTILATION SYSTEMS

Authors

Kolegov G.A.¹, Krainov A.Yu.¹

¹Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russian Federation

Authors Information

Kolegov G.A., Postgraduate student of Mathematical physics department, e-mail: zergferr@gmail.com

Krainov A.Yu., Head of Mathematical physics department, e-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

Abstract

Underground coal mines' gob regions are an integral part of the ventilation process. The paper proposes an approach to incorporating isolated gob regions within longwall coal mines into mine ventilation network models by ascribing elementary representative volumes' properties to virtual edges

SAFETY

to simulate porous media. Aerodynamic properties of the virtual edges are determined by their quadratic resistances in accordance with Krchhoff's laws. A way to calculate the aerodynamic resistances of the virtual edges using Ergun's formula is determined and verified by comparing the results with factual pressure differences on stoppings in the «Raspadskaya» underground mine. The practical significance of the results is considered and the ways to improve the methodology in the future are proposed.

Keywords

Ventilation, Mine ventilation network, Mathematical model, Gob, Aerodynamic resistance.

References

1. Paleev D.Yu. & Lukashov O.Yu. Software for calculation of ventilation modes in soft-rock and hard-rock underground mines. *Gornaya promyshlennost'*, 2007, (6), pp. 20-23. (In Russ.).
2. Ushakov K.Z. Aeromechanics of ventilation air flows in mine excavations. Moscow, Nedra Publ., 1975, 167 p. (In Russ.).
3. Skochinsky A.A. & Komarov V.B. Mine Ventilation. Moscow-Leningrad, Uglechekhizdat Publ., 1949, 442 p. (In Russ.).
4. Kobylkin S.S. Justification of a method to calculate mine ventilation parameters based on 3D modeling of aerogasdynamic processes. PhD (Engineering) diss. Moscow, 2011, 161 p. (In Russ.).
5. Govorukhin Yu.M., Fryanov V.N. & Paleev D.Yu. Numerical modeling of interacting geomechanical and aerodynamic processes in the extraction zone. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta, Nauki o Zemle*, 2019, (2), pp. 288-299. (In Russ.).
6. Gilmore R.C. Computational fluid dynamics modeling of underground coal longwall gob ventilation systems using a developed meshing approach. Dr. Mechanical Engineering diss. Colorado School of Mines, 2015, 280 p. Available at: <http://hdl.handle.net/11124/20176> (accessed 15.06.2021).
7. Lolon S. Computational Modeling of Barometric Pressure Fluctuation Effects on Explosive Methane-Air Mixtures in a Longwall Mine Gob. PhD (Engineering) diss., 2017, 190 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.22535.19360>.

8. Jing Shen & Mingran Chang. Effect of nitrogen injection on the variation of oxidation in coal mine gob based on numerical simulation. *The Open Fuels and Energy Science Journal*, 2016, (9), pp. 47-54.

9. Wedding W.C. Multiscale modeling of mine ventilation system and flow through the gob. Dr. of Philosophy diss. Lexington, Kentucky, 2014, 249 p. Available at: https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1014&context=mng_etds (accessed 15.06.2021).

10. Wu F.-I., Luo Y. & Chang X.-t. Coupling simulation model between mine ventilation network and gob flow field. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2019. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/337580509> (accessed 15.06.2021).

11. Teruel E.F. & Uddin R. Macroscopic modeling of turbulence in porous media flows, *Mecánica Computacional*, Vol. XXVII, págs. San Luis, Argentina, 2008, pp. 265-280.

12. Long Fan & Shimin Liu. A conceptual model to characterize and model compaction behavior and permeability evolution in coal mine gobs. *International Journal of Coal Geology*, 2017, (172), pp. 60-70.

13. Petushkevich B.L. Solving a three-dimensional gas dynamics and methane transfer problem in a coal mine using parallel computing. PhD (Engineering) diss. Tomsk, 2010, 150 p. (In Russ.).

Acknowledgments

This work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of State Assignment No. 0721-2020-0036.

For citation

Kolegov G.A. & Krainov A.Yu. Method to account for aerodynamic parameters of mined-out spaces in models of mine ventilation systems. *Ugol'*, 2021, (7), pp. 33-38 (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2021-7-33-38.

Paper info

Received March 24, 2021

Reviewed June 06, 2021

Accepted June 15, 2021