



**ОЦЕНКА ПРОНИЦАЕМОСТИ УГЛЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ И МИКРОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА ТРЕЩИНОВАТОСТИ**

Т. В. Шилова, С. В. Сердюков

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: shilovatanya@yandex.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Выполнен микроструктурный анализ тестируемого угля, определены раскрытие трещин и размеры микроблоков угля вдоль кливажа. Проведены лабораторные фильтрационные исследования, по результатам которых установлены коэффициент сжимаемости трещин и зависимость проницаемости от гидростатического сжатия, дана оценка ее анизотропии вдоль напластования. Получены прогнозные зависимости изменения проницаемости угля параллельно основной и торцевой системам кливажа от глубины залегания в условиях одноосного деформирования пластов.

Уголь, кливаж, проницаемость, анизотропия, напряженное состояние, глубина залегания

**ESTIMATION OF COAL PERMEABILITY BY RESULTS OF FILTRATION EXPERIMENTS
AND FRACTURE MICROSTRUCTURAL ANALYSIS**

T. V. Shilova and S. V. Serdyukov

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: shilovatanya@yandex.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The microstructural analysis of tested coal is performed. The fracture width and sizes of coal micro-blocks along cleats are determined. The laboratory filtration tests are carried out. The coal cleat compressibility and the dependence of coal permeability on hydrostatic stress are determined by the obtained results. The permeability anisotropy along bedding planes is estimated. The predicted dependences of coal permeability along face and butt cleats on occurrence depth are obtained for uniaxial strain conditions.

Coal, cleat, permeability, anisotropy, stress state, occurrence depth

Для извлечения метана и снижения опасности аварий угольные пласты дегазируют. При проектировании и выполнении дегазационных мероприятий необходимо учитывать проницаемость угля как основное свойство, определяющее фильтрацию и эффективность извлечения метана из пластов [1, 2].

В угле метан находится в пустотах молекулярной кристаллической решетки, в объеме и на поверхности трещин. Твердая матрица разделена трещинами кливажа и поверхностями напластования на микроблоки, содержащие основную часть газа. Эндогенный кливаж представлен основной и торцевой системами трещин, ортогональными друг другу (рис. 1). Их проницаемость на несколько порядков больше проницаемости угля в микроблоках.

Неоднородность структуры угольного пласта вызывает анизотропию его фильтрационных свойств. Использование данных об анизотропии проницаемости пласта позволяет повысить эффективность дренажа газа в угольных шахтах за счет оптимального размещения дегазационных скважин [3].

Фильтрационные свойства угольного пласта зависят от его напряженно-деформированного состояния. Модели одноосного деформирования пласта подходят для описания изменения проницаемости углей в масштабах угленосных районов, а также в горизонтально залегающих пластах с преобладающим эндогенным кливажем [3–5].

В данной работе приведены результаты лабораторных исследований проницаемости и микроструктуры образцов коксующегося угля марки “Ж”, отобранных на шахте им. С. Д. Тихова в Ленинском районе Кузбасса. Экспериментальные результаты были сопоставлены со значениями проницаемости, рассчитанными с использованием известных теоретических моделей, данных микроструктурного анализа и оценок сжимаемости трещин. Определена наиболее подходящая для тестируемого угля модель и анизотропия проницаемости вдоль напластования. На основе полученных данных построены прогнозные зависимости проницаемости от глубины залегания в условиях одноосного деформирования пластов [5, 6].

Изучение структуры образцов включало определение ширины трещин, блоков угольной матрицы, угла между трещинами кливажа. При проведении исследований использовался анализатор структуры горных пород “Минерал С7”. Установлено, что тестируемый уголь характеризуется блочным строением, а именно, твердая матрица разделена на микроблоки системами трещин основного и торцевого эндогенного кливажа (рис. 1).

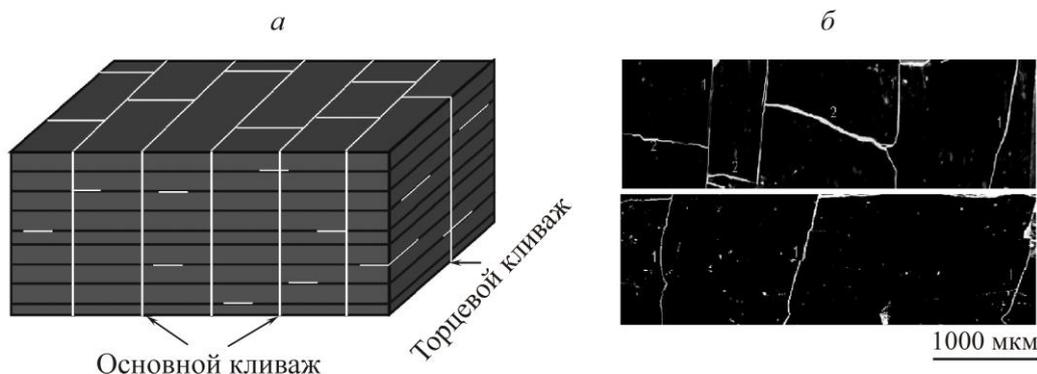


Рис. 1. *a* — схематичная структура угольного пласта; *б* — структура коксующегося угля марки “Ж”, шахта им. С. Д. Тихова, Ленинский район, Кузбасс: 1 — трещины основного кливажа; 2 — трещины торцевого кливажа

Среднее раскрытие основных трещин a_f составляет 12.6 мкм при размере блоков угольной матрицы A_f в этом направлении 2213.3 мкм. Средний размер блоков угольной матрицы между торцевыми трещинами A_b равняется 925 мкм, а их раскрытие a_b — 8.2 мкм.

Исследования проницаемости угля проведены при равномерном сжатии образцов. Описание лабораторной установки и методики экспериментов представлены в [7]. В испытаниях использовали цилиндрические образцы высотой 30 мм и радиусом 15 мм, которые изготовлены из угля плитного класса в направлении простирания трещин основного кливажа. Фильтрационные эксперименты выполняли при различных давлениях равномерного сжатия образца σ (от 1 до 8 МПа) и постоянном перепаде давления газа ΔP на торцах образца (от 0.01 до 0.1 МПа). Среднее значение начальной (без сжатия) проницаемости угля марки “Ж” при перепаде давления газа $\Delta P = 0.1$ МПа составило 75.7 мД. При увеличении давления равномерного сжатия с 1 до 8 МПа проницаемость угля уменьшается в 6.7 раз с 60 до 9 мД соответственно (рис. 2).

В моделях, описывающих проницаемость угля, сжимаемость трещин обычно считают постоянной. По результатам фильтрационных тестов при сжатии керна 0.1, 1 и 2 МПа получено значение коэффициента сжимаемости трещин $C_f = 0.085 \pm 0.004$ МПа⁻¹ [8]. В более сложных

моделях сжимаемость трещин считается функцией напряжений [9] и характеризуется двумя параметрами: начальным значением C_0 и коэффициентом изменения сжимаемости трещин α от нагрузки. Оценка параметра C_0 выполнена по методике, приведенной в работе [8], а коэффициента α — по методике из работы [9]. Получены значения искомых параметров: $C_0 = 0.0715 \pm 0.0078 \text{ МПа}^{-1}$, $\alpha = 1.83 \cdot 10^{-4} \text{ МПа}^{-1}$.

Одной из задач настоящего исследования является выбор подходящей теоретической модели проницаемости угля по результатам сравнения экспериментальных и расчетных данных. Применялись модели Seidle (1992) [10] и Robertson and Christiansen (2006) [11] для анализа данных лабораторных фильтрационных тестов, проводимых в условиях равномерного нагружения образцов. Установлено, что модель Seidle (1992) более адекватно описывает изменение проницаемости тестируемого угля с увеличением его сжатия (рис. 2).

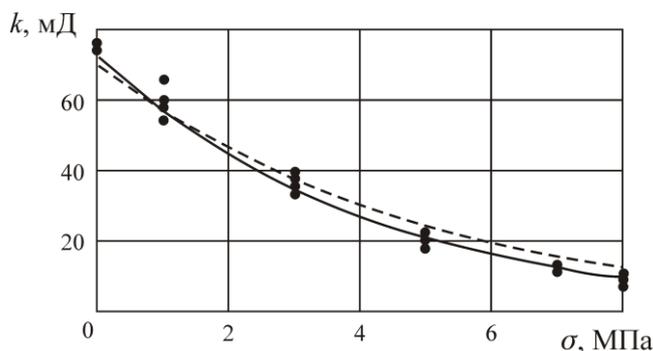


Рис. 2. Зависимость коэффициента проницаемости k тестируемого угля от сжатия σ : точки — результаты фильтрационных экспериментов; сплошная кривая рассчитана по модели Seidle (1992) [10]; пунктирная — по модели Robertson and Christiansen (2006) [11]

Для оценки анизотропии фильтрационных свойств угля по напластованию воспользуемся известным подходом, в котором угольный пласт описывается моделью гомогенной непроницаемой среды, разделенной двумя взаимно ортогональными системами эквидистантно расположенных параллельных трещин, секущих пласт. Согласно [12, 13] проницаемость таких трещин определяется выражениями:

$$k_f = a_f^3 / 12A_f, \quad k_b = a_b^3 / 12A_b, \quad (1)$$

где k_f — проницаемость трещин основного кливажа, мД; k_b — проницаемость трещин торцевого кливажа, мД.

В соответствии с (1) и данными микроструктурного анализа начальная проницаемость ненагруженного угля марки “Ж” составляет $k_f = 74.6$ мД, $k_b = 50.4$ мД. Расчетное значение k_f близко к среднему значению, полученному в экспериментах (75.7 мД). С помощью модели Seidle (1992) и найденного значения C_f определены зависимости проницаемости тестируемого угля от сжатия σ вдоль трещин основного и торцевого кливажа. Показатель анизотропии — отношение расчетных значений проницаемости тестируемого угля вдоль трещин основного и торцевого кливажа составляет около 1.5. Экспериментальные и расчетные данные использованы для оценки фильтрационных свойств угольных пластов в условиях месторождений.

Изменение фильтрационных свойств с глубиной анализировалось по известным моделям Seidle [5] и Shi & Durucan [6], предполагающим зависимость проницаемости угля от среднего и горизонтального напряжений, соответственно, при одноосно деформированном состоянии угольных пластов. Считаем, что пласты не затронуты разработкой, поэтому эффектами усадки/набухания угольной матрицы, возникающих при отборе метана, можно пренебречь.

В расчетах приняты параметры: градиент литостатического давления 0.0231 МПа/м, гидростатический градиент порового давления пластовых флюидов 0.01 МПа/м, коэффициент Пуассона угля марки “Ж” $\nu = 0.3$. В этом случае горное давление, обусловленное весом вышележащих пород σ_v , равняется $\sigma_v = 0.0131d$, где d — глубина залегания пласта, м.

Используем оценки сжимаемости трещин $C_f = 0.0845 \text{ МПа}^{-1}$, проницаемости ненагруженного угля в направлении основной системы кливажа (74.6 мД), анизотропии фильтрационных свойств угля вдоль напластования ($k_f/k_b = 1.5$), полученные в лабораторных экспериментах при гидростатическом характере напряженного состояния угольных образцов.

В соответствии с моделью Seidle (2011) проницаемость угля определяется средним напряжением, поэтому при переходе от лабораторных тестов с гидростатическим характером напряженного состояния к одноосно деформированному угольному пласту, применяется выражение [5]

$$\frac{k_d}{k_0} = \exp \left[-C_f \cdot 0.0131(d - d_0) \frac{1+\nu}{1-\nu} \right], \quad (2)$$

где k_d — проницаемость угля по напластованию на глубине d , мД; k_0 — то же на реперной глубине d_0 .

В модели Shi & Durucan [6] предполагается, что проницаемость угля зависит от напряжения, действующего ортогонально трещинам, поэтому для перехода от результатов лабораторных тестов с гидростатическим характером напряженного состояния к одноосно деформированному угольному пласту, служит выражение:

$$\frac{k_d}{k_0} = \exp \left[-3C_f \cdot 0.0131(d - d_0) \frac{\nu}{1-\nu} \right]. \quad (3)$$

Отсутствие натуральных замеров проницаемости in-situ не позволяет определить, какая модель лучше подходит для тестируемого угля, поэтому оценка его фильтрационных свойств выполнена в обоих вариантах — в зависимости от среднего напряжения и от напряжения вдоль напластования (рис. 3).

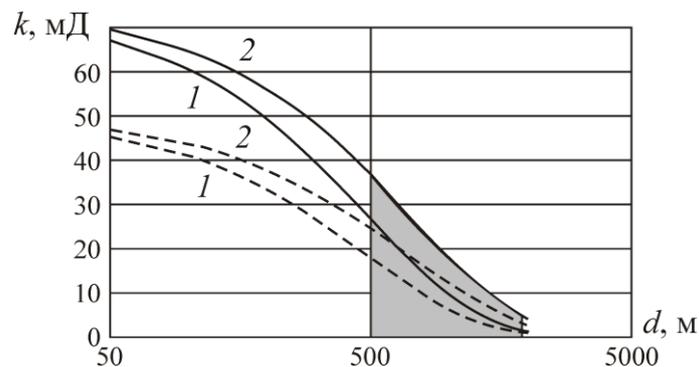


Рис. 3. Зависимость проницаемости пластов угля марки “Ж” от глубины залегания вдоль напластования по направлениям основной (сплошная линия) и торцевой (пунктирная линия) систем кливажа: 1 — модель зависимости проницаемости от среднего напряжения; 2 — модель зависимости проницаемости от напряжения вдоль напластования. Заштрихованная область — интервал глубин залегания пластов угля марки “Ж” в Ленинском районе Кузбасса

Модельная зависимость проницаемости угля марки “Ж” от напряжения, действующего вдоль напластования, дает более высокие значения искомой проницаемости, чем на основе зависимости от среднего напряжения. По мере накопления экспериментальных данных по проницаемости и напряженному состоянию пластов тестируемого угля в Кузбассе полученные зависимости могут быть уточнены и конкретизированы для отдельных угледобывающих шахт.

ВЫВОДЫ

Тестируемый уголь имеет блочное строение с двумя развитыми системами основного и торцевого кливажа. Раскрытие трещин основной системы составляет в среднем 12–13 мкм, торцевых — 8–9 мкм. Средние размеры микроблоков угля в направлении основного и торцевого кливажа равны 2213 и 925 мкм соответственно.

По данным фильтрационных тестов в гидростатическом режиме нагружения проницаемость угля в направлении основной системы трещиноватости снижается в 6.7 раза при увеличении сжатия с 1 до 8 МПа. Среднее значение сжимаемости тестируемого трещиноватого угля по данным экспериментов равняется 0.085 МПа^{-1} . Установлено, что в направлении основного кливажа уголь 1.5 раза более проницаем, чем в направлении торцевого кливажа. На основе экспериментальных и расчетных данных получены прогнозные зависимости изменения проницаемости угля с глубиной в условиях одноосного деформирования угольных пластов Ленинского района Кузбасса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Lin B., Song H., Zhao Y. Liu T., Kong J., Huang Z.** Significance of gas flow in anisotropic coal seams to underground gas drainage, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 180, pp. 808–819.
2. **Pan Z., and Connell L. D.** Modelling permeability for coal reservoirs: a review of analytical models and testing data, *International Journal of Coal Geology*, 2012, vol. 92, pp. 1–44.
3. **Tan Y., Pan Z., Liu J., Zhou F., Connell L. D., Sun W., and Haque A.** Experimental study of impact of anisotropy and heterogeneity on gas flow in coal. Part II: Permeability, *Fuel*, 2018, vol. 230, pp. 397–409.
4. **Guo P., Cheng Y., Jin K., and Li W.** Impact of effective stress and matrix deformation on the coal fracture permeability, *Transport in porous media*, 2014, vol. 103, no. 1, pp. 99–115.
5. **Seidle J.** *Fundamentals of coalbed methane reservoir engineering*, PennWell Books, 2011.
6. **Shi J. Q. and Durucan S.** A model for changes in coalbed permeability during primary and enhanced methane recovery, *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2005, vol. 8, no. 04, pp. 291–299.
7. **Serdyukov S. V., Shilova T. V., and Drobchik A. N.** Laboratory installation and procedure to determine gas permeability of rocks, *Journal of mining science*, 2017, vol. 53, no. 5, pp. 954–961.
8. **Pan Z., Connell L. D., and Camilleri M.** Laboratory characterisation of coal reservoir permeability for primary and enhanced coalbed methane recovery, *International Journal of Coal Geology*, 2010, vol. 82, no. 3-4, pp. 252–261.
9. **McKee C. R. and Bumb A. C.** Stress-dependent permeability and porosity of coal and other geologic formations, *SPE formation evaluation*, 1988, vol. 3, no. 01, pp. 81-91.
10. **Seidle J. P., Jeansonne M. W., and Erickson, D. J.** Application of matchstick geometry to stress dependent permeability in coals, *SPE rocky mountain regional meeting*, Society of Petroleum Engineers, 1992.
11. **Robertson E. P. and Christiansen R. L.** A permeability model for coal and other fractured, sorptive-elastic media, *Idaho National Laboratory (INL)*, 2006, no. INL/CON-06-11830.
12. **Somerton W. H., Söylemezoğlu I. M., and Dudley R. C.** Effect of stress on permeability of coal, *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, Pergamon, 1975, vol. 12, no. 5-6, pp. 129–145.
13. **Parsons R. W.** Permeability of idealized fractured rock, *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1966, vol. 6, no. 02, pp. 126–136.