Оригинальная статья

Original Paper

УДК 622.4 © И.М. Закоршменный✉[1], П.Е. Сизин[2], И.Ф. Уварова[2], Н.Ю. Обвинцева[2], П.А. Дианов[1], 2025

[1] ИПКОН РАН, 111020, г. Москва, Россия
[2] НИТУ МИСИС, 119049, г. Москва, Россия
✉ e-mail: iosif-54@mail.ru

UDC 622.4 © I.M. Zakorshmennyi✉[1]*, P.E. Sizin[2], I.F. Uvarova[2], N.Yu. Obvintseva[2], P.A. Dianov[1], 2025

[1] Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, 111020, Russian Federation
[2] National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation
✉ e-mail: iosif-54@mail.ru

Оценка влияния отбитого угля на распределение концентрации метана в призабойном пространстве

Assessing the influence of broken coal on methane concentration distribution in the face area

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-10-94-98

ЗАКОРШМЕННЫЙ И.М.
Доктор техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории 2.2 «Геотехнологических рисков при освоении газоносных угольных и рудных месторождений», ИПКОН РАН, 111020, г. Москва, Россия, e-mail: iosif-54@mail.ru

СИЗИН П.Е.
Канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры математики, НИТУ МИСИС, 119049, г. Москва, Россия

УВАРОВА И.Ф.
Канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры физики НИТУ МИСИС, 119049, г. Москва, Россия

ОБВИНЦЕВА Н.Ю.
Канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики НИТУ МИСИС, 119049, г. Москва, Россия

ДИАНОВ П.А.
Аспирант лаборатории 2.2 «Геотехнологических рисков при освоении газоносных угольных и рудных месторождений» ИПКОН РАН, 111020, г. Москва, Россия

Предложена математическая модель, основанная на одномерном неоднородном уравнении диффузии, позволяющая оценить вклад выделения метана из отбитого угля в процессе его перемещения по транспортной системе выемочного участка угольной шахты в пространственно-временное распределение параметров, характеризующих состояние рудничной атмосферы в призабойной зоне. Приведено решение указанного уравнения, основанное на использовании аппарата функций Грина (функций источника) и реализованное в программном комплексе Maple. В качестве результатов моделирования представлены графики зависимостей массовой концентрации метана в воздушной среде выемочного участка от пространственной координаты в разные моменты времени. Показано, что расчетная схема предложенной модели обеспечивает получение надежных оценок пространственно-временных изменений аэрологических параметров призабойного пространства. Представленные результаты могут быть использованы для повышения эффективности оперативного управления технологическими процессами в пределах выемочного участка.

Ключевые слова: *угольная шахта, выемочный участок, очистной комбайн, отбитый уголь, призабойное пространство, рудничная атмосфера, концентрация метана, моделирование.*

Для цитирования: Оценка влияния отбитого угля на распределение концентрации метана в призабойном пространстве / И.М. Закоршменный, П.Е. Сизин, И.Ф. Уварова и др. // Уголь. 2025;(10):94-98. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-10-94-98.

Abstract

A mathematical model based on a one-dimensional non-uniform diffusion equation is proposed to evaluate the contribution of methane emissions

from broken coal during its transportation through the haulage system of a coal mine working face to the spatiotemporal distribution of parameters characterizing the mine atmosphere in the face area. The solution to this equation, implemented using the Maple software suite and derived through Green's functions (source functions), is presented. Simulation results show plots of methane mass concentration in the mine air versus spatial coordinate at different time points. The computational scheme of the proposed model is shown to provide reliable estimates of spatiotemporal changes in aerological parameters in the face area. These results can enhance the efficiency of operational process control within the extraction zone.

Keywords

Coal mine, working face, shearer, broken coal, face area, mine atmosphere, methane concentration, modeling.

For citation

Zakorshmennyi I.M., Sizin P.E., Uvarova I.F., Obvintseva N.Yu., Dianov P.A. Assessing the influence of broken coal on methane concentration distribution in the face area. *Ugol'*. 2025;(10):94-98. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-10-94-98.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время благодаря применению на угледобывающих предприятиях эффективных схем вентиляции и дегазации, а также внедрению современных систем газового контроля вероятность возникновения катастрофических аварийных происшествий, обусловленных метановым фактором, неуклонно снижается [1, 2, 3]. Тем не менее ситуации, когда значения параметров рудничной атмосферы приближаются к предельным нормативным величинам, определяющим загазованность призабойного пространства и оконтуривающих выемочный участок горных выработок, что влечет остановку технологического оборудования, остаются существенной причиной снижения производительности угольных шахт [4, 5, 6, 7]. Обеспечение ритмичности выполнения технологических процессов отработки запасов в угольных шахтах путем использования систем оперативного управления параметрами рудничной атмосферы в пределах выемочных участков остается одним из приоритетных направлений исследований в области подземной отработки запасов [8, 9, 10]. В свою очередь, эффективное функционирование таких систем обусловлено как своевременной идентификацией источников метановыделения, оказывающих наиболее существенное влияние на газовый баланс выемочного участка, так и корректным математическим описанием развития соответствующей аэрологической ситуации [11, 12, 13].

Известно, что интенсивность метановыделения в лаве растет при увеличении скорости подачи очистного комбайна, при этом основной приток газа в очистной забой и транспортные выработки обеспечивается преимущественно отбиваемым углем [14, 15].

Цель настоящей работы – разработка математической модели, позволяющей оценить изменение значений концентрации в рудничной атмосфере призабойного пространства метана, выделившегося из отбитого угля в процессе его транспортировки в пределах лавы.

МЕТОДИКА

В рассматриваемой горнотехнической системе значение длины очистного забоя L принято равным 360 м, а значение его поперечного сечения $S \approx 5$ м^2, скорость очистного комбайна $V = 0{,}1$ м/с, скорость равномерного движения скребкового конвейера $U = 1{,}3$ м/с. Основным источником метана, поступающего в призабойное пространство, принято газовыделение из кусков отбитого угля, равномерно размещенных вдоль конвейера. При этом интенсивность метановыделения из отбитого угля считается постоянной во времени [13]. Обусловленный наличием вентиляции перенос газовоздушной смеси (воздух + метан) на рассматриваемом добычном участке происходит со скоростью $W = 4$ м/с, сонаправленной движению очистного комбайна.

Так как значение длины очистного забоя намного превосходит значения его высоты и ширины, в качестве основного уравнения, описывающего распространение метана в лаве, примем одномерное неоднородное уравнение диффузии [16]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + W\frac{\partial C}{\partial x} - a^2\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = f(x,t). \qquad (1)$$

Здесь $C(x,t)$ – массовая концентрация метана в воздухе, г /м^3. Для решения этого уравнения используем аппарат функций Грина (функций источника). Влияние точечного и мгновенного источника газовыделения, действующего в точке ξ в момент времени τ, при наличии переноса со скоростью W описывается функцией Грина [16]:

$$G(x,t,\xi,\tau) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}a\sqrt{t-\tau}}e^{-\frac{(x-\xi-W(t-\tau))^2}{4a^2(t-\tau)}}. \qquad (2)$$

Тогда, если источник газа имеет интенсивность $f(x,t)$, то массовая концентрация метана $C(x,t)$, обусловленная диффузионными процессами, определяется выражением:

$$C(x,t) = \int_0^t d\tau \int_{-\infty}^{+\infty} d\xi f(\xi,\tau)\cdot G(x,t,\xi,\tau) =$$

$$= \int_0^t d\tau \frac{1}{2\sqrt{\pi}a\sqrt{t-\tau}} \int_{-\infty}^{+\infty} d\xi f(\xi,\tau)\cdot e^{-\frac{(x-\xi-W(t-\tau))^2}{4a^2(t-\tau)}}. \qquad (3)$$

Здесь a – параметр, характеризующий интенсивность диффузионного процесса. На практике обычно используется коэффициент диффузии $D = a^2$, имеющий размерность м^2/с [16]. Переменные x и t описывают пространственную и временную координаты точки, в которой нужно определить концентрацию газа, а переменные ξ и τ определяют местоположение источника.

Если очистной комбайн движется равномерно со скоростью V, а скребковый конвейер движется со скоростью U в обратном направлении, то конвейер равномерно заполнен отбитым углем на отрезке от начальной точки (от конвейерного штрека) до $V\cdot t$ (текущего положения очистного комбайна) (*рис. 1*). В каждой точке указанного отрезка концентрация метана $C(x,t)$, фиксируемая в момент t, определяется источниками газовыделения (кусками отбитого угля), попадающими на конвейер начиная с момента времени ξ / V до момента t. Следовательно, можем записать:

$$C(x,t) = \int_0^{Vt} d\xi \int_{\frac{\xi}{V}}^{t} d\tau \frac{1}{2\sqrt{\pi}a\sqrt{t-\tau}} f(\xi,\tau)\cdot e^{-\frac{(x-\xi-W(t-\tau))^2}{4a^2(t-\tau)}}. \qquad (4)$$

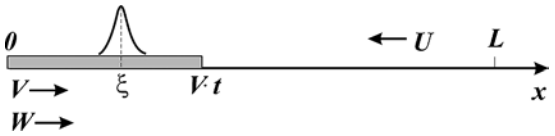

Рис. 1. Расчетная схема перемещения отбитого угля по транспортной системе выемочного участка

Fig. 1. Calculation scheme for the movement of recaptured coal through the transport system of the excavation site

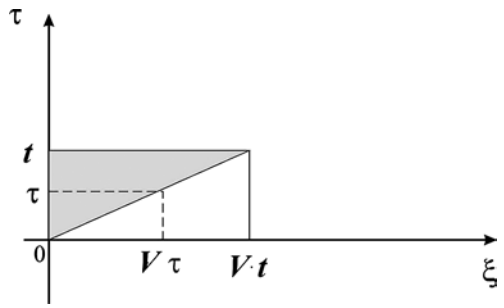

Рис. 2. Фазовая диаграмма

Fig. 2. Phase diagram

Сделаем еще одно существенное допущение. Очевидно, что если P = 200 кг/с – производительность очистного комбайна, то за время Δt отбивается уголь массой $\Delta M = P \cdot \Delta t$. Заметим, что скорость конвейера относительно добычной машины равна $U + V$. Тогда за время Δt мимо добычной машины проходит $\Delta L = (U + V) \cdot \Delta t$ длины конвейера, значит, погонная плотность угля на конвейере $\rho_п = \Delta M / \Delta L = P/(U + V) = const$. Если принять, что выделение метана из единицы массы добытого угля несущественно меняется за время перемещения куска отбитого угля на расстояние, равное длине забоя L ($\Delta t \approx 5$ минут) [15], то можно считать, что интенсивность метановыделения $f(x, t)$ для угля на конвейере не зависит ни от координаты, ни от времени и может быть заменена константой f_0.

Для количественной оценки константы f_0 рассчитаем интенсивность метановыделения из единицы массы отбитого угля в единицу времени N. Примем метаноносность угля X = 5 м^3/т [17], тогда, считая, что время наиболее интенсивного выхода метана из отбитого угля составляет $t_м$ = 20 мин, плотность метана $\rho_м$ = 0,657 кг/м^3, а также учитывая, что за это время выделяется ≈ 50 % газа [15], то получаем $N = \rho_м \cdot (X/2 \cdot t_м) = 1{,}368 \cdot 10^{-3}$ г/(кг·с). Следовательно, интенсивность выделения метана с элемента длины конвейера $N_{\Delta L} = N \cdot \Delta M = P \cdot N \cdot \Delta L/(U + V)$. Учитывая, что в действительности масса метана ΔM распределена по объему $\Delta V = S \cdot \Delta L$, где S – поперечное сечение выработки, получим, что рассчитанное значение константы $f_0 = P \cdot N/S \cdot (U + V)$ = 0,039 г/(м^3·с).

В выражении для $C(x,t)$ удобно поменять порядок интегрирования. Для этого изобразим область интегрирования на фазовой диаграмме, представленной на *рис. 2*. Здесь в каждый момент времени от 0 до t отбитый уголь на конвейере присутствует на отрезке от 0 до точки $V \cdot \tau$, в которой в данный момент находится очистной комбайн. Поэтому пространственная координата ξ меняется от 0 до $V \cdot \tau$, а τ – от 0 до t.

С помощью фазовой диаграммы получаем:

$$C(x,t) = \int_0^t d\tau \int_0^{V\tau} d\xi \frac{1}{2\sqrt{\pi} a \sqrt{t-\tau}} f_0 \cdot e^{-\frac{(x-\xi-W(t-\tau))^2}{4a^2(t-\tau)}}. \quad (5)$$

В представленной модели уравнение (1) описывает перенос метана с учетом двух процессов: конвективного переноса и диффузионного перемешивания [18]. Очевидно, что молекулярная диффузия играет пренебрежимо малую роль, а состояние рудничной атмосферы в подземных выработках в первую очередь определяется эффективностью шахтной вентиляции (скоростью и направлением воздушного потока). Турбулентные пульсации возникают в потоке воздуха за счет неоднородностей (например, шероховатости стенок), вихрей при обтекании оборудования и других факторов. В результате процедуры осреднения турбулентных пульсаций совокупный эффект может быть аппроксимирован уравнением диффузии с эффективным коэффициентом турбулентной диффузии D_T. С учетом вязкости воздуха, характерных масштабов процесса и скоростей конвекционных потоков расчеты по оценке значений функции $C(x,t)$ на основе выражения (5) выполнены при значении $D = D_T$ = 0,1 м^2/с [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На *рис. 3* представлены графики зависимостей $C(x)$, полученные в ходе расчетов по формуле (5), проведенных в программном комплексе Maple для шести моментов времени: t_1 = 100 с, t_2 = 200 с, t_3 = 500 с, t_4 = 1000 с, t_5 = 2000 с и t_6 = 3000 с. Максимальное значение x на графиках соответствует длине лавы L.

На представленных графиках прослеживается общая тенденция изменения концентрации метана вдоль лавы (*см. рис. 3*). Так, для всех t при x = 0 функция $C(x)$ принимает близкое к нулю стационарное значение, с которого начинается линейный рост этой функции вплоть до координаты $x = V \cdot t$, соответствующей местоположению комбайна в момент времени t. Далее значения функции $C(x)$ плавно снижаются до координаты $x = L$, соответствующей сопряжению лавы с вентиляционным штреком. Следует отметить, что скорость снижения значений функции $C(x)$ при x стремящихся к L, при больших значениях t падает практически до 0, что фиксируется по близкому к платообразному участку графика $C(x)$ при $V \cdot t \le x \le L$ *(см. рис. 3, е)*. Указанное видоизменение графиков $C(x)$ при увеличении значений t обусловлено «накопительным эффектом» для концентрации метана в пространстве очистного забоя, связанным с вовлечением в воздушный поток все большей массы метана, выделяемого отбитым углем при удалении комбайна от конвейерного штрека.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены результаты численных экспериментов, в ходе которых установлен характер пространственно-временных изменений концентрации метана из отбитого угля в призабойном пространстве лавы в процессе его перемещения конвейером. При постановке задачи исследования и выполнении дальнейших расчетов был сделан ряд существенных допущений и ограничений. Тем

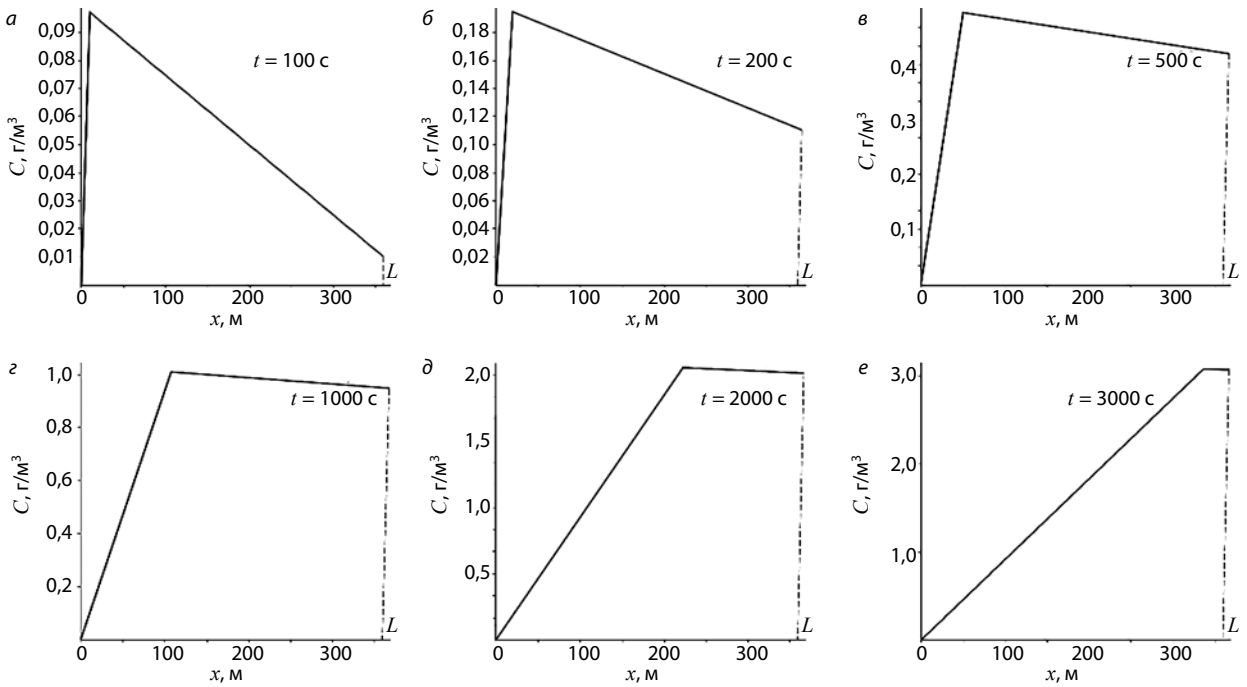

Рис. 3. Графики $C(x)$ для различных значений t

Fig. 3. Graphs of $C(x)$ for various values of t

не менее графики зависимостей $C(x)$, полученные в ходе моделирования для различных значений времени *t*, могут быть однозначно интерпретированы, а сделанные на основании этого оценки о характере изменений состояния рудничной атмосферы соответствуют рассматриваемым горнотехнической и аэрологической ситуациям. В частности, полученные на выходе лавы значения концентрации метана, обусловленные продемонстрированным в ходе обсуждения результатов моделирования «накопительным эффектом», оказываются довольно реалистичными и согласуются с результатами, полученными экспериментально для лав длиною L более 200 м [15]. Из этого следует, что с увеличением длины лавы метановыделение из отбитого угля может быть определяющим фактором, влияющим на параметры рудничной атмосферы.

При этом очевидно, что для получения существенно более надежных количественных показателей аэрологической обстановки конкретных очистных забоев необходимо проведение комплексных экспериментальных исследований по оценке значений, входящих в описываемые расчеты параметров. Основанная на таких данных предложенная математическая модель может быть использована для оценки влияния интенсивности работы комбайна на параметры рудничной атмосферы в лаве и в дальнейшем может быть применима для эффективного оперативного управления технологическими процессами в пределах выемочного участка.

Список литературы • References

1. Безопасность высокопроизводительных очистных забоев в метанообильных шахтах / В.Н. Захаров, В.С. Забурдяев, Е.В. Федоров и др. // Горная промышленность. 2023;(6):64-70. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-6-64-70 .
   Zakharov V.N., Zaburdiaev V.S., Fedorov E.V., Shliapin A.V. Safety of high-performance coal mining faces in methane-rich mines. *Gornaya promyshlennost'*. 2023;(6):64-70. (In Russ.). DOI: 10.30686/1609-9192-2023-6-64-70 .
2. Казанин О.И. Перспективные направления развития технологий подземной угледобычи в РФ // Горный журнал. 2023. № 9. С. 4-11. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.01 .
   Kazanin O.I. Prospects for the development of underground coal mining technologies in Russia. *Gornyj zhournal*. 2023;(9):4-11. (In Russ.). DOI: 10.17580/gzh.2023.09.01.
3. Баловцев С.В., Скопинцева О.В., Куликова Е.Ю. Анализ аварийности и тенденции развития аэрологической безопасности угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2024. № 12. С. 135-149. DOI: 10.25018/0236-1493-2024-12-0-135 .
   Balovtsev S.V., Skopintseva O.V., Kulikova E.Yu. Analysis of accident rates and trends in aerological safety of coal mines. *Gornyj informatsionno-analiticheskyj Bulleten'*. 2024;(12):135–149. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2024-12-0-135.
4. Качурин Н.М., Ермаков А.Ю. Метановыделение при выемке мощных пологих угольных пластов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 6. С. 193-206. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-193-206 .
   Kachurin N.M., Ermakov A.Yu. Methane emission during mining of thick gentle coal seams. *Gornyj informatsionno-analiticheskyj Bulleten'*. 2018;(6):193-206. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-193-206.
5. Численные исследования влияния изменений напряженно-деформированного состояния углепородного массива на устойчивость дегазационных скважин / Д.И. Блохин, И.М. Закоршменный, С.С. Кубрин и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. № 11. С. 17-32. DOI: 10.25018/0236-1493-2023-11-0-17 .

Blokhin D.I., Zakorshmennyi I.M., Kubrin S.S., Kobylkin A.S., Pozdeev E.E., Pushilin A.N. Numerical study of the effect of stress-strain state changes in the coal-rock massif on the stability of degassing boreholes. *Gornyj informatsionno-analiticheskyj Bulleten'*. (In Russ.). 2023;(11):17-32. DOI: 10.25018/0236-1493-2023-11-0-17.

6. Álvarez Fernández M.I., Prendes Gero M.B., Peñas Espinosa J.C., González Nicieza C. Innovative techniques in underground mining for the prevention of gas dynamic phenomena. *Energies*. 2021;14(16):5205**.** DOI: 10.3390/en14165205 .
7. Doğan H.E., Demirel N. Analyzing lump coal gas release as a source of coal mine methane: Using GC and machine learning. *Fuel*. 2025;(397):135433. DOI: 10.1016/j.fuel.2025.135433.
8. Формализация процесса выбора технологий отработки месторождений полезных ископаемых / П.А. Каунг, В.В. Зотов, М.А. Гаджиев и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 2. С. 124–138. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-2-0-124 .
   Kaung P.A., Zotov V.V., Gadzhiev M.A., Artemov S.I., Gireev I.A. Formalization of the process of selecting technologies for mining mineral deposits. *Gornyj informatsionno-analiticheskyj Bulleten'*. (In Russ.). 2022;(2):124-138. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2022-2-0-124.
9. Копылов К.Н., Закоршменный И.М. Результаты экспериментальных исследований по оперативному управлению очистным комбайном в высокопроизводительных лавах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 1. С. 36-46. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-36-46 .
   Kopylov K.N., Zakorshmennyi I.M. Results of experimental studies on real-time control of a shearer in high-performance longwalls. *Gornyj informatsionno-analiticheskyj Bulleten'*. (In Russ.). 2020;(1);36-46. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-36-46.
10. Kopylov K.N., Kubrin S.S., Blokhin D.I. The simulation of the excavation sites of coal mines. Mining Goes Digital: Proceedings of the 39th International Symposium on Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry. London, Taylor & Francis Group, 2019:473-480. DOI: 10.1201/9780429320774-54 .
11. Баловцев С.В. Мониторинг аэрологических рисков аварий на угольных шахтах // Горные науки и технологии. 2023. Т. 8. № 4. С. 350–359. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-10-163 .
    Balovtsev S.V. Monitoring aerological risks of accidents in coal mines. *Gornye nauki i tekhnologii*. 2023;8(4): 350-359. (In Russ.). DOI: 10.17073/2500-0632-2023-10-163.
12. Rao S., Mishra D.P., Mishra A. Methane migration and explosive fringe localisation in retreating longwall panel under varied ventilation scenarios: a numerical simulation approach. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023;(30):66705-66729. DOI: 10.1007/s11356-023-26959-6 .
13. Sizin P., Zakorshmennyi I., Blokhin D., Kobylkin A., Dianov P. Spatiotemporal distribution of methane concentration from broken coal mass. EPJ Web of Conferences: Proceedings of the 26th International Conference on Dense Matter in Heavy Ion Collisions. 2025;(321):01014. DOI: 10.1051/epjconf/202532101014.
14. К вопросу о предельной скорости подачи очистного комбайна с учетом параметров газовыделения угольного пласта / В.В. Зотов, К.С. Коликов, И.П. Гусева и др. // Уголь. 2024. № 6. С. 96-100. DOI: 10.18796/0041- 5790-2024-6-96-100.
    Zotov V.V., Kolikov K.S., Guseva I.P., Petsyk A.A., Belyankina O.V. Regarding the maximum feed rate of the shearer with account of the coal seam gas emission characteristics. *Ugol'*. 2024;(6):96-100. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024- 6-96-100.
15. Забурдяев В.С. Выделение метана из отбитого в очистном забое угля. Безопасность труда в промышленности. 2019. № 11. С. 13–17. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-11-13-17.
    Zaburdiaev V.S. Methane release from broken coal in a mining face. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*. 2019;(11):13–17. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2019-11-13-17.
16. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Изд-во МГУ, 1999. 799 с.
17. Фам Дик Тханг, Фан Туан Ань, Коликов К.С. Зависимость метаноносности и относительной метанообильности угольных пластов на шахте Мао Хе от глубины их залегания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 6(1). С. 26-37. DOI: https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-61-0-26-37 .
    Fam Dik Khang, Fan Tuan An', Kolikov K.S. Dependence of gas content and relative methane emission of coal seams at Mao He mine on depth of occurrence. *Gornyj informatsionno-analiticheskyj Bulleten'*. 2020;(6-1):26-37. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-26-37 .
18. Ермаков А.Ю., Качурин Н.М., Сенкус В.В. Системный подход к технологии оценки метановой опасности очистных участков шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 4. С. 106-118. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-0-106-118.
    Ermakov A.Yu., Kachurin N.M., Senkus V.V. Systemic approach to methane risk assessment in coal mine roadways. *Gornyj informatsionno-analiticheskyj Bulleten'*. 2018;(4):106-118. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-0-106-118.

Authors Information

Zakorshmennyi I.M. – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of the Laboratory 2.2 "Geotechnological Risks in the Development of Gas-Bearing Coal and Ore Deposits", Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, 111020, Russian Federation, e-mail: iosif-54@mail.ru

Sizin P.E. – PhD (Physical and Mathematical), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mathematics, National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation

Uvarova I.F. – PhD (Physical and Mathematical), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics, National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation

Obvintseva N.Yu. – PhD (Physical and Mathematical), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics, National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation

Dianov P.A. – Postgraduate Student of the Laboratory 2.2 "Geotechnological Risks of the Development of Gas-Bearing Coal and Ore Deposits", Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, 111020, Russian Federation

Информация о статье

Поступила в редакцию: 5.07.2025
Поступила после рецензирования: 18.09.2025
Принята к публикации: 29.09.2025

Paper info

Received July 5, 2025
Reviewed September 18, 2025
Accepted September 29, 2025