

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 622.691, 519.246.2

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-6-76-84

ПОЛУЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ИЗ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ КОЛЛЕКТОРСКИХ СВОЙСТВ

Тайлаков Олег Владимирович, Макеев Максим Павлович,
Уткаев Евгений Александрович, Застрелов Денис Николаевич

Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН

*для корреспонденции: makeev75@ya.ru



Информация о статье

Поступила:

09 сентября 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

22 ноября 2024 г.

Принята к публикации:

02 декабря 2024 г.

Опубликована:

05 декабря 2024 г.

Ключевые слова:

Фильтрация флюида,
углепородный массив,
коэффициент диффузии,
массоперенос метана в
массиве горных пород,
численная модель.

Аннотация.

В процессе ведения горных работ в шахтной атмосфере в области интенсивной выемки угля происходят значительные изменения, обусловленные поступлением метана из выработанного пространства, а также из пластов-спутников, которые разобцены между собой слоем горных пород. Существенное влияние на этот процесс оказывает скорость выделения метана, характеризующаяся коэффициентом диффузии, а также стремительно развивающейся системой трещин под действием горного давления. Рассмотрено влияние процессов разупрочнения углепородного массива на скорость миграции метана в горные выработки. Представлена полуэмпирическая модель газовыделения, учитывающая физические процессы массопереноса и фильтрации флюида в пористой среде. При разработке модели были приняты допущения, что миграция метана в горные выработки проходит при изотермическом процессе, при этом концентрация метана в смеси выражается через его молекулярную массу. В качестве исходных данных для апробации эмпирической модели диффузии метана выбраны результаты проведенных натуральных экспериментов, включающих определение физико-механических свойств углепородного массива и объемов метана, поступающего в шахтную атмосферу. В численных экспериментах показано, что модель чувствительна к исходной концентрации метана в пластах спутника, а также к коэффициенту диффузии метана через углепородный массив. Показано, что время фильтрации метана снижается на 57% при снижении коэффициента диффузии на порядок.

Для цитирования: Тайлаков О.В., Макеев М.П., Уткаев Е.А., Застрелов Д.Н. Полуэмпирическая модель газовыделения из угольного пласта на основе изучения коллекторских свойств углепородного массива // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 6 (166). С. 76-84. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-6-76-84, EDN: RQHHJL

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2024-0013 «Создание многофункциональных систем мониторинга и прогноза газодинамических явлений, контроля напряженного состояния, разработка методов их предотвращения и оценки эффективности при подземной разработке угольных месторождений. 2024-2025 гг.» (рег. № 124041100071-9).

Введение

Особое влияние на шахтную атмосферу оказывают притоки метана из выработанного пространства, а также из выше- и нижележащих

пластов, которые разобцены между собой слоем горных пород, таких как песчаник или алевролит. Интенсивная отработка угольного пласта приводит к перераспределению горного

давления в окрестностях выемочного участка, в результате чего происходит выдавливание почвы пласта либо зависание кровли [1]. Такие процессы увеличивают поступление метана в очистной забой из выработанного пространства и сближенных пластов [2] в результате разрушения горных пород и образования трещин [3]. На газовый баланс выемочного участка также оказывают влияние подрабатываемые и надрабатываемые пласты, его степень зависит от их суммарной мощности, природной и остаточной газоносности, а также расстояния до вынимаемого угольного пласта. Так, в [4] для определения степени влияния притоков метана предложено учитывать ряд источников, способствующих интенсивному выделению метана, к которым относятся свежееобнаженная поверхность обрабатываемого пласта, пласты-спутники, включая пропластки, а также метан, выделившийся из отбитого угля. Таким образом, для оценки влияния динамики высвобождения метана из угольных пластов необходимо усовершенствовать известные математические модели. Так, например, для уточнения закономерностей газообмена [5, 6] используется математическая модель, учитывающая поля давлений свободного метана на поверхности горных выработок в окрестностях угольного пласта. Модель учитывает конечную скорость распространения давления газа в пласте на основе одномерного уравнения гиперболического типа. Тем не менее, для полного понимания процессов диффузии метановоздушной смеси необходимо учитывать напряженно-деформированное состояние углепородного массива [3, 8]. Под действием горного давления происходит разупрочнение углепородного массива [9], что обеспечивает дополнительный приток метана в горные выработки [10]. Миграция метана от сближенных пластов вследствие изменения напряженно-деформированного состояния углепородного массива описывается законом Фика и зависит от градиента концентрации метана и свойств среды, через которую происходит диффузия [11, 12]. Следовательно, для уточнения степени влияния притоков метана в горные выработки необходимо знать скорость его миграции, которая зависит от эффективного коэффициента диффузии [13, 14]. Поставлена задача разработки и исследования полуэмпирической модели газовыделения из угольного пласта для определения объемов метана, поступающего из сближенных пластов в горные выработки, и его влияния на газовый баланс очистного забоя.

Методы

При разработке полуэмпирической модели газовыделения из угольного пласта учитывались

результаты натуральных исследований коллекторских свойств угольного пласта. Проведение натуральных исследований заключалось в регистрации малых объемов концентрации метана в метановоздушной смеси на основе применения абсорбционного масс-спектрометрического метода для определения геологического возраста метана. Для этого были отобраны газовые пробы из образцов угля (керна) и из шахтной атмосферы. Угольные керны выбуривались из рабочего, выше- и нижележащих пластов. Затем в режиме дегазации керна из герметичного сосуда отбирались пробы метановоздушной смеси, после чего пробы газа подвергались анализу на масс-спектрометре с дальнейшим определением смещения изотопов углерода $\delta^{13}\text{C}$. Метановоздушная смесь рудничной атмосферы отбиралась непосредственно из горных выработок. По результатам анализа газового опробования определено смещение изотопов углерода $\delta^{13}\text{C}$ и выявлены источники поступления метана в горные выработки, так, на исходящей струе очистного забоя обнаружены следы метана с выше- и нижележащих пластов-спутников, поступление которого произошло посредством массопереноса. Таким образом, по результатам исследований удалось установить степень влияния каждого из источников. Например, влияние пластов-спутников для шахты №1 составило для верхней пачки и нижней пачки угольного пласта 13 и 3 соответственно; для шахты №3 оценено как отношение 1 и 3 соответственно для верхней и нижней пачки. Такое различие обусловлено особенностями горно-геологических условий угольного месторождения.

Полуэмпирическая модель разрабатывалась в предположении, что процесс диффузии метановоздушной смеси через углепородный массив изотермический, а концентрация метана в смеси выражается через его молекулярную массу. Объем метана, поступающего в горные выработки непосредственно из угольного пласта, не учитывался.

На Рис. 1 приведена расчетная схема, на которой отображен угольный пласт (1) мощностью $m_{yz} = 4$ м, ограниченный снизу (2) и сверху (3) слоями песчаника, мощностью $m_1 = 20$ и $m_2 = 15$ м соответственно. На поверхность блоков (2) и (3) в вертикальном направлении действует горное давление $P_1 = 30,8$ МПа, $P_2 = 30,4$ МПа, а также в него поступает из надрабатываемого угольного пласта метановоздушная смесь с концентрацией метана $c_1 = 43,47$ моль/м³ и коэффициентом диффузии $D_{fl} = 4,2 \cdot 10^{-7}$ (м²/сут.) [12].

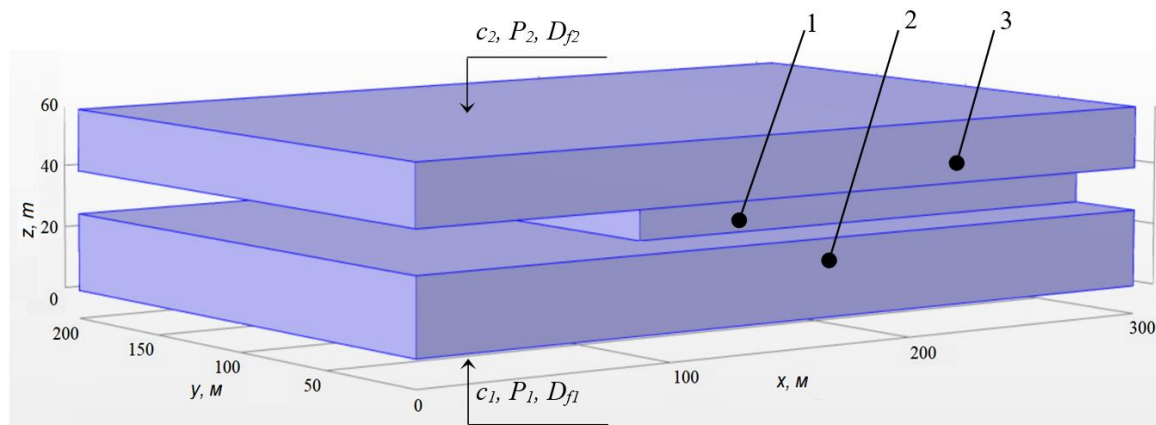


Рис. 1. Расчетная схема метановыделения из пластов-спутников
Fig. 1. Calculation scheme of methane emission from adjacent coal seams

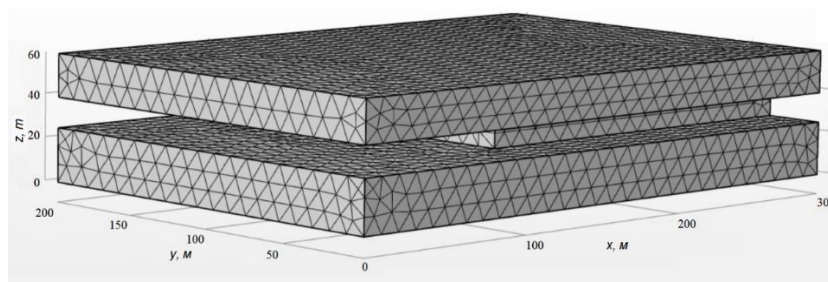


Рис. 2. Сетка на основе тетраэдрических элементов исследования модели на основе метода конечных элементов

Fig. 2. A grid based on tetrahedral elements for investigation a model based on the finite element method

Численная модель разработана в среде программного комплекса *COMSOL Multiphysics*, предназначенного для решения задач массопереноса и содержащего набор функций для решения задач миграции разбавленных веществ в пористых средах на основе уравнения Дарси [14-16]. Уравнение для молярных концентраций c_i , описывающее перенос растворенных веществ в пористой среде с переменным насыщением для случаев, когда поровое пространство преимущественно заполнено флюидом, в дифференциальной форме имеет вид:

$$\frac{\partial(\epsilon_p c_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_s c_{p,i})}{\partial t} + \nabla \cdot J_i + u \cdot \nabla c_i = R_i, \quad (1)$$

где $J_i = -(D_{D,i} + D_{e,i}) \cdot \nabla c_i$ – вектор диффузионного потока, моль/(м²·с); c_i – концентрация i -го вещества в жидкости моль/м³; $c_{p,i}$ – концентрация i -го вещества, адсорбированного твердыми частицами, моль/м³; ϵ_p – пористость горных пород, д.е.; насыпная плотность $\rho = (1 - \epsilon_s)\rho_s$, кг/м³; ρ_s – плотность твердой фазы, кг/м³; R_i – источник массы i -го компонента, моль/(м³·с).

Начальные условия для пористой матрицы удовлетворяли выражению [17]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{CH_4}, \epsilon) + \nabla \cdot (\rho_{CH_4} u) = Q_m \quad (2)$$

где $u = -\frac{k}{\mu}(\nabla p + \rho_{CH_4} g \nabla D)$, p – давление, Па; k – проницаемость, мД; μ – вязкость флюида, Па·с; ρ_{CH_4} – плотность флюида, кг/м³; ∇D – единичный вектор в направлении действия гравитации; g – ускорения силы тяжести, м/с².

При задании граничных условий в модели допущено, что процесс миграции флюида, проходящий через пористую среду, имеет начальный точечный массовый источник \dot{Q}_c , (моль/(м³·с)) в малом объеме δV , (м³). При этом δV стремится к нулю при постоянном \dot{Q}_c . Такой источник задавался на поверхности исследуемой области (Рис.1, поз. 2, поз. 3) в вертикальном направлении с начальной массовой скоростью потока N_0 , (кг/с) и удовлетворял выражению:

$$\lim_{\delta V \rightarrow \infty} \int_{\delta V} \dot{Q}_c = N_0, \quad (3)$$

Предполагалось, что выход метана в горные выработки со скоростью U_0 , (м·с) происходил на поверхности, ограниченной по горизонтали угольным пластом (Рис. 1, поз. 1), по вертикали с границей расчетной области, и удовлетворял условию -п· $\rho u = -\rho \cdot U_0$.

Таблица 1. Исходные данные
Table 1. Initial data

Наименование	Значение
Плотность породы почвы пласта, ρ_1 , кг/м ³	1260
Пористость породы почвы пласта	0,3
Проницаемость породы почвы пласта, K_1 , мД	1
Плотность породы кровли пласта, ρ_2 , кг/м ³	1260
Пористость породы кровли пласта	0,3
Проницаемость породы кровли пласта, K_1 , мД	1
Плотность метана, ρ_{CH_4} , кг/м ³	0,717
Количество метана в ниже и вышележащих пластах c_0 , кг/м ³	300000
Молярная масса метана, M , г/моль	16,04
Давление кровли пласта, P_2 , МПа	30,4
Давление почвы пласта, P_1 , МПа	30,8
Коэффициент динамической вязкости метана, D_{CH_4} [12], μ_{CH_4} , Па·с	$9,86 \cdot 10^{-6}$
Плотность угля, ρ_l , кг/м ³	1260
Пористость угля, p .	0,3
Проницаемость угля, $K_{уг}$, мД	5

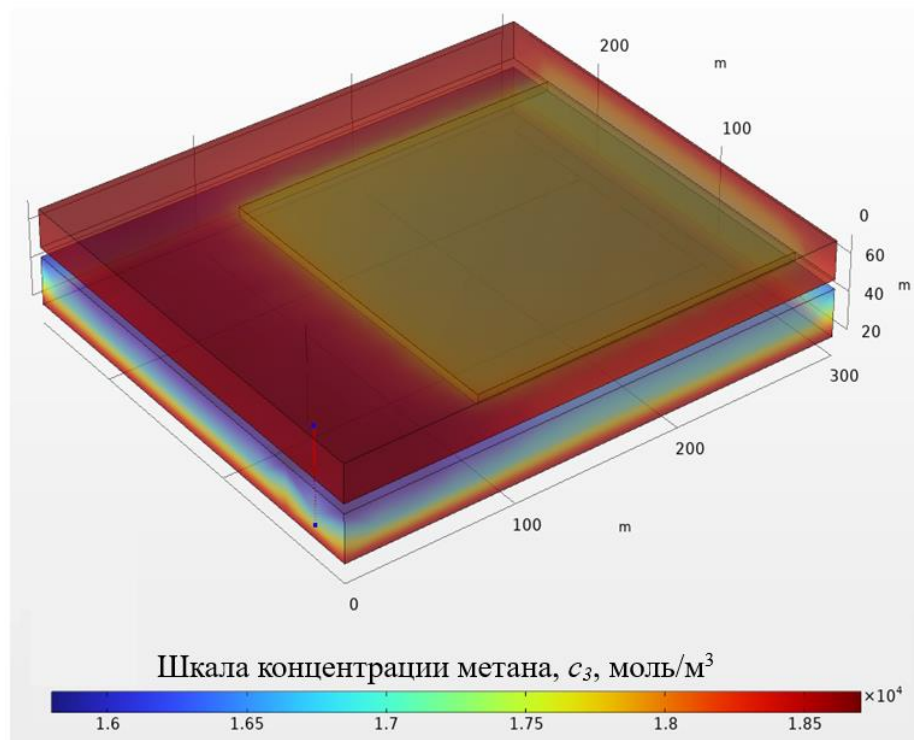


Рис. 3. Распределение метана в кровле и почве выемочного столба в момент времени $t = 110$ сут.

Fig. 3. Distribution of methane in the roof and soil of the excavation column at time $t = 110$ days

Для решения уравнения (1) методом конечных элементов применен метод стабилизации численных схем. Коэффициент диффузии, входящий в состав уравнения, изотропный, поскольку рассматриваемый процесс миграции метана проходит при постоянной температуре. Для реализации оценки объема метана в численном эксперименте

строилась тетраэдрическая расчетная сеть (Рис. 2).

Моделирование процесса диффузии метана в численных экспериментах проводилось в три этапа и заключалось в количественной оценке объемов метана, поступающего в выработанное пространство за время $t = 350$ сут. На первом этапе определялась скорость фильтрации флюида через массив горных пород. Для этого

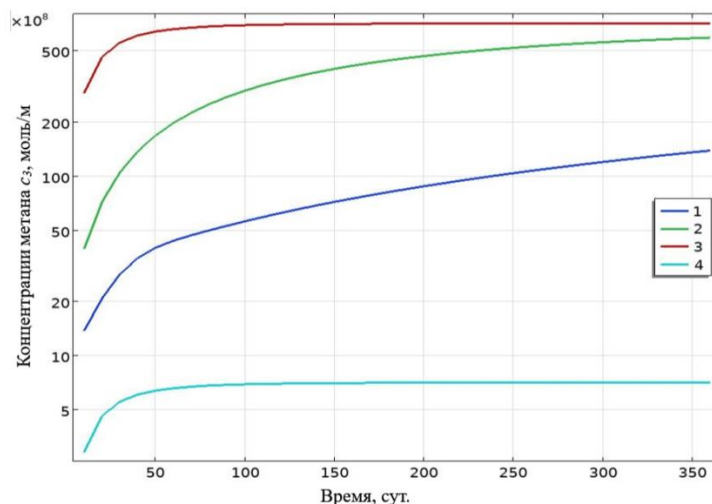


Рис. 5. Суммарное распределение концентрации метана в кровле и почве угольного пласта в окрестностях горной выработки при различных исходных данных:

1 – $D_{\text{CH}_4} = 9,86 \cdot 10^{-6}$, Па·с; 2 – $D_{\text{CH}_4} = 9,86 \cdot 10^{-5}$, Па·с; 3 – $D_{\text{CH}_4} = 9,86 \cdot 10^{-6}$ Па·с,
 $c_0 = 3 \cdot 10^4$ кг/м³; 4 – $D_{\text{CH}_4} = 9,86 \cdot 10^{-6}$ Па·с, $c_0 = 3 \cdot 10^2$ кг/м³

Fig. 5. The total distribution of methane concentration in the roof and floor of the coal seam in the vicinity of the mine workings with different initial data:

1 – $D_{\text{CH}_4} = 9,86 \cdot 10^{-6}$, Pa·s; 2 – $D_{\text{CH}_4} = 9,86 \cdot 10^{-5}$, Pa·s; 3 – $D_{\text{CH}_4} = 9,86 \cdot 10^{-6}$ Pa·s;
 $c_0 = 3 \cdot 10^4$ kg/m³; 4 – $D_{\text{CH}_4} = 9,86 \cdot 10^{-6}$ Pa·s, $c_0 = 3 \cdot 10^2$ kg/m³

задавались области, через которые проходили поступление метана и его выход на поверхность. При этом в качестве начальных исходных данных, представленных в Таблице 1, использовались известные значения физико-механических параметров углеродного массива, включая проницаемость почвы и кровли угольного пласта, а также плотность флюида. На основе полученных в первом эксперименте значений скорости фильтрации метана через слой горных пород был проведен второй этап численного эксперимента, в котором определялся объем флюида, поступивший в горные выработки за 350 сут. Было принято, что объем метана, выраженный через его молекулярную массу, посредством массопереноса мигрирует через те же области, что и на первом этапе эксперимента. Далее проведен анализ распределения метана в кровле и почве выемочного столба в разный момент времени. В численных экспериментах получено распределение метана в кровле и почве выемочного столба на интервале 110 сут. (Рис. 3).

На Рис. 4 представлено изменение концентрации метана, мигрирующего в горные выработки по системе пор и трещин, во времени при различных коэффициентах молекулярной диффузии D_{CH_4} . Так, например, при $D_{\text{CH}_4} = 9,86 \cdot 10^{-6}$ Па·с и начальном значении концентрации метана в кровле и почве пласта $c_0 = 3 \cdot 10^4$ кг/м³ весь объем метана поступит в горные выработки в течение 150 сут.

Заключение

При разработке полуэмпирической модели газовыделения из угольного пласта учитывались данные натуральных наблюдений, в которых регистрировалось содержание метана в шахтной атмосфере. В численных экспериментах установлено, что при изменении коэффициента диффузии от $9,86 \cdot 10^{-6}$ до $9,86 \cdot 10^{-5}$ Па·с концентрация метана, поступающего через почву и кровлю угольного пласта, варьируется от 150 до 350 сут. Для уточнения газового баланса в горных выработках угольных шахт при геофизических опробованиях целесообразно проводить лабораторные исследования по определению коэффициента диффузии метана надрабатываемых и подрабатываемых пластов, а также пластов-спутников. Применение на практике результатов моделирования позволит в дальнейшем повысить точность оценки газового баланса выемочных участков, которая может быть использована при проектировании схем проветривания и систем дегазации угольных шахт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиев С. Б. [и др.] Оценка состояния приконтурного горного массива на сопряжении лавы с примыкающей выемочной выработкой // Уголь. 2023. № 1(1163). С. 35–39. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-1-35-39.
2. Мельник В. В. [и др.] Метановыделение из смежных угольных пластов на очистном участке шахты «Листвяжная» // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2023. № 4. С. 659–672. DOI: 10.46689/2218-5194-2023-2-1-454-465.

3. Трофимов В. А., Филиппов Ю. А. Особенности формирования массопереноса метана в породах междупластья // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2021. № 3(123). С. 71–78. DOI: 10.33285/1999-6934-2021-3(123)-71-78.
4. Забурдяев В. С. Метанообильность высокопроизводительных выемочных участков // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 6. С. 14–19. DOI: <http://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-6-14-19>.
5. Качурин А. Н., Шкурятский Д. Н., Рыбак В. Л. Обоснование математических моделей газообмена угольных пластов с атмосферой очистных и подготовительных участков метанообильных шахт // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. № 3. С. 317–322. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49471070> (дата обращения: 20.08.2024).
6. Черданцев Н. В. Об одном подходе к построению решения задачи о выбросе угля и метана из краевой зоны пласта // Прикладная математика и механика. 2023. Т. 87, № 1. С. 81–111. DOI: 10.31857/S0032823523010058
7. Курленья М. В., Цупов М. Н., Савченко А. В. Приток метана в горные выработки в результате воздействия технологических взрывов на угольный пласт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 9. С. 5–14. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_5.
8. Шаяхметов Р. Т. [и др.] Особенности расчета параметров дегазации добычных участков, отрабатывающих высокогазоносные и выбросоопасные угольные пласты в Карагандинском бассейне // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 11. С. 133–146. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_133.
9. Одинцев В. Н., Милетенко Н. А., Федоров Е. В. Моделирование геомеханических условий скважинной добычи метана из угольного пласта // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2024. № 1. С. 510–527. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65456399> (дата обращения: 20.08.2024).
10. Николаев А. В. [и др.] Влияние процесса выделения метана на воздухораспределение в добычных участках калийных рудников // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2021. № 6. С. 87–97. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-6-87-97.
11. Греков С. П., Всякий А. А. Экспериментально-аналитическое определение коэффициентов диффузии в углях по темпу истечения метана // Научный вестник НИИГД Респиратор. 2020. № 1(57). С. 25–32. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42533432> (дата обращения: 20.08.2024).
12. Масаев Ю. А., Масаев В. Ю. Влияние геомеханических характеристик породного массива на безаварийную разработку угольных месторождений // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2022. № 4. С. 6–13. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50079569> (дата обращения: 20.08.2024).
13. Cheng Y. [и др.] Flow theory of gas in coal seams // Coal Mechanics. 2021. Pp. 377–414. DOI: 10.1007/978-981-16-3895-4_9.
14. Fan Yongpeng [и др.] Numerical simulation of sectional hydraulic reaming for methane extraction from coal seams // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2021. Vol. 95. Article 104180. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.104180.
15. Тайлаков О. В., Макеев М. П., Уткаев Е. А. Определение коллекторских свойств угля на основе численного моделирования и в лабораторных исследованиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 9. С. 99–108. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_99.
16. Гаюбов А. Т. Особенности течения флюидов в пористых средах в условиях нарушения линейного закона Дарси // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И. М. Губкина. 2021. №1(302). С. 19–28. DOI: 10.33285/2073-90282021-1(302)-19-28.
17. Тайлаков О. В. [и др.] Изучение фильтрационных свойств угольного пласта на основе гидродинамических исследований и численного моделирования // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2023. № 4. DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.99.21.005.

© 2024 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Тайлаков Олег Владимирович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук», Институт угля, e-mail: oleg2579@gmail.com

Макеев Максим Павлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук»

наук», e-mail: makeev75@ya.ru

Уткаев Евгений Александрович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией ресурсов и технологий извлечения угольного метана ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук», Институт угля, e-mail: utkaev@mail.ru

Застрелов Денис Николаевич – кандидат технических наук, Старший научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук»

Заявленный вклад авторов:

Тайлаков Олег Владимирович – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, анализ данных, подведение итогов, написание текста, обзор актуальной литературы, сбор данных.

Макеев Максим Павлович – концептуализация исследования, анализ данных, подведение итогов, написание текста, обзор актуальной литературы, сбор данных.

Уткаев Евгений Александрович – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, анализ данных, подведение итогов, написание текста, обзор актуальной литературы, сбор данных.

Застрелов Денис Николаевич – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, анализ данных, подведение итогов, написание текста, обзор актуальной литературы, сбор данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

A SEMI-EMPIRICAL MODEL OF GAS RELEASE FROM A COAL SEAM BASED ON THE STUDY OF RESERVOIR PROPERTIES

Oleg V. Tailakov, Maxim P. Makeev,
Eugeny A. Utkaev, Denis N. Zastrelov

Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry SB RAS

*for correspondence: makeev75@ya.ru



Article info

Received:

09 September 2024

Accepted for publication:

22 November 2024

Accepted:

02 December 2024

Published:

05 December 2024

Keywords: Fluid filtration, carboniferous massif, diffusion coefficient, mass transfer of methane in a rock mass, numerical model.

Abstract.

In the process of mining operations in the mine atmosphere, significant changes occur in the area of intensive coal extraction due to the influx of methane from the mined space, as well as from satellite formations that are separated from each other by a layer of rocks. This process is significantly influenced by the rate of methane release, characterized by a diffusion coefficient, as well as a rapidly developing system of cracks under the influence of rock pressure. The influence of the processes of softening of the carboniferous massif on the rate of methane migration into the mine workings is considered. A semi-empirical model of gas emission is presented, taking into account the physical processes of mass transfer and fluid filtration in a porous medium. During the development of the model, assumptions were made that the migration of methane into the mine workings takes place during an isothermal process, while the concentration of methane in the mixture is expressed in terms of its molecular weight. As initial data for testing the empirical model of methane diffusion, the results of field experiments were selected, including the determination of the physico-mechanical properties of the carboniferous massif and the volumes of methane entering the mine atmosphere. Numerical experiments have shown that the model is sensitive to the initial methane concentration in the satellite layers, as well as to the methane diffusion coefficient through the carboniferous massif. It is shown that the filtration time of methane decreases by 57% with a decrease in the diffusion coefficient by an order of magnitude.

For citation: Tailakov O.V., Makeev M.P., Utkayev E.A., Zastrelov D.N. A semi-empirical model of gas release from a coal seam based on the study of reservoir properties. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 6(166):76-84. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-6-76-84, EDN: RQHJJI

Acknowledgements

The work was performed within the framework of the state assignment of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Project FWEZ-2024-0013 «Creation of multipurpose systems for monitoring and forecasting of gas-dynamic phenomena, control of the stress state, development of methods for their prevention and efficiency assessment during underground development of coal deposits. 2024-2025» (Reg. No. 124041100071-9).

REFERENCES

1. Aliev S.B., Demin V.F., Kainazarov A.S., Miletchenko N.A. Evaluation of the state of the near-contour mountain massif in joint lava with the adjacent excavating development. *Ugol'*. 2023; (1):35–39. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-1-35-39.
2. Melnik V.V., Kachurin A.N., Shakhmatov V.G., Bolgova A.I. Methane release from adjacent coal beds at the refinement site of the Ilyazhnaya mine. *Izvestiya Tula State University. Earth sciences*. 2023; (4):659–672. (In Russ.). DOI: 10.46689/2218-5194-2023-2-1-454-465.
3. Trofimov V.A., Filippov Yu.A. Features of the formation of methane mass transfer in rocks of the inter-region. *Scientific and technical journal «Equipment and technologies for oil and gas complex»*. 2021; 3(123): 71–78. (In Russ.) DOI: 10.33285/1999-6934-2021-3(123)-71-78.
4. Ziburdaev V.S. Methane abundance of high-performance dredging sites. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2022; 6:14–19. (In Russ.) DOI: 10.24000/0409-2961-2022-6-14-19.
5. Kachurin A.N., Shkuratskiy D.N., Rybak V.L. Substantiation of mathematical models for gas exchanging coal bed with the atmosphere of develop and working faces methane dangerous mines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2022; (3):317–322. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49471070> (accessed 20.08.2024). (In Russ., abstract in Eng.)
6. Cherdantsev N.V. About One Approach to the Construction of a Solution to the Problem of Coal and Methane Emissions from the Marginal Zone of the Formation. *Prikladnaya matematika i mehanika*. 2023; 87(1):81–111. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0032823523010058.
7. Kurlenya M.V., Tsupov M.N., Savchenko A.V. Methane inflow in roadways as a result of process blasting impact on coal seam. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2022; (9):5–14. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_5.
8. Shayakhmetov R.T., Atygaev R.K., Filimonov E.N., Stelmakhov A.A. Gas drainage design for extraction areas in highly gassy and outburst-hazardous coal seams in Karaganda Basin. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2022; (11):133–146. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_133.
9. Odintsev V.N., Miletchenko N.A., Fedorov E.V. Modeling of geomechanical conditions of borehole production of methane from a coal seam. *Izvestiya Tula State University. Earth sciences*. 2024; (1):510–527. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65456399> (accessed 20.08.2024). (In Russ., abstract in Eng.)
10. Nikolaev A.V., Maksimov P.V., Lialkina G.B., Konotop D.A. The effect of methane emission on air distribution in potash mine production units. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; (6):87–97. (In Russ.) DOI: 10.21440/0536-1028-2021-6-87-97.
11. Grekov S.P., Vsyakij A.A. Experimental and analytical determination of diffusion coefficients in coals by the rate of methane outflow. *Nauchnyy vestnik NIIGD Respirator*. 2020; (1):25–32. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42533432> (accessed 20.08.2024). (In Russ.)
12. Masaev Yu.A., Masaev V.Yu. The influence of the geomechanical characteristics of the rock mass on the trouble-free development of coal deposits. *Vestnik nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti*. 2022; (4): 6–13. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50079569> (accessed 20.08.2024). (In Russ.)
13. Cheng Y. [et al.] Flow theory of gas in coal seams. *Coal Mechanics*. 2021; 377–414. (In Eng.) DOI: 10.1007/978-981-16-3895-4_9.
14. Fan Yongpeng, Shu Longyong, Huo Zhonggang, Hao Jinwei, Li Yang. Numerical simulation of sectional hydraulic reaming for methane extraction from coal seams. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2021; 95:104180. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.jngse.2021.104180.
15. Tailakov O.V., Makeev M.P., Utkayev E.A. Numerical modeling and laboratory testing of reservoir properties of coal. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2022; (9):99–108. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_99.
16. Gayubov A.T. Features of fluid flow in porous media in violation of Darcy's linear law. *Trudy Rossijskogo gosudarstvennogo universiteta nefti i gaza imeni I.M. Gubkina* 2021; (1):19–28. (In Russ.) DOI: 10.33285/2073-90282021-1(302)-19-28.
17. Tailakov O.V., Makeev M.P., Utkayev E.A., Martysiash D.A. Study of filtration properties of coal

formation based on hydrodynamic studies and numerical modeling. *Vestnik Nauchnogo centra VostNII po*

promyshlennoj i ekologicheskoj bezopasnosti. 2023; 4. (In Russ.) DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.99.21.005.

© 2024 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Oleg V. Tailakov – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Chief Scientific Officer, Federal State Budgetary Institution «Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», Institute of Coal, e-mail: oleg2579@gmail.com

Maxim P. Makeev – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Federal State Budgetary Institution «Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», Institute of Coal, e-mail: makeev75@ya.ru

Evgeniy A. Utkaev – Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Coalbed Methane Resources and Recovery Technologies, e-mail: utkaev@mail.ru

Denis N. Zastrelov – Candidate of Technical Sciences Senior Researcher, Federal State Budgetary Institution «Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», Institute of Coal.

Contribution of the authors:

Oleg V. Tailakov – research task, conceptualizing research, analyzing data, summarizing, writing a text, reviewing relevant literature, collecting data.

Maxim P. Makeev – conceptualization of research, data analysis, summing up, writing text, review of relevant literature, data collection.

Evgeniy A. Utkaev – formulation of a research task, conceptualization of research, data analysis, summing up, writing a text, reviewing relevant literature, data collection.

Denis N. Zastrelov – setting a research task, conceptualizing research, analyzing data, summarizing, writing a text, reviewing relevant literature, collecting data.

All authors have read and approved the final manuscript.

