

## РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.257.122 + 624.138.41

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ УГОЛЬНЫХ КЕРНОВ С МОНОСЛОЕМ ПРОППАНТА В ДРЕНАЖНОЙ ТРЕЩИНЕ

**Т. В. Шилова, С. В. Сердюков, Л. А. Рыбалкин**

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

Представлены результаты исследований проницаемости угольных кернов со сквозной дренажной трещиной, расклиненной монослоем проппанта и без него. Описана методика экспериментов. Приведены параметры трещиновато-блочной структуры тестируемого длиннопламенного угля. Показана перспективность расклинивания дренажных трещин разреженным монослоем проппантов для увеличения проницаемости глубокозалегающих угольных пластов.

*Уголь, керн, кливаж, трещиновато-блочная структура, фильтрационный тест, проницаемость, горное давление, дренажная трещина, сжимаемость трещин, проппант, разреженный монослой*

DOI: 10.15372/FTPRPI20230607

---

Перспективы увеличения добычи угля связаны с разработкой глубокозалегающих пластов. Их высокая газонасыщенность усложняет ведение горных работ, повышает риски катастрофических газодинамических явлений. Для снижения опасности породы дегазируют, а извлекаемый метан сжигают или используют в качестве химического сырья.

Способность угля к газоотдаче определяется его проницаемостью, а эффективность дегазации — фильтрационным сопротивлением дренажной системы [1–5]. Благоприятными для извлечения метана являются участки с проницаемостью выше 5 мД [6]. При размещении дегазационных скважин учитывают анизотропию проницаемости. Ее оценивают по результатам исследований микроструктуры угля, фильтрационным тестам [7–10]. Для снижения плотности бурения скважин в низкопроницаемых зонах применяют стимулирование притока газа. Наиболее эффективный способ — гидроразрыв. Размеры формируемых разрывов не превышают первых десятков метров. Долгосрочное увеличение дебита газа может быть достигнуто при условии расклинивания трещин проппантами. Так, в работе [11], посвященной фильтрации диоксида углерода через образцы антрацита и битуминозного угля,

содержащие искусственную трещину, показано, что при всестороннем сжатии 10 МПа и давлении газа 1–6 МПа расклинивание трещины кварцевым песком фракции 70–140 меш увеличивает дебит газа в 5–10 раз. Похожие результаты получены в [12–14]. Предложена модель эволюции проводимости расклиненных трещин в пластовых условиях, учитывающая вдавливание проппанта в уголь.

Частицы проппанта могут располагаться в трещине как в один слой (монослой), так и в несколько слоев друг над другом (пачка). Монослой может быть сплошным (рис. 1а) и с пустотами, т. е. частичным или разреженным (рис. 1б). В [15] показано, что проводимость разреженного монослоя сверхлегкого проппанта крупностью ~ 1 мм может превосходить проводимость пачки из пяти слоев песка фракции 20/40 меш (рис. 1в). Такие ресурсосберегающие упаковки проппантов представляют интерес для использования в шахтном гидроразрыве.

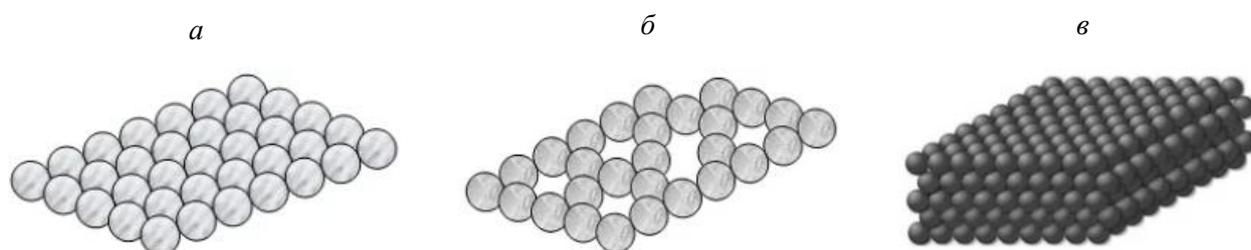


Рис. 1. Виды упаковок проппанта в дренажных трещинах: а — сплошной монослой; б — разреженный; в — пачка из пяти слоев

В [11, 16] изучалось влияние расклинивания естественных трещин в угле. Экспериментально получено трехкратное повышение проницаемости. Согласно результатам математического моделирования, предлагаемый подход может увеличивать производительность дегазационных скважин в 6 раз. Сжатие трещины, заполненной монослоем проппанта, ведет к переориентации и дроблению частиц и, как следствие, снижению проводимости дренажного канала [17]. Анализ механизмов разрушения проппантов в угольных пластах приведен в [18, 19].

Основной фактор, ответственный за изменение фильтрационных свойств пластов в процессе разработки, — сжимаемость трещин и связанная с нею зависимость проницаемости угля от горного давления [20–23]. В большинстве теоретических моделей считается, что открытая пористость и сжимаемость угля определяются кливажем, а породная матрица с закрытыми порами практически не деформируется. Корректность принятого допущения подтверждена многочисленными лабораторными исследованиями [24–26].

В [21] установлено, что в равномерно напряженном угле сжимаемость сомкнутых разрывов и естественных трещин на один–два порядка больше, чем при одно- или многослойном заполнении проппантом. Поэтому при дренировании и дегазации угольных пластов эффект расклинивания трещин усиливается с увеличением глубины разработки.

В настоящей статье рассмотрены результаты экспериментов по применению проппантов для повышения проницаемости угольных образцов, содержащих искусственную трещину. Опробованы монослойные сплошные и разреженные упаковки с разной плотностью распределения расклинивающих частиц по поверхности трещины.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты проводились на образцах длиннопламенного угля крупнопламенной фракции с выраженной слоистостью. Особенности его трещиновато-блочного строения исследовались методом оптической микроскопии аншлифов в отраженном свете. Измерялось раскрытие

трещин, размеры блоков и минеральных включений. Использовались анализатор фрагментов микроструктуры твердых тел “Минерал С7”, оптический микроскоп OLYMPUS BX51, видеокамера SIMAGIS 2P-3C и специализированное программное обеспечение. Согласно исследованиям, в направлении, перпендикулярном напластованию, уголь разбит на микроблоки трещинами основного и торцевого эндогенного кливажа, а также второстепенными нарушениями различной ориентации (рис. 2а). Среднее раскрытие трещин составляет 11,6 мкм при среднем размере микроблоков угля вдоль них 1174,5 мкм. В направлении вдоль напластования густота трещин существенно больше (рис. 2б), чем в зонах с развитой минерализацией протяженностью 1500–2000 мкм (рис. 2в).

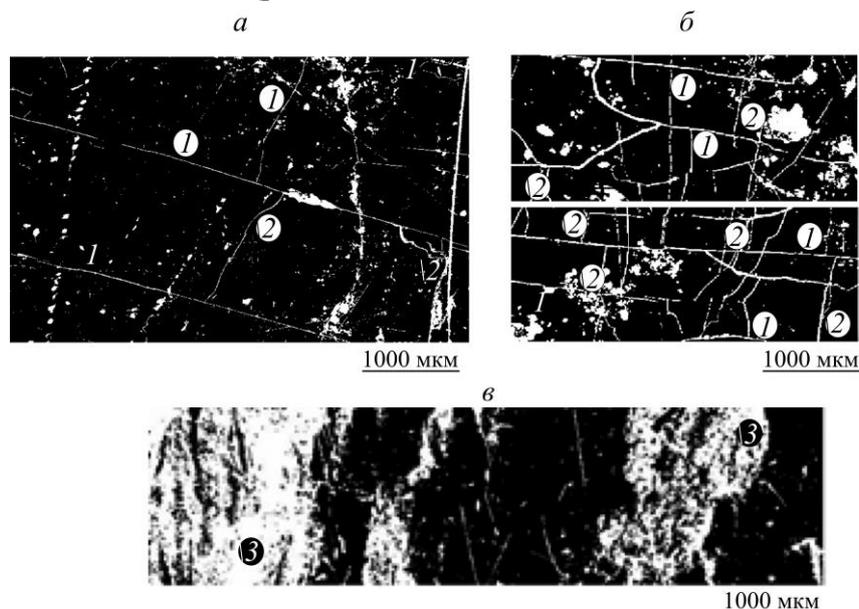


Рис. 2. Трещиноватость угля в шлифах: *а* — плоскость, параллельная напластованию; *б* — плоскость, секущая напластование под прямым углом; *в* — участок минерализации: 1, 2 — трещины основного и торцевого кливажа, 3 — минеральные включения

Фильтрационные тесты проводились на цилиндрических кернах длиной  $L = 30 - 60$  мм и диаметром 30 и 35 мм. Образцы выбуривались в двух взаимно перпендикулярных направлениях: вдоль и поперек напластования угля (рис. 3).

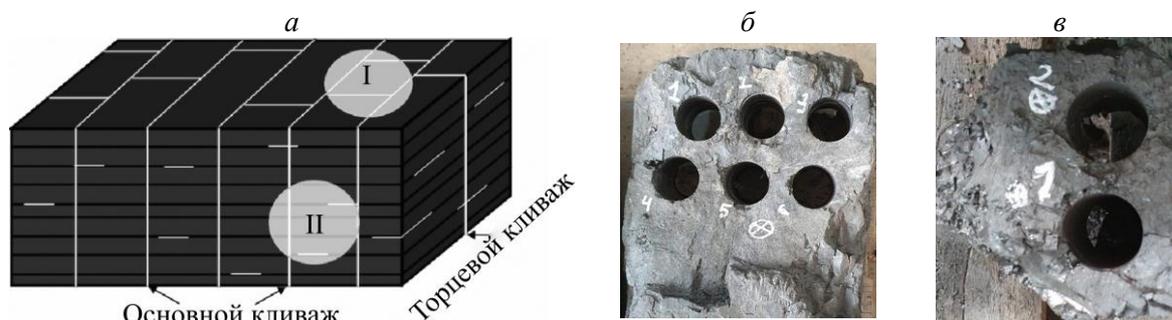


Рис. 3. Схема выбуривания кернов (*а*) поперек (I) и вдоль напластования (II) угля и его внешний вид после выбуривания кернов I (*б*) и II типа (*в*)

Искусственная трещина создавалась путем сжатия цилиндрического образца по образующей между параллельными стальными пластинами. Чтобы предотвратить распад на фрагменты, керн помещался в упругую оболочку. Расклинивание выполнялось следующим образом: трещина при-

нудительно раскрывалась на 2 мм строго по нормали к оси образца и в нее засыпался небольшими порциями отмеренный объем керамического проппанта, встряхиваемый для более равномерного распределения частиц по трещине. Использовалась фракция с размерами частиц ~ 1 мм. После заполнения проппантом трещина закрывалась. Проппант отмеряли в объемах, обеспечивающих сплошное однослойное покрытие участка плоской поверхности, равного по площади осевому сечению угольного образца, его половине или четверти. Соответственно выбранному объему получали трещины с расклинивающим монослоем, заполненным частицами на 100% (сплошной слой) или на 25.5% (разреженный). Фильтрационные тесты проводились как на ненарушенных образцах, так и со сквозной дренажной трещиной, расклиненной проппантом или без него (рис. 4).

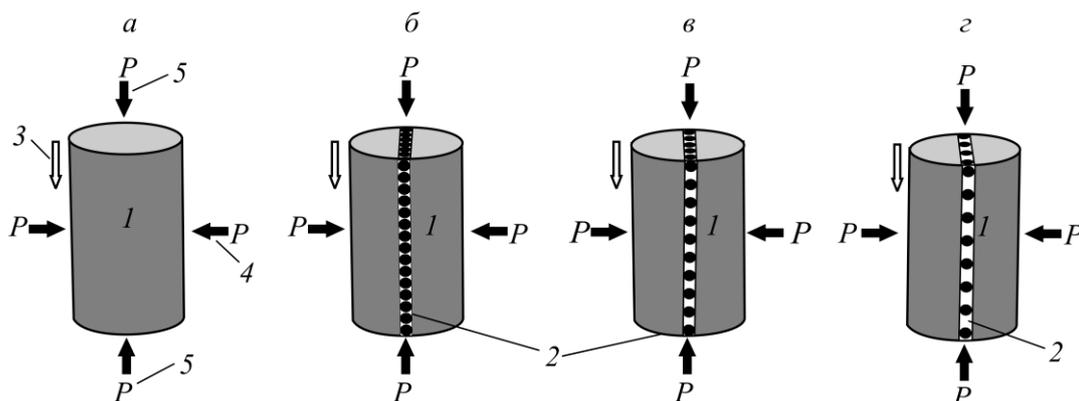


Рис. 4. Схема проведения фильтрационных тестов угольного керна без трещины (а), с продольной дренажной трещиной и монослоем проппанта, заполненным частицами на 100 (б), 50 (в), 25% (г): 1 — угольный керн; 2 — дренажная трещина; 3 — направление фильтрации азота; 4, 5 — боковое и осевое сжатие образца внешним давлением

Использовалась лабораторная установка для исследования фильтрации в цилиндрических образцах горных пород при линейном стационарном характере течения в условиях осевого и бокового нагружений [27]. Рабочий агент — азот. Эксперименты выполнялись по методике ГОСТ 26450.2-85 при равномерном нагружении образцов от 1 до 5 МПа (с шагом 1 МПа) [28]. Перепад давления  $\Delta P$  флюида на торцах угольного образца, содержащего расклиненную трещину, составлял 0.01–0.04 МПа, без нее — 0.2–0.7 МПа. Результаты замеров объема  $V$  газа, отнесенного к атмосферному давлению  $P_{at}$  на выходе потока, и времени  $t$  фильтрации этого объема через образец обрабатывались по формуле [28]:

$$k = \frac{2 \cdot 10^4 V \mu L P_{at}}{St \Delta P (\Delta P + 2P_{at})}, \quad (1)$$

где  $k$  — расчетный коэффициент проницаемости, мД;  $\mu_a$  — вязкость азота, мПа·с;  $S$  — площадь сечения образца, см<sup>2</sup> (давление берется в атмосферах).

Сжимаемость искусственной и естественных трещин рассчитывалась по формуле [24]:

$$C_f = \frac{1}{3(\sigma - \sigma_0)} \ln \frac{k}{k_0}, \quad (2)$$

здесь индекс “0” соответствует показателям при гидростатическом нагружении образца  $\sigma_0 = 1$  МПа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам фильтрационных тестов определялись коэффициенты проницаемости угля вдоль и поперек напластования в отсутствии дренажной трещины (рис. 5).

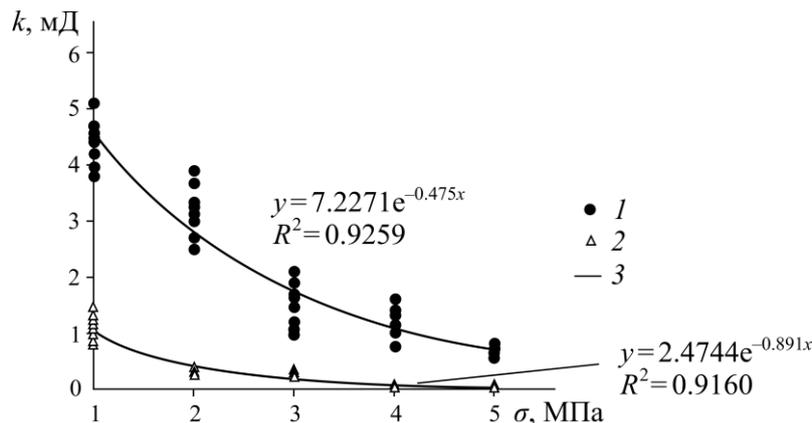


Рис. 5. Зависимость коэффициента проницаемости угля  $k$  от всестороннего сжатия  $\sigma$ : 1 — вдоль напластования; 2 — поперек напластования; 3 — экспоненциальные аппроксимации;  $R^2$  — мера достоверности аппроксимации

Средние значения проницаемости угля по совокупности испытанных образцов составили при фильтрации азота поперек напластования от 0.07 мД при  $\sigma=5$  МПа до 1.5 мД при  $\sigma=1$  МПа; вдоль напластования — соответственно 0.7 и 4.4 мД. Имеет место существенная анизотропия проницаемости тестируемого угля, возрастающая с уменьшением горного давления. При максимальном нагружении в экспериментах (5 МПа) проницаемость угля вдоль и поперек слоистости различалась на порядок. Полученные значения характерны для низкопроницаемых углей [29].

Для экспериментов с дренажными трещинами отбирались наименее проницаемые керны, выбуренные поперек напластования угля (рис. 3б). Результаты фильтрационных тестов приведены на рис. 6.

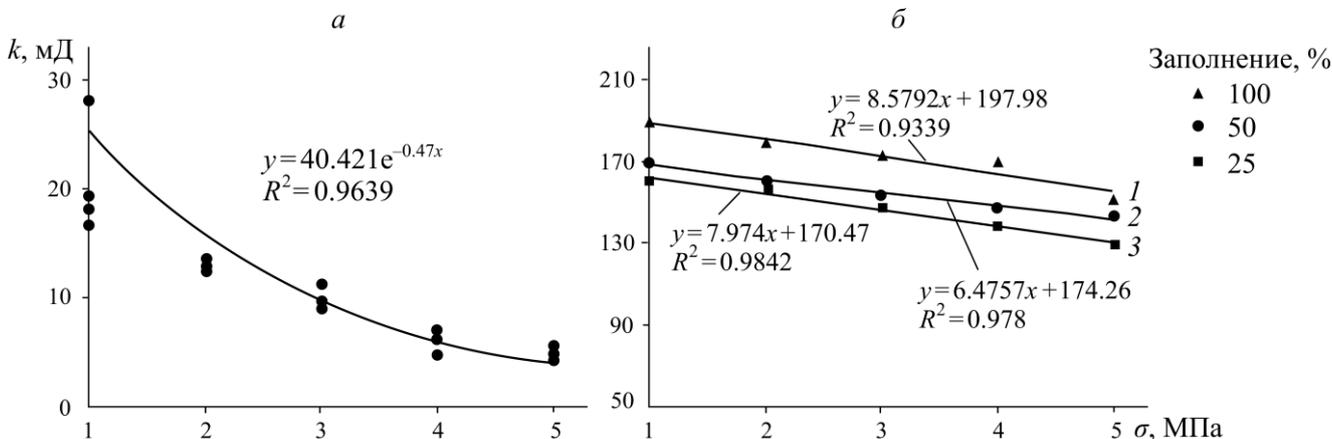


Рис. 6. Зависимость средней проницаемости угольных кернов, содержащих продольную дренажную трещину, от сжатия: а — без расклинивания проппантом; б — с расклиниванием сплошным (100 % заполнение) и разреженным (25 и 50 % заполнение) монослоем керамического проппанта при перепаде давления  $\Delta P = 0.02$  МПа

Показано, что проницаемость керна с дренажной трещиной, не расклиненной проппантом (рис. 6а), хоть и выше в 5–7 раз, чем угля естественной трещиноватости (рис. 5), но падает с ростом горного давления так же, как в случае кливажа — по экспоненциальному закону. При  $\sigma=5$  МПа значение  $k$  снижается до ~5 мД, с прогнозируемым падением до 0.5–1.0 мД при  $\sigma=10$  МПа. Это свидетельствует о неэффективности шахтного гидроразрыва без проппантов в глубокозалегающих пластах.

Расклинивание дренажной трещины керамическими частицами крупностью  $\sim 1$  мм ведет к многократному (на один – два порядка) увеличению проницаемости тестируемых образцов. Полученные зависимости  $k$  от горного давления близки к линейным (рис. 6б). В результате относительная эффективность применения проппантов для предотвращения смыкания трещин повышается с глубиной залегания пластов и ростом сжимающих напряжений. Это обусловлено меньшей сжимаемостью  $C_f$  расклиненных трещин, чем искусственных и естественных без проппантов.

На рис. 7 показана связь проницаемости угольных кернов при  $\sigma = 5$  МПа и сжимаемости расположенной в них дренажной трещины со сплошным или разреженным монослоем проппанта. Установлено, что расклинивание трещины сплошным или разреженным монослоем уменьшает ее сжимаемость на порядок. Средние коэффициенты сжимаемости составили  $0.02 \text{ МПа}^{-1}$  для расклиненных дренажных трещин и  $0.33 \text{ МПа}^{-1}$  для искусственной и естественных трещин без проппантов. Наилучшие результаты получены со сплошным монослоем проппанта в трещине: средняя по испытаниям проницаемость угольных кернов составила 189 мД при  $\sigma = 1$  МПа, снижаясь до 151 мД при  $\sigma = 5$  МПа, с прогнозируемым падением до 112 мД при  $\sigma = 10$  МПа, что на два порядка выше, чем для трещин без расклинивания (рис. 6б).

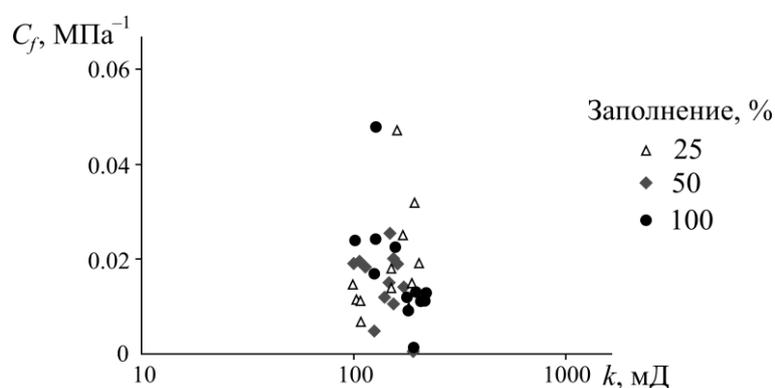


Рис. 7. Связь проницаемости угольного керна и сжимаемости дренажной трещины, расклиненной монослоем керамических частиц крупностью  $\sim 1$  мм, при гидростатическом сжатии 5 МПа

Разрежение монослоя в 2–4 раза значительно экономит расход проппанта, не сильно ухудшая проницаемость образцов. Проницаемость при 25 % заполнении монослоя близка и даже немного выше, чем при 50 % заполнении. Например, при  $\sigma = 5$  МПа и  $\Delta P = 0.015$  МПа экспериментально установленные проницаемости для 25 и 50 % заполнений равны соответственно 181.0 и 147.8 мД; при  $\Delta P = 0.02$  МПа — 150.8 и 140.1 мД; при  $\Delta P = 0.035$  МПа — 98.9 и 101.1 мД. Несмотря на разброс данных, вывод очевиден: применение разреженного монослоя проппантов крупностью  $\sim 1$  мм вполне приемлемо на практике.

Достигнутые результаты показывают целесообразность исследования разреженных монослойных упаковок плотностью менее 25 %. Для их создания наиболее подходят сверхлегкие проппанты нейтральной плавучести, например алюмосиликатные полые микросферы, извлекаемые из золы сжигания углей на электростанциях [15, 30]. Такие проппанты экологичны, относительно дешевы, хорошо переносятся водой. Поскольку размеры частиц основной фракции распространенной марки микросфер АСПМ-500 составляют 10–50 мкм, необходимо экспериментально доказать возможность их использования для повышения эффективности различных технологий пневмо- и гидродинамического стимулирования газоотдачи угольных пластов.

## ВЫВОДЫ

Проницаемость угольного керна с искусственной дренажной трещиной без проппанта выше в 5–7 раз, чем угля естественной трещиноватости, но с ростом горного давления падает по экспоненциальному закону. Это приводит к неэффективности шахтного гидроразрыва без заполнения трещин проппантами в глубокозалегающих пластах.

Раскрытие дренажной трещины керамическим проппантом крупностью 1 мм ведет к повышению проницаемости тестируемых образцов на один–два порядка. Экспериментальные зависимости проницаемости от горного давления близки к линейным. Эффективность предотвращения смыкания трещин проппантами повышается с глубиной залегания пластов и ростом сжимающих напряжений.

Двух- и четырехкратное разрежение монослоя расклинивающих частиц существенно экономит расход проппанта при сохранении удовлетворительной проницаемости угля. Показана целесообразность использования разреженных монослойных упаковок сверхлегких проппантов для повышения эффективности пневмо- и гидродинамических методов стимулирования газоотдачи угольных пластов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lin B., Song H., Zhao Y., Liu T., Kong J., and Huang Z.** Significance of gas flow in anisotropic coal seams to underground gas drainage, *J. Pet. Sci. Eng.*, 2019, Vol. 180. — P. 808–819.
2. **Pan Z. and Connell L. D.** Modelling permeability for coal reservoirs: a review of analytical models and testing data, *Int. J. Coal Geology*, 2012, Vol. 92. — P. 1–44.
3. **Guo P., Cheng Y., Jin K., Li W., Tu Q., and Liu H.** Impact of effective stress and matrix deformation on the coal fracture permeability, *Transport in Porous Media*, 2014, Vol. 103, No. 1. — P. 99–115.
4. **Alekseev A. D., Vasilenko T. A., Gumennik K. V., Kalugina N. A., and Feldman E. P.** Diffusion-filtration model of methane release from coal seam, *J. Technical Physics*, 2007, Vol. 77, No. 4. — P. 65–74.
5. **Сердюков С. В., Курленя М. В., Рыбалкин Л. А., Шилова Т. В.** Влияние гидроразрыва угля на фильтрационное сопротивление зоны дренирования дегазационной скважины // ФТПРПИ. — 2019. — № 2. — С. 3–13.
6. **Трофимова Г. И., Черемисина В. Г.** Организация в Кузбассе промышленной добычи метана из угольных пластов как современная целесообразная задача // Символ науки. — 2015. — № 9-2. — С. 23–36.
7. **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. — P. 397–409.
8. **Pan Z. and Connell L. D.** Modelling of anisotropic coal swelling and its impact on permeability behavior for primary and enhanced coalbed methane recovery, *Int. J. Coal Geology*, 2011, Vol. 85, No. 3–4. — P. 257–267.
9. **Wang J. G., Liu J., and Kabir A.** Combined effects of directional compaction. non-Darcy flow and anisotropic swelling on coal seam gas extraction, *Int. J. Coal Geology*, 2013, Vol. 109. — P. 1–14.
10. **Wang D., Lv R., Wei J., Zhang P., Yu C., and Yao B.** An experimental study of the anisotropic permeability rule of coal containing gas, *J. Natural Gas Sci. Eng.*, 2018, Vol. 53. — P. 67–73.
11. **Kumar H., Elsworth D., Mathews J. P., and Marone C.** Permeability evolution in sorbing media: analogies between organic-rich shale and coal, *Geofluids*, 2016, Vol. 16, No. 1. — P. 43–55.
12. **Zhi S. and Elsworth D.** Proppant embedment in coal and shale: Impacts of stress hardening and sorption, *Int. J. Coal Geology*, 2020, Vol. 227. — 103545.
13. **Li H., Huang B., Cheng Q., Zhao X., Chen B., and Zhao L.** Mechanism of single proppant pressure embedded in coal seam fracture, *Energy and Fuels*, 2021, Vol. 35, No. 9. — P. 7756–7767.

14. **Ramandi H. L., Pizada M. A., Saydam S., Arns C., and Roshan H.** Digital and experimental rock analysis of proppant injection into naturally fractured coal, *Fuel*, 2021, Vol. 286. — 119368.
15. **Паков С.** Пропанты нового поколения для ГПП. <https://neftegaz.ru/science/drilling/331742-propany-novogo-pokoleniya-dlya-grp>.
16. **Kumar H., Elsworth D., Liu J., Pone D., and Mathews J. P.** Permeability evolution of propped artificial fractures in coal on injection of CO<sub>2</sub>, *J. Pet. Sci. Eng.*, 2015, Vol. 133. — P. 695–704.
17. **Wu Y. et al.** Experimental study of permeability behavior for proppant supported coal fracture, *J. Natural Gas Sci. Eng.*, 2018, Vol. 51. — P. 18–26.
18. **Ahamed M. A. A., Perera M. S. A., Dong-yin L., Ranjith P. G., and Matthai S. K.** Proppant damage mechanisms in coal seam reservoirs during the hydraulic fracturing process: a review, *Fuel*, 2019, Vol. 253. — P. 615–629.
19. **Ahamed M. A. A., Perera M. S. A., Black J. R., Matthai S. K., Ranjith P. G., Dong-yin L., and Sampath K. H. S. M.** Investigating the proppant damage mechanisms expected in a propped coal fracture and its effect on fracture flow, *J. Pet. Sci. Eng.*, 2021, Vol. 198. — 108170.
20. **Tan Y., Pan Z., Liu J., Wu Y., Haque A., and Connell L. D.** Experimental study of permeability and its anisotropy for shale fracture supported with proppant, *J. Natural Gas Sci. Eng.*, 2017, Vol. 44. — P. 250–264.
21. **Tan Y., Pan Z., Feng X. T., Zhang D., Connell L. D., and Li S.** Laboratory characterization of fracture compressibility for coal and shale gas reservoir rocks: A review, *Int. J. Coal Geology*, 2019, Vol. 204. — P. 1–17.
22. **He J., Ling K., Pei P., and Ni X.** Calculation of rock compressibility by using the characteristics of downstream pressure change in permeability experiment, *J. Pet. Sci. Eng.*, 2016, Vol. 143. — P. 121–127.
23. **Yuan J., Jiang R., and Zhang W.** The workflow to analyze hydraulic fracture effect on hydraulic fractured horizontal well production in composite formation system, *Advances in Geo-Energy Research*, 2018, Vol. 2, No. 3. — P. 319–342.
24. **Pan Z., Connell L. D., and Camilleri M.** Laboratory characterization of coal reservoir permeability for primary and enhanced coalbed methane recovery, *Int. J. Coal Geology*, 2010, Vol. 82, No. 3–4. — P. 252–261.
25. **Guo P., Cheng Y., Jin K., Li W., Tu Q., and Liu H.** Impact of effective stress and matrix deformation on the coal fracture permeability, *Transport in porous media*, 2014, Vol. 103, No. 1. — P. 99–115.
26. **Shilova T. and Serdyukov S.** Permeability of coking coals and patterns of its change in Leninsky area, Kuznetsk coal basin, Russia, *Appl. Sci.*, 2021, Vol. 11, No. 9. — 3969.
27. **Сердюков С. В., Шилова Т. В., Дробчик А. Н.** Лабораторная установка и методика определения газопрооницаемости горных пород // ФТПРПИ. — 2017. — № 5. — С. 172–180.
28. **ГОСТ 26450.2-85.** Порода горные. Метод определения коэффициента абсолютной газопрооницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 17 с.
29. **Шилова Т. В., Рыбалкин Л. А., Яблоков А. В.** Прогнозирование проницаемости трещиноватых углей в условиях естественного залегания // ФТПРПИ. — 2020. — № 2. — С. 75–85.
30. **Исмагилов З. Р., Шикина Н. В., Журавлева Н. В., Потоккина Р. Р., Рудина Н. А., Ушаков В. А., Теряева Т. Н.** Исследование алюмосиликатных микросфер из золы-уноса электростанций, использующих угли Кузбасса // *Химия твердого топлива*. — 2015. — № 4. — С. 49–57.

*Поступила в редакцию 12/IX 2023  
После доработки 21/X 2023  
Принята к публикации 16/XI 2023*