



**КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ФИЛЬТРАЦИИ ФЛЮИДА
В ТРЕЩИНОВАТОМ УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ**

С. В. Клишин

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: sv.klishin@gmail.com,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Представлены результаты численного исследования коллекторских свойств угольных образцов, содержащих системы трещин. В качестве источника систем трещин использованы шлифы углей. С помощью метода конечных элементов численно решена задача о фильтрации флюида в трещиноватых углях. Продемонстрировано влияние геометрии систем трещин на фильтрационные свойства геосреды.

Фильтрация, закон Дарси, проницаемость, шиф, уголь, система трещин, метод конечных элементов

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF FLUID FILTRATION IN A FRACTURED COAL BED

S. V. Klishin

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: sv.klishin@gmail.com, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The results of a numerical study of reservoir properties of coal samples containing fracture systems are presented. Coal thin polished specimens are used as a source of crack systems. The problem of fluid filtration in cracked coals is numerically solved by the finite element method. The influence of fracture system geometry on the filtration properties of geomedium is demonstrated.

Filtration, Darcy's law, permeability, polished specimen, coal, fracture system, finite element method

Различные дефекты строения горных пород (в том числе угольных пластов) включают в себя трещиноватость как один из важнейших факторов, определяющих как деформационные, так и фильтрационные свойства материала в целом. Сведения о трещиноватости являются необходимыми при ведении горных работ, разработке методов газоотдачи угольных пластов, проектировании целиков и выработок и т. д. Изучение трещин помогает восстанавливать геологическую историю горного массива, смену напряжений и деформаций в нем, а также прогнозировать его реакцию на внешние воздействия. В настоящее время разработаны модели трещиноватости, отражающие различные особенности в строении массив горной среды, которые могут быть основой для исследования результатов реальных физических явлений [1, 2].

При этом наибольшая часть теоретических исследований по изучению коллекторских свойств поровых сред проводится в рамках концепции сплошной среды. Вместе с предположением о сплошности среды вводится также предположение о гладкости закона движения (фильтрации) жидкостей и газов в пористой среде (закон Дарси). Данные предположения неразрывно связаны друг с другом и позволяют использовать аппарат численного анализа с применением метода конечных элементов.

В работе [3] предложен способ численного исследования коллекторских свойств горных пород, содержащих системы трещин. Для создания плоских стохастических систем трещин с заданным распределением координат их центров, длин и ориентаций был разработан алгоритм и компьютерная программа. На основе метода конечных элементов численно решена задача о фильтрации флюида в массиве, содержащем сгенерированные системы трещин. В результате расчетов было показано значительное повышение фильтрационных свойств образцов.

Настоящее исследование продолжает данное направление и посвящено изучению систем трещин, полученных в лабораторных условиях при изучении шлифов горных пород. На рис. 1 представлены фрагменты систем трещин, содержащихся в шлифах углей из коллекции Института угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН (г. Кемерово) [4].



Рис. 1. Фрагменты систем трещин в шлифах углей

Постановка задачи. Процесс прохождения флюида сквозь образец горной породы рассмотрен в двумерной постановке. Пусть в плоскости Oxy определена область $0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1$, в которой в дополнение к ее пористости содержится система трещин (рис. 2). Задача фильтрации состоит в определении скалярного поля $P = P(x, y)$ и векторного поля $\mathbf{u} = (u_x(x, y), u_y(x, y))$ в заданной области, где P — давление флюида, а \mathbf{u} — его скорость под действием разницы давлений на границе. Граничные условия следующие: на левой и правой сторонах образца задан перепад давления

$$P_{int} = 10 \text{ кПа} \quad \text{при } x = 0 \text{ (входное отверстие)}, \quad (1)$$

$$P_{out} = 0 \quad \text{при } x = 1 \text{ (выходное отверстие)}. \quad (2)$$

На верхней и нижней границах задано условие непротекания

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \text{при } y = 0 \text{ и } y = 1, \quad (3)$$

где \mathbf{n} — единичный вектор нормали к соответствующей границе.

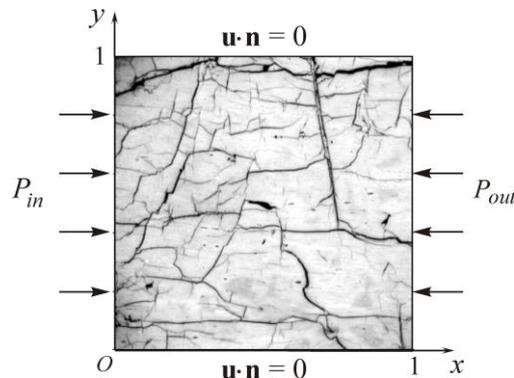


Рис. 2. Постановка задачи фильтрации в трещиноватой поровой среде

В соответствии с законом Дарси, скорость фильтрации флюида направлена в сторону уменьшения давления и прямо пропорциональна градиенту давления в жидкости:

$$\mathbf{u}(x, y) = -\frac{K}{\mu} \nabla P(x, y), \quad (4)$$

где K — коэффициент проницаемости среды; μ — динамическая вязкость флюида; сила тяжести отсутствует. Согласно экспериментальным исследованиям, посвященным определению коллекторских свойств горных пород [5, 6], примем следующие значения параметров в уравнении (4).

Уравнение (4) совместно с уравнением неразрывности

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0 \quad (5)$$

образуют замкнутую систему дифференциальных уравнений в частных производных, содержащую две неизвестные функции $P(x, y)$ и $\mathbf{u}(x, y)$.

При заданных граничных условиях (1)–(3) и в случае, когда трещины в образце отсутствуют, решение системы (4), (5) находится в виде

$$P(x, y) = -10^4 (x - 1) \text{ Па},$$

$$u_x(x, y) = 0.0112 \text{ м/с},$$

$$u_y(x, y) \equiv 0$$

во всей области.

Для изучения влияния трещиноватости на коллекторские свойства среды фрагменты изображения шлифов углей (рис. 1) обработаны в графическом редакторе GNU Image Manipulation Program (GIMP). Результатом обработки является файл — точечный рисунок, в котором система трещин представлена в градациях серого цвета, причем более светлым и белым участкам соответствует горная порода — уголь, а более темным и черным — имеющиеся системы трещин. Примеры систем трещин, подготовленные для дальнейших численных расчетов, представлены на рис. 3.

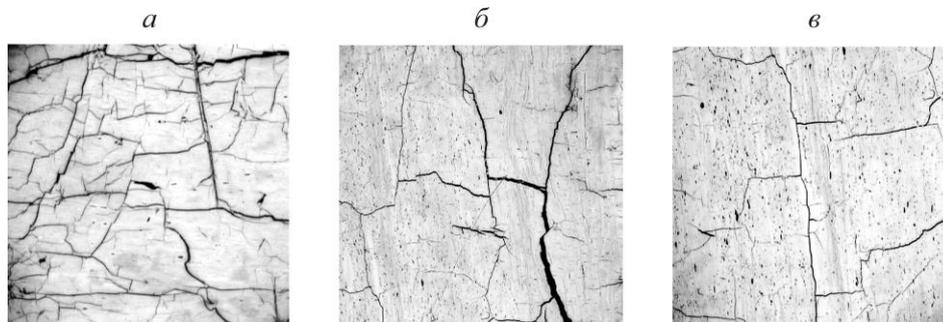


Рис. 3. Системы трещин в угольных шлифах, используемые в расчетах

Для исследования влияния систем трещин на фильтрационные свойства образцов пористой среды примем, что значения коэффициента фильтрации в уравнении (4) меняются в зависимости от принадлежности точек области трещинам (темные зоны на рис. 3) или поровой среде (светлые зоны на рис. 3). В первом случае примем значение коэффициента фильтрации $K = K^* = 10^{-6} \text{ м}^2$ (т. е. на три порядка выше, чем значение коэффициента фильтрации через поровую среду). Таким образом получен материал, имеющий различные значения коэффициента фильтрации, которые зависят от принадлежности точек области трещине или породе (углю).

При таких условиях решение (4) и (5) с учетом краевых условий (1–3) ищется численно с помощью метода конечных элементов. Для поиска решений систем дифференциальных уравнений с учетом разномодульной среды на основе метода конечных элементов существует ряд программных комплексов с открытым исходным кодом (FreeFEM++, OpenFOAM и др.) [7, 8]. Подобные расчеты реализованы также в коммерческом программном продукте COMSOL Multiphysics® [9, 10].

Результаты численных экспериментов. На рис. 4 показаны распределения давления (слева) и модуля вектора скорости $|\mathbf{u}|$ жидкости (справа) при наличии в образцах систем трещин, приведенных на рис. 3а, б, а также эпюры $u_x(x, y)$ — горизонтальных компонент векторов скорости на выпускном отверстии (при $x = 1$). Здесь хорошо видно влияние трещиноватости на возрастание скорости движения жидкости на выпуске. Можно сделать вывод, что распределение давления и скорости течения флюида в трещиноватой поровой среде напрямую связаны с особенностями геометрии систем трещин.

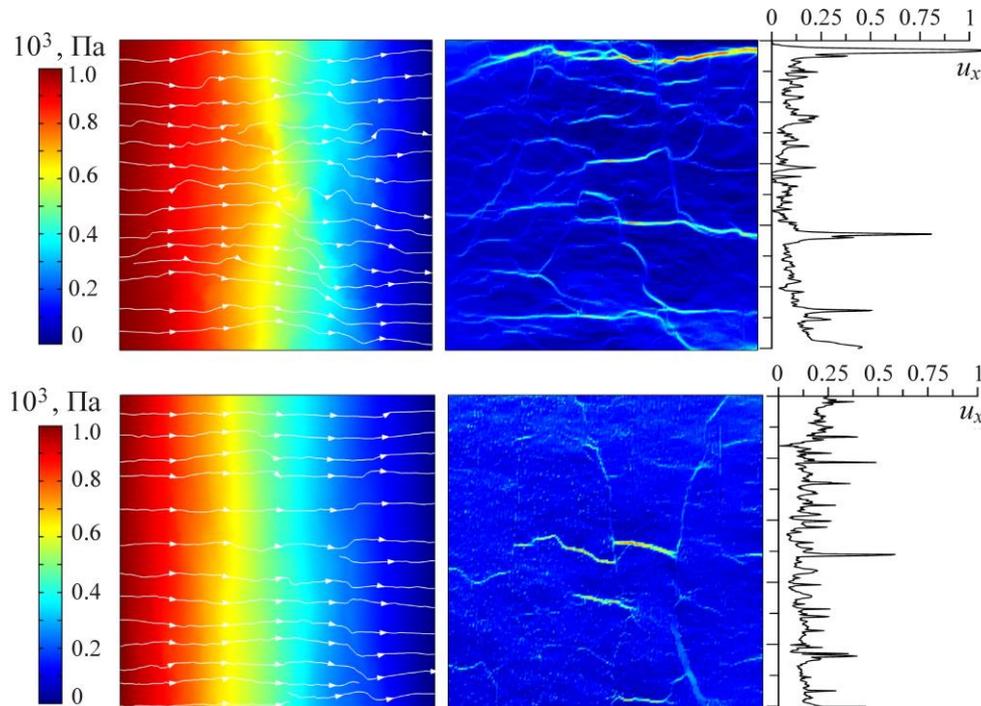


Рис. 4. Давления $P(x, y)$ в жидкости (слева) и абсолютные величины вектора скорости $|\mathbf{u}|$ (справа) для поровых сред, содержащих различные системы трещин (рисунок в цвете доступен в онлайн версии статьи)

Таким образом, предложенный способ оценки коллекторских свойств трещиноватых горных пород позволяет исследовать течение флюида в сплошной среде с учетом геометрии существующих систем трещин. Это создает большой потенциал не только для изучения и предотвращения газовой опасности угольных пластов, но и развитие методов исследования их коллекторских свойств.

ВЫВОДЫ

Предлагаемый способ конечно-элементного анализа обеспечивает эффективное исследование коллекторских свойств углей. Для численного определения фильтрационных свойств геосреды системы трещин представлены в виде фрагментов реальных изображений угольных шлифов.

Численные эксперименты на основе метода конечных элементов показали, что наличие трещиноватости в поровом коллекторе значительно повышает его фильтрационные свойства, при этом как распределение давления во флюиде, так и его скорости напрямую связаны с особенностями геометрии систем трещин (интенсивностью, ориентацией и сообщаемостью трещин). Подобные исследования могут описывать поток флюида в трещиноватом угольном пласте на всех стадиях его отработки, включая временные и пространственные изменения скорости и давления, а также различия в скорости и давлении флюида между трещинами и угольной матрицей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Revuzhenko A. Ph. and Klishin S. V.** On formation of polygonal crack system in the plane brittle layer, *Journal of Mining Science*, 2002, vol. 38, no. 2, pp. 129–132.
2. **Reinoso J., Durand P., Budarapu P. R., and Paggi M.** Crack patterns in heterogenous rocks using a combined phase field-cohesive interface modeling approach: A numerical study, *Energies*, 2019, vol. 12, issue 6, 965 pp.
3. **Klishin S. V.** Numerical study of the fluid filtering process in fractured rock, *Knowledge-based technologies in development and utilization of mineral resources*, 2020, vol. 6, pp. 34–38 [**Клишин С. В.** Численное исследование процесса фильтрации флюида в трещиноватой горной породе // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. — 2020. — № 6. — С. 34–38.]
4. **Kravtsova L. A. and Dementyeva L. A.** Natural-scientific collections of coals, sedimentary rocks and paleontological objects of the Institute of Coal, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 2021, 192 pp. [**Кравцова Л. А., Деметьева Л. А.** Естественно-научные коллекции углей, осадочных пород и палеонтологических объектов Института угля СО РАН. — Новосибирск: СО РАН, 2021. — 192 с.]
5. **Zhang J., Feng Q., Zhang X., Wen S., and Zhai Y.** Relative permeability of coal: a review, *Transport in Porous Media*, 2015, vol. 106, issue 3, pp. 563–594.
6. **Li J., Li B., Pan Z., Wang Z., Yang K., Ren C., and Xu J.** Coal Permeability Evolution Under Different Water-Bearing Conditions, *Natural Resources Research*, 2019, pp. 1–15.
7. **FreeFEM** – an open-source PDE solver using the finite element method [site]. URL: <https://freefem.org>.
8. **OpenFOAM** – an open source CFD software [site]. URL: <https://www.openfoam.com>.
9. **COMSOL Multiphysics® Modeling Software.** Available at: <https://www.comsol.com>.
10. **Zhang B., Li Y., Fantuzzi N., Zhao Y., Liu Y. B., Peng B., Chen J.** Investigation of the flow properties of CBM based on stochastic fracture network modeling, *Materials*, 2019, vol. 12, issue 15, pp. 2387.