

Оценка моделей проницаемости углепородного массива с учётом напряженно-деформированного состояния

Н.В. Ледяев¹, А.А. Черухин¹, К.С. Коликов², А.И. Маневич^{2, 3}✉

¹ АО «СУЭК-Кузбасс», г. Ленинск-Кузнецкий, Российская Федерация

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация

³ Геофизический центр Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

✉ ai.manevich@yandex.ru

Резюме: Оценка проницаемости угольных пластов лежит в основе расчёта метанообильности выработок и определения параметров предварительной дегазации угольных пластов. Для адекватной оценки нагрузки на очистной забой по газовому фактору, проектирования схем дегазации и управления рисками аварийных ситуаций на угольных шахтах необходима корректная модель проницаемости углепородного массива. В работе рассмотрены основные эмпирико-аналитические зависимости, описывающие проницаемость угольных пластов как функцию напряженно-деформированного состояния. Показано, что каждая из рассматриваемых моделей отражает собственный набор факторов: сорбционно-упругие деформации, термоупругий эффект, изменение пористости или прочности угольного пласта. Выполненный вариационный расчёт в диапазоне эффективных напряжений 0–50 МПа и глубин до 1500 м подтвердил общую закономерность: проницаемость падает нелинейно, причём главная зона снижения приходится на эффективное напряжение ($\sigma_{эфф}$) \approx 5–15 МПа. Для надёжного трехмерного прогноза проницаемости углепородного массива необходим расширенный банк исходных данных. К ключевым параметрам относятся: литостатическое и тектоническое напряжения по карте глубин, модуль Юнга и коэффициент Пуассона вмещающих пластов, пористость и трещиноватость угля, коэффициенты адсорбции/десорбции, температурный градиент. Интеграция результатов в блочную ГИС-модель позволяет учесть пространственную вариабельность свойств и перейти от усредненных оценок к локальной проницаемости, что принципиально необходимо для проектирования схем дегазационных скважин и расчёта их дебитов.

Ключевые слова: проницаемость угля, напряженно-деформированное состояние, эффективное напряжение, сорбционно-упругие деформации, дегазация, угольные пласты

Для цитирования: Ледяев Н.В., Черухин А.А., Коликов К.С., Маневич А.И. Оценка моделей проницаемости углепородного массива с учётом напряженно-деформированного состояния. *Горная промышленность*. 2025;(6):194–198. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-194-198>

Assessment of permeability models for coal-bearing massifs considering stress-strain state

N.V. Ledyayev¹, A.A. Chernukhin¹, K.S. Kolikov², A.I. Manevich^{2, 3}✉

¹ SUEK-Kuzbass JSC, Leninsk-Kuznetsky, Russian Federation

² National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russian Federation

³ Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ ai.manevich@yandex.ru

Abstract: Assessment of coal seam permeability forms the basis for calculating methane content in mine workings and determining parameters for preliminary gas drainage from a coal seams. A correct model of coal mass permeability is essential for an adequate assessment of the gas factor load on the working face, the design of gas drainage systems, and management of accident risks in coal mines. The paper examines the main empirical and analytical relationships describing the permeability of coal seams as a function of their stress-strain state. It is shown that each of the considered models reflects its own set of factors, i.e. the sorption-elastic deformations, thermoelastic effects, changes in porosity, or the strength of the coal seam. A variational calculation performed in the range of effective stresses from 0 to 50 MPa and the depths up to 1,500 meters confirmed a general trend that permeability decreases nonlinearly, with the main reduction zone occurring at the effective stress of ($\sigma_{эфф}$) \approx 5–15 Mpa. An extensive database of input data is required for a reliable 3D forecast of coal mass permeability. The key parameters include

lithostatic and tectonic stresses according to the depth map, Young modulus and Poisson ratio of the host strata, coal porosity and fracturing, adsorption and desorption factors, and the temperature gradient. Integrating the results into a block GIS model makes it possible to take into account the spatial variability of properties and move from averaged estimates to local permeability, which is essential for designing methane drainage boreholes and calculating their flow rates.

Keywords: coal permeability, stress-strain state, effective stress, sorption-elastic deformations, gas drainage, coal seams

For citation: Ledyayev N.V., Chernukhin A.A., Kolikov K.S., Manevich A.I. Assessment of permeability models for coal-bearing massifs considering stress-strain state. *Russian Mining Industry*. 2025;(6):194–198. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-194-198>

Введение

Оценка проницаемости угольных пластов лежит в основе корректного расчёта метанообильности выработок и определения параметров предварительной дегазации угольных пластов. Корректная модель проницаемости угленосного массива необходима для адекватной оценки нагрузки на очистной забой по газовому фактору, проектирования схем дегазации и управления рисками аварийных ситуаций на угольных шахтах [1].

Уголь как горная порода образуется вследствие много-ступенчатого преобразования растительных остатков, происходящего под влиянием биохимических, геологических и тектонических факторов [2–4]. Пористость и трещиноватость, а значит и проницаемость, определяются как первоначальными условиями осадконакопления, так и последующими тектоническими процессами формирования угля. Нарастающие напряжения могут закрывать трещины и уменьшать фильтрационную способность массива, тогда как разгрузка, напротив, раскрывает кливаж и повышает проницаемость [5]. Сорбционно-упругие процессы тоже играют роль: набухание матрицы при адсорбции газа сужает трещины, а усадка при десорбции способствует их раскрытию [6; 7].

Тектоническая обстановка осадочного бассейна (стабильно-платформенная или активно-складчатая) определяет конфигурацию пластов и интенсивность разрывных нарушений [4]. Складки, разломы и зоны меланжа усложняют внутреннюю структуру угольных тел, создавая сети трещин различного масштаба и ориентации [8; 9]. В местах сильной тектонической нарушенности проницаемость, как правило, выше за счёт развёрнутой трещинной системы, что облегчает высвобождение метана. При этом разломы перераспределяют напряжения, формируя локальные зоны как повышенной, так и пониженной фильтрационной способности [5; 9]. На напряжённое состояние дополнительно влияют вмещающие породы: твёрдые песчаники или известняки концентрируют нагрузки, а пластичные глины, наоборот, способствуют их перераспределению [7; 10; 11].

Материалы и методы

Пустоты в породе формируют каналы в форме пор, микротрещин, трещин. Структура массива схематически показана на рис. 1. Фильтрация сквозь массив возможна только в случае связанной системы потоковых каналов разного типа в направлении от А к Б. Если в результате изменения физико-механических условий исчезает связь по микротрещинам (рис. 1, б и в), то проницаемость обеспечивается поровой компонентой. При отсутствии перколяции (просачивания) по всем видам каналов массив будет непроницаем. Проницаемость породы (ее структура) могут изменяться под воздействием множества факторов.

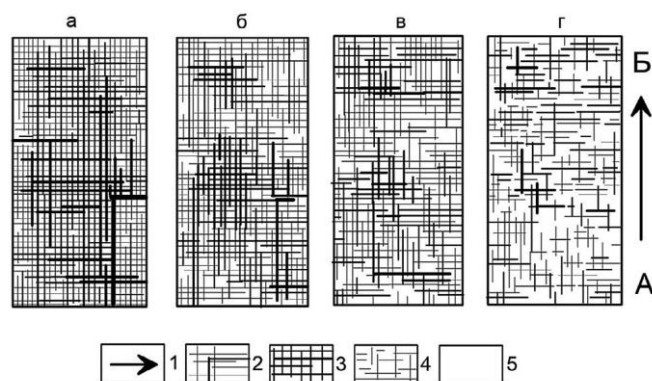


Рис. 1
Схема структуры массива / образца по [12]:
1 – направление фильтрации;
2 – трещины;
3 – микротрещины;
4 – поры;
5 – нетрещиноватый кристалл

Fig. 1
A schematic representation of the rock mass / sample structure according to [12]:
1 – filtration direction;
2 – fractures;
3 – microfractures;
4 – pores;
5 – non-fractured crystal

Функция проницаемости угольного пласта в общем виде может быть представлена как зависимость, которая учитывает структурные, тектонические, термодинамические и флюидодинамические характеристики угля:

$$k = f(\sigma, \varepsilon, \phi, \mu, T, P, d, \rho, \theta), \quad (1)$$

где k – проницаемость, м^2 ; σ – напряжения, Па, включая горизонтальные и вертикальные компоненты; ε – деформации, связанные с упругими, пластическими и хрупкими изменениями массива; ϕ – пористость угольного пласта, доля, %; μ – вязкость флюида, $\text{Па} \cdot \text{с}$; T – температура, К; P – пластовое давление флюида, Па; d – размеры трещин и пор, м; ρ – плотность угля, $\text{кг}/\text{м}^3$; θ – угол ориентации трещин, град.

Как было показано выше, факторов, воздействующих на проницаемость угля, большое количество. По этой причине учет их влияния по отдельности на проницаемость угля требует составления ансамбля моделей. Для моделирования исходной проницаемости угля требуется учет большого количества неопределенностей и верификация исходных данных, что невозможно в масштабных моделях. Эмпирико-аналитические модели, включающие в себя компоненты тензора сорбционных деформаций, связь тензора напряжений с тензором проницаемости, могут быть адекватно применимы для локальных участков и решения точечных задач (к примеру, для оценки проницаемости призабойного массива). Поэтому обычно в эмпирических моделях напряженно-деформированное состояние уголь-

Таблица 1
Сравнение эмпирических зависимостей проницаемости угля от действующих напряжений

№	Источник	Формула	Краткое описание
1	Gray [13]	$k_{\sigma} = k_0 \exp(-C_p \times \sigma_{эфф})$	Учет только закрытия/раскрытия трещин вследствие действия механических напряжений. Использование абсолютных значений эффективного напряжения
2	Siedle et al. [14; 15]	$k_{\sigma} = k_0 \exp(-3C_p \Delta\sigma_{эфф} + S\Delta\varepsilon_s)$	Учет влияния сорбционных деформаций на раскрытие/закрытие трещин. Использование относительного (изменения) эффективного напряжения
3	Palmer and Mansoori [16]	$k_{\sigma} = k_0 \exp(-C_p \times \sigma_{эфф} + (1 - \gamma)\varepsilon_s)$	Учет влияния сорбционных и термоупругих деформаций на раскрытие/закрытие трещин. Использование абсолютных значений эффективного напряжения
4	Shi and Durucan [17; 18]	$k_{\sigma} = k_0 \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^n \exp(-3C_p \Delta\sigma_{эфф} + S\Delta\varepsilon_s)$	Учет пористости и влияния сорбционных и термоупругих деформаций на раскрытие/закрытие трещин. Использование относительного (изменения) эффективного напряжения
5	Каркашадзе и Хаутиев [19]	$k_{\sigma} = k_0 \times 10^{-C_p \times 10^{-6} \times (\sigma_0 - \sigma) \times \frac{E}{E_0}}$	Учет механических свойств массива пород и влияния сорбционных деформаций на раскрытие/закрытие трещин. Использование среднего нормального напряжения

Примечания: C_p – коэффициент чувствительности проницаемости к эффективному напряжению; $\sigma_{эфф}$ – эффективное напряжение; $\Delta\sigma_{эфф}$ – изменение эффективного напряжения; $\Delta\varepsilon_s$ – изменение сорбционной деформации; S – коэффициент чувствительности проницаемости к сорбционным деформациям; γ – коэффициент компенсации сорбционных деформаций; ϕ – пористость угольного пласта при действующем эффективном напряжении; ϕ_0 – исходная пористость угольного пласта при отсутствии действующих напряжений; σ – текущее среднее нормальное напряжение; σ_0 – исходное среднее нормальное напряжение; E – текущий модуль Юнга горных пород при действующем среднем напряжении; E_0 – исходный модуль Юнга горных пород при отсутствии действующих напряжений.

Note: C_p – permeability sensitivity factor vs the effective stress; $\sigma_{эфф}$ – effective stress; $\Delta\sigma_{эфф}$ – changes in the effective stress; $\Delta\varepsilon_s$ – changes in the sorption deformation; S – permeability sensitivity factor vs the sorption deformation; γ – sorption deformation compensation factor; ϕ – coal seam porosity under effective stress; ϕ_0 – initial porosity of the coal seam in the absence of effective stresses; σ – current average normal stress; σ_0 – initial average normal stress; E – current Young modulus of the rock at the current average stress; E_0 – initial Young modulus of the rock in the absence of effective stresses.

ного пласта рассматривается в виде двух основных составляющих – среднего напряжения в массиве и глубины залегания пласта. Факторы сорбционных деформаций, порового давления применяются в моделях макро-масштаба. Рассмотрим основные эмпирические модели, которые для удобства сравнения были приведены к единому аналитическому виду (табл. 1).

Результаты

Таким образом, основные эмпирические модели представлены в сравнительной табл. 1. Если использовать модель литостатического давления с учетом давления бокового отпора по модели А.Н. Динника [20], можно оценить изменение среднего и эффективного напряжения с глубиной. Эти данные можно использовать для моделирования исходной (начальной) проницаемости угольных пластов в ненарушенном массиве для последующего более точного моделирования или быстрой оценки проницаемости углепородного массива. На графике зависимости проницаемости от эффективного напряжения (рис. 2) показаны результаты расчетов по пяти моделям: [13; 15; 16; 17; 19]. Эти же расчеты можно привести в соответствие зависимости проницаемости от глубины залегания угольного пласта (рис. 3). Общая тенденция всех моделей заключается в нелинейном уменьшении проницаемости с ростом эффективного напряжения, что отражает физические процессы сжатия порового пространства и закрытия трещин в угольном пласте под действием внешних нагрузок. Однако каждая модель учитывает разные физические и геомеханические факторы, что приводит к различной чувствительности и форме кривых.

Массив исходных данных для моделирования проницаемости угольных пластов должен быть сформирован на

Table 1
A comparison of the empirical dependencies of coal permeability and effective stresses

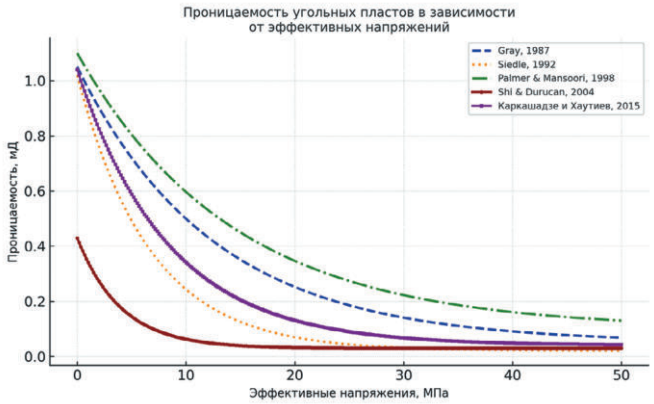


Рис. 2
Сводный график зависимостей проницаемости от эффективных напряжений в разных моделях (при принятых константах $C_p = 0.1 \text{ Па}^{-1}$; $k_0 = 1 \times 10^{-12} \text{ м}^2 \text{ (1 мД)}$; $\Delta\varepsilon_s = 0.5$; $S = 0.5$; $\gamma = 0.5$; $\phi_0 = 0.03$; $\phi = 0.02$; $E_0 = 5 \times 10^9$; $E = 3 \times 10^9$)

Fig. 2
A cross plot of permeability dependencies on the effective stresses in different models (with the accepted constants $C_p = 0.1 \text{ Па}^{-1}$; $k_0 = 1 \times 10^{-12} \text{ м}^2 \text{ (1 мД)}$; $\Delta\varepsilon_s = 0.5$; $S = 0.5$; $\gamma = 0.5$; $\phi_0 = 0.03$; $\phi = 0.02$; $E_0 = 5 \times 10^9$; $E = 3 \times 10^9$)

основе геомеханических, физико-химических и термодинамических характеристик угольного массива, а также внешних воздействующих факторов, определяющих напряженно-деформированное состояние и сорбционно-деформационные процессы. Основой для моделирования служат геолого-технические параметры, такие как глубина залегания пласта, м, плотность горных пород ρ , кг/м³, пористость угля ϕ , доли/проценты, начальная проницаемость k_0 , мД, и литологический состав углепородного массива.

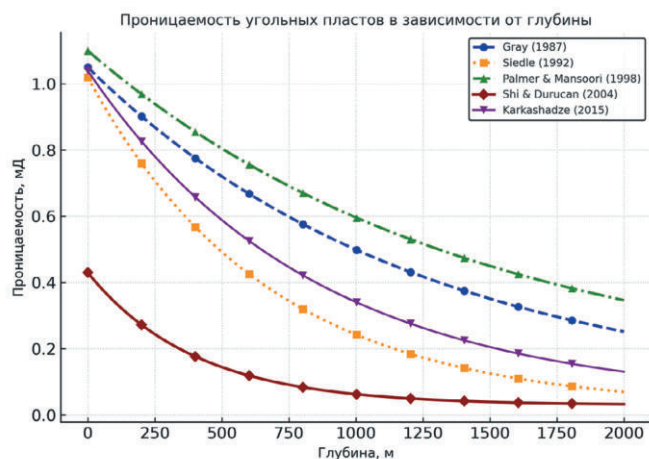


Рис. 2
Сводный график зависимостей проницаемости от эффективных напряжений в разных моделях (при принятых константах $C_p = 0.1 \text{ Па}^{-1}$; $k_0 = 1 \times 10^{-12} \text{ м}^2$ (1 мД); $\Delta \varepsilon_s = 0.5$; $S = 0.5$; $\gamma = 0.5$; $\phi_0 = 0.03$; $\phi = 0.02$; $E_0 = 5 \times 10^9$; $E = 3 \times 10^9$)

Fig. 2
A cross plot of permeability dependencies on the effective stresses in different models (with the accepted constants $C_p = 0.1 \text{ Па}^{-1}$; $k_0 = 1 \times 10^{-12} \text{ м}^2$ (1 мД); $\Delta \varepsilon_s = 0.5$; $S = 0.5$; $\gamma = 0.5$; $\phi_0 = 0.03$; $\phi = 0.02$; $E_0 = 5 \times 10^9$; $E = 3 \times 10^9$)

ва. Для определения эффективного напряжения требуются данные о литостатическом давлении (с учётом плотности пород и глубины залегания) и тектонических напряжениях, которые в совокупности определяют действующие механические нагрузки угольного пласта. Необходимо учесть сжимаемость угля и параметры упругих модулей: модуля Юнга E , Па, и коэффициента Пуассона ν . Требуется информация о сорбционных свойствах угля, включая коэффициенты уравнения Ленгмюра. Температурные характеристики включают геотермический градиент ΔT , $^\circ\text{C}/\text{м}$, и среднюю температуру пласта. Для моделей, учитывающих пористость и её изменения, необходимо предоставить начальные и текущие значения пористости (ϕ_0 , ϕ). Для точного моделирования рекомендуется учитывать структурные характеристики трещиноватости массива, включая размеры трещин, их ориентацию и распределение. Важно учитывать

региональную тектоническую обстановку района, включая данные о региональных и локальных напряжениях, а также геометрию разломов. В итоге массив исходных данных должен включать комплекс геолого-физических, геомеханических и термодинамических параметров, необходимых для калибровки и валидации моделей проницаемости на основе эффективного напряжения, сорбционных и термических деформаций, что обеспечит их достоверность и применимость для прогноза фильтрационно-ёмкостных свойств угольного пласта в различных геодинамических условиях.

Выводы

Эмпирические зависимости пригодны для крупномасштабных оценок. При дефиците детализированных данных опробования именно по моделям [13; 15; 16; 17; 19] можно быстро получить первый прогноз исходной проницаемости угольного пласта, опираясь на глубину залегания, литологию и средние значения напряжений. При этом ни одна модель не является универсальной. Учет сорбционных деформаций целесообразно определять по модели Siedle et al. [14; 15]; для глубоких пластов с высоким геотермическим градиентом целесообразно применение модели Palmer and Mansoori [16]; при выраженной анизотропии порового пространства наименее искажённые результаты даёт модель Shi and Durucan [17; 18]; учет упругих свойств дает модель Каркашадзе и Хаутиева [19]. Общая тенденция одинакова для всех моделей: по мере роста эффективного напряжения проницаемость падает нелинейно; основной градиент снижения наблюдается в диапазоне $\sigma_{\text{эфф}} \approx 5\text{--}15 \text{ МПа}$, после чего кривые выполаживаются.

Для надёжного трехмерного прогноза проницаемости углепородного массива необходим расширенный банк исходных данных. К ключевым параметрам относятся: литостатическое и тектоническое напряжение по карте глубин, модуль Юнга и коэффициент Пуассона вмещающих пластов, пористость и трещиноватость угля, коэффициенты адсорбции/десорбции, температурный градиент. Интеграция результатов в блочную ГИС-модель позволяет учесть пространственную вариабельность свойств и перейти от усредненных оценок к локальной проницаемости, что принципиально необходимо для проектирования схем дегазационных скважин и расчёта их дебитов.

Список литературы / References

1. Литвинов А.Р., Коликов К.С., Ишхнели О.Г. Аварийность и травматизм на предприятиях угольной промышленности в 2010-2015 годах. *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2017;(2):6–17. Litvinov A.R., Kolikov K.S., Ishkhneli O.G. Accident and traumatism at coal industry enterprises in 2010–2015. *Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety)*. 2017;(2):6–17. (In Russ.)
2. Lloyd M.K., Trembath-Reichert E., Dawson K.S., Feakins S.J., Mastalerz M., Orphan V.J. Methoxyl stable isotopic constraints on the origins and limits of coal-bed methane. *Science*. 2021;374(6569):894–897. <https://doi.org/10.1126/science.abg0241>
3. Акматов Д.Ж., Евлов Х.Ю., Меллер А.Д., Манукян Т.А., Чадин В.Н. Методика численного моделирования полей напряжений в районе размещения угольных шахт. *Горная промышленность*. 2023;(1):39–44. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-1-39-44> Akmatov D.Zh., Evloev H.Y., Meller A.D., Manukyan T.A., Chadin V.N. Methodology for numerical modeling of stress fields in vicinities of coal mines. *Russian Mining Industry*. 2023;(1):39–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-1-39-44>
4. Manevich A.I., Kolikov K.S., Egorova E.A. Geoecological aspects of stress-strain state modeling results of Leninsky coal deposit (Kuzbass, Russia). *Russian Journal of Earth Sciences*. 2019;19(4):ES4002. <https://doi.org/10.2205/2019ES000663>
5. Егорова Е.А., Коликов К.С., Мегид Х.А. Оценка проницаемости угольного пласта с учетом неоднородности в геологической структуре кровли. *Горный журнал*. 2016;(6):56–59. <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.06.02> Egorova E.A., Kolikov K.S., Meguid H.A. Coal seam permeability assessment considering geological structure nonuniformity in the roof. *Gornyi Zhurnal*. 2016;(6):56–59. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.06.02>

6. Pan Z., Connell L.D. Modelling permeability for coal reservoirs: A review of analytical models and testing data. *International Journal of Coal Geology*. 2012;92:1–44. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.12.009>
7. Lu S., Shi J., Jiao L., Ma Y., Li W., Sa Z. et al. A review of coal permeability models including the internal swelling coefficient of matrix. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2024;11:50. <https://doi.org/10.1007/s40789-024-00701-0>
8. Столбова Н.Ф., Исаева Е.Р. *Петрология углей*. Томск: Изд-во Томского политехнического университета; 2013. 77 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-petrologiya-ugley.pdf> (дата обращения: 02.07.2025).
9. Batugin A., Kobylkin A., Kolikov K., Ivannikov A., Musina V., Khotchenkov E. et al. Study of the migrating mine gas piston effect during reactivation of tectonic faults. *Applied Sciences*. 2023;13(21):12041. <https://doi.org/10.3390/app132112041>
10. Robertson E.P., Christiansen R.L. A permeability model for coal and other fractured, sorptive-elastic media. *SPE Journal*. 2008;13(3):314–324. <https://doi.org/10.2118/104380-PA>
11. Connell L.D., Lu M., Pan Z. An analytical coal permeability model for tri-axial strain and stress conditions. *International Journal of Coal Geology*. 2010;84(2):103–114. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2010.08.011>
12. Шмонов В.М., Витовтова В.М., Жариков А.В. *Флюидная проницаемость пород земной коры*. М.: Научный мир; 2002. 216 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/34016> (дата обращения: 02.07.2025).
13. Gray I. Reservoir engineering in coal seams, part 1 – the physical process of gas storage and movement in coal seams. *SPE Reservoir Engineering*. 1987;2(1):28–34. <https://doi.org/10.2118/12514-PA>
14. Seidle J. Fundamentals of coalbed methane reservoir engineering. PennWell Books; 2011. 470 p.
15. Seidle J.P., Jeanson M.W., Erickson D.J. *Application of matchstick geometry to stress dependent permeability in coals* [Paper presented at the SPE Rocky Mountain Regional Meeting, Casper, Wyoming]. May 1992. <https://doi.org/10.2118/24361-MS>
16. Palmer I., Mansoori J. How permeability depends on stress and pore pressure in coalbeds: A new model. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*. 1998;1(6):539–544. <https://doi.org/10.2118/52607-PA>
17. Shi J.Q., Durucan S. A model for changes in coalbed permeability during primary and enhanced methane recovery. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*. 2005;8(4):291–299. <https://doi.org/10.2118/87230-PA>
18. Shi J.Q., Durucan S. Drawdown induced changes in permeability of coalbeds: a new interpretation of the reservoir response to primary recovery. *Transport in Porous Media*. 2004;56(1):1–16. <https://doi.org/10.1023/B:TIPM.0000018398.19928.5a>
19. Каркашадзе Г.Г., Хаутиев А.М.Б. Моделирование процесса дегазации угольного пласта через скважины с учетом геомеханических напряжений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(2):235–242. Karkashadze G.G., Hautiev A.M.B. Modeling coal bed degassing with wells considering geomechanical stresses. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(2):235–242. (In Russ.)
20. Динник А.Н. О давлении горных пород и расчет крепи круглой шахты. *Инженерный работник*. 1925;(7):1–12. Dinnik A.N. On rock pressure and calculation of round mine support. *Inzhenernyi Rabotnik*. 1925;(7):1–12. (In Russ.)

Информация об авторах

Ледяев Николай Владимирович – начальник управления противоаварийной устойчивости предприятий, АО «СУЭК-Кузбасс», г. Ленинск-Кузнецкий, Российская Федерация

Черухин Алексей Анатольевич – заместитель главного инженера по вентиляции шахты им. С.М. Кирова, АО «СУЭК-Кузбасс», г. Ленинск-Кузнецкий, Российская Федерация

Коликов Константин Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности и экологии горного производства Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-8831-1927>; e-mail: kolikovks@mail.ru

Маневич Александр Ильич – научный сотрудник лаборатории геодинамики, Геофизического центра Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; старший преподаватель кафедры безопасности и экологии горного производства Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: a.manevich@gcras.ru

Information about the authors

Nikolay V. Ledyayev – Head of the Department of Emergency Management of Enterprises, SUEK-Kuzbass JSC, Leninsk-Kuznetsky, Russian Federation

Alexey A. Chernukhin – Deputy Chief Engineer for Ventilation of the Kirov Mine, SUEK-Kuzbass JSC, Leninsk-Kuznetsky, Russian Federation

Konstantin S. Kolikov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Department of Safety and Ecology of Mining, Mining Institute, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-8831-1927>; e-mail: kolikovks@mail.ru

Alexander I. Manevich – Researcher at the Laboratory of Geodynamics, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; Senior Lecturer at the Department of Mining Safety and Ecology, Mining Institute, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: a.manevich@gcras.ru

Article info

Received: 03.09.2025

Revised: 23.10.2025

Accepted: 24.10.2025

Информация о статье

Поступила в редакцию: 03.09.2025

Поступила после рецензирования: 23.10.2025

Принята к публикации: 24.10.2025