

## Исследование влияния вибрационной обработки угольных кернов как способ повышения газопроницаемости

*Л. А. Рыбалкин<sup>1\*</sup>, С. В. Сердюков<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: leonid.rybalkin@gmail.com

**Аннотация.** В статье представлены результаты ряда экспериментальных исследований влияния сейсмического действия на проницаемость угля и гидроразрывов. Исследования проводились на специально разработанном лабораторном стенде. В качестве образцов использовались сплошные угольные керны, керны с одиночными сквозными продольными трещинами, имитирующих дренажные гидроразрывы, и керны с одиночными трещинами, расклиненных проппантом низкой плотности, предназначенным для интенсификации дегазации угольных пластов. Установлены закономерности сейсмического воздействия на газопроницаемость угля в условиях всестороннего сжатия в соответствии с результатами экспериментов. Также экспериментальные результаты выявляют определенные закономерности повышения газопроницаемости дренажных трещин, наблюдаемые при подпорке трещин проппантом и находящихся под сейсмическим воздействием низкой интенсивности в условиях всестороннего сжатия. Исследования показывают, что эффективность сейсмического воздействия возрастает с увеличением накопленного времени экспозиции с последующей стабилизацией и стойкостью положительного эффекта в течение не менее 3 – 7 дней после прекращения воздействия. Полученные результаты дают возможность оценить возможность использования сейсмического воздействия для интенсификации дегазации не расклиненных проппантом гидроразрывов в угольных шахтах.

**Ключевые слова:** дегазация, метан угольных пластов, сейсмическое воздействие, гидроразрыв пласта

## Study of the influence of vibration treatment of coal cores as a way to increase gas permeability

*L. A. Rybalkin<sup>1\*</sup>, S. V. Serdyukov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: leonid.rybalkin@gmail.com

**Abstract.** This paper provides the results of a series of experimental studies on seismic action's effect on the permeability of coal and hydraulic fractures. The experiments have been carried out using solid coal cores, cores with single through longitudinal cracks simulating drainage hydraulic fractures and cores with the single fractures propped with a low-density proppant designed to intensify the degassing of coal seams. The patterns of the seismic impact on the gas permeability of coal under the conditions of all-round compression have been established in accordance with the results of experiments. Also, the experimental results reveal certain patterns of increase of the drainage cracks' gas permeability observed when the cracks are propped with proppant and are under the low intensity seismic effect under the conditions of all-round compression. The studies show that the effectiveness of seismic action increases with an increase in the accumulated exposure time, followed by stabilization and persistence of the positive effect for at least 3 - 7 days after the cessation of exposure. The obtained results provide the opportunity to assess the possibility of using seismic action to intensify the degassing of non-propped hydraulic fractures in coal mines.

**Keywords:** degassing, coal seams methane, seismic vibration, hydraulic fracturing

### ***Введение***

Работы о влиянии сейсмического действия на уголь в настоящее время сосредоточены на исследованиях изменений в напряженно-деформированном состоянии горных пород, образования трещин и увеличения извлечения газа. Так, авторы работы [1] обнаружили, что акустические технологии могут способствовать добыче нефти и повышению эффективности добычи газа. В работах [2, 3] изучали механизм звуковой волны, снижающий газо-адсорбционную способность угля и увеличивающий скорость десорбции газа. В [4] изучили влияние импульсного гидравлического разрыва пласта на десорбцию газа и обнаружили, что импульсный разрыв пласта способствует десорбции газа с увеличением давления и частоты пульсации. Работа [5] иллюстрирует результаты исследования о влиянии сейсмического воздействия на проницаемость керна, характеризующие зависимость эффективности удара от частоты и интенсивности колебаний при выполнении одиночных сеансов.

В настоящее время гидроабразивная технология, технология гидроразрыва пласта и технология импульсного гидроразрыва пласта позволяют значительно повысить эффективность добычи угольных пластов [6, 7].

В рамках этой работы мы провели ряд исследований влияния механической вибрации на угольные керны, содержащие сквозную трещину, заполненную проппантом, при осевой фильтрации газа в диапазоне частот до 360 Гц. Установлены зависимости повышения проницаемости системы разлома ядра с проппантом от частоты и амплитуды колебаний. Полученные результаты дают большое референтное значение для разработки подходов к вибрационной обработке угольных пластов.

### ***Подготовка образцов и методика проведения экспериментов***

Для проведенных экспериментов использовался сухой уголь марки «D» из Пермьяковского разреза Караканского угольного месторождения (Кузнецкий бассейн). Плотность сухого угля составляла 1350 кг/м<sup>3</sup>, при этом скорость продольных волн составляла 1550-1650 м/с.

Дополнительные исследования полированных сечений с помощью электронного микроскопа показали, что испытуемый уголь имеет структуру, типичную для угля с микроблоками размером 2,9 – 6,2 мм, между которыми имеются трещины со средним раскрытием в ненагруженном состоянии 47 мкм. Фильтрация газа в таком угле идет по существующим трещинам [8], и проницаемость уменьшается экспоненциально с увеличением сжатия. Эксперименты проводили с использованием керна со сквозным продольным разрывом, заполненного проппантом низкой плотности, разработанным для интенсификации дегазации угольных пластов методом гидроразрыва пласта [9].

Во время экспериментальной серии осевое и радиальное давления, оказываемые на керн, изменялись поэтапно от 1 до 5 МПа, а затем уменьшались с шагом 1 МПа. Перепад давления газа составлял 0,1, 0,2, 0,3 МПа на каждом этапе измерения.

Проведена две серии измерений проницаемости с пропантом в угольной керне: первая – трещина подвергалась воздействию колебаний, равных 160, 240, 320 Гц; вторая – колебаниям, равным 40, 80, 120, 200, 280 Гц. На каждой из указанных частот воздействие осуществлялось на амплитудах сигнала на выходе вертикального сейсмического приемника в диапазоне от 2 мВ до 100 мВ. Действие сейсмических колебаний осуществлялось в сеансах продолжительностью 5 минут, каждый, измерения фильтрации газа через образец занимали 2-3 минуты.

Коэффициент проницаемости рассчитывали по известной формуле линейного расхода газа и стационарного характера фильтрации [10]:

$$k = \frac{2 \cdot 10^4 V \mu_a P_3}{t S} L \frac{1}{P_1^2 - P_3^2}.$$

где  $k$  – коэффициент проницаемости, мД;  $P_1 = P_3 + \Delta P$  – давление на входе в испытательную камеру, бар ( $10^{-1}$  МПа);  $P_3$  – давление на выходе испытательной камеры, бар;  $V$  – объем газа при давлении  $P_3$ , прошедшего через образец, см<sup>3</sup>;  $\mu_a$  – вязкость азота, мПа (сПа);  $S$  – площадь поперечного сечения образцов, см<sup>2</sup>;  $L$  – длина образца, см;  $t$  – время фильтрации газа через пробу, с.

### **Обсуждение результатов**

Для наблюдения за изменением времени фильтрации после каждого сеанса обработки проводили серию фильтрации через угольный керн в состоянии покоя с определенной частотой, далее в тексте такие измерения просто обозначаются как «фоновые».

Время фильтрации увеличивается с увеличением бокового сжатия образца. Эксперименты показали, что зависимость между этими значениями близка к линейной без видимого гистерезиса (восходящая и нисходящая ветви графа практически идентичны). Индикатором достоверности аппроксимации зависимости линейным трендом является  $R^2 = 0,9763$ .

Эффективность воздействия оценивалась нами по отношению фонового значения времени фильтрации к его значению при вибрации. График изменения времени фильтрации при сейсмическом воздействии в зависимости от бокового сжатия, построенный по средним значениям измерений 1-й и 2-й серий экспериментов, показан на рисунке 1.

График на рисунке 1 иллюстрирует, что эффективность воздействия не зависит от бокового сжатия, поэтому для оценки эффективности воздействия мы использовали средние значения КПД при разных значениях бокового сжатия. На рисунке 2 показана зависимость среднего (над боковым сжатием) уменьшения времени фильтрации при сейсмическом воздействии от частоты вибрации.

На рисунке 2 показано, что при одинаковой частоте сейсмическое воздействие на испытываемый образец угля со сквозной трещиной, расклиненной пропантом, повышает проницаемость (уменьшает время фильтрации) на частотах  $\leq 260 \pm 20$  Гц в 3 раза сильнее, чем на более высоких частотах.

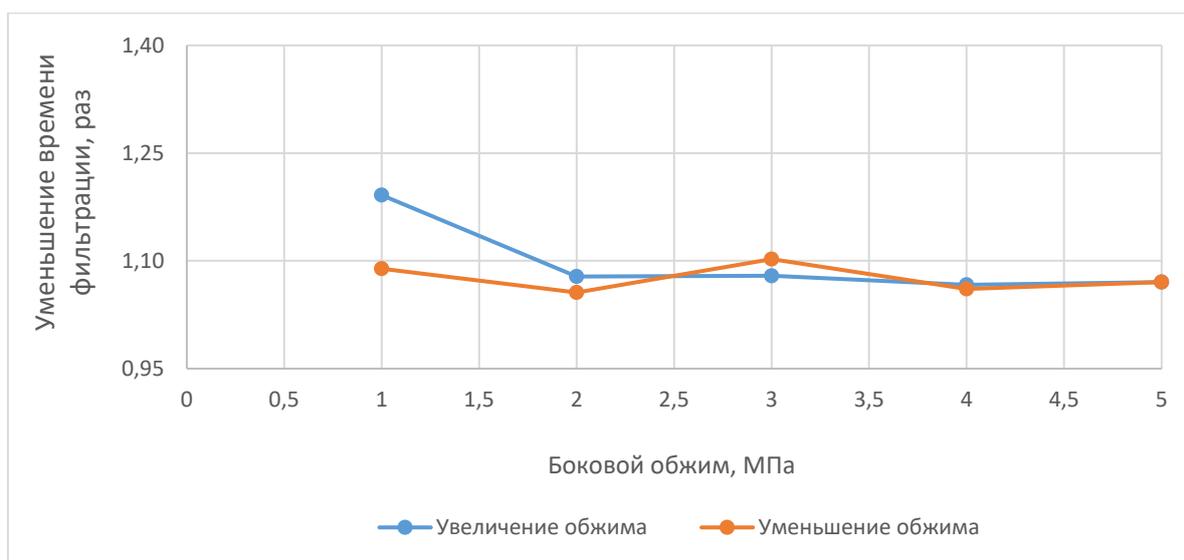


Рис. 1. Усредненное по частоте уменьшение времени фильтрации при воздействии сейсмических колебаний в экспериментах (относительно фонового значения в соответствующем эксперименте)

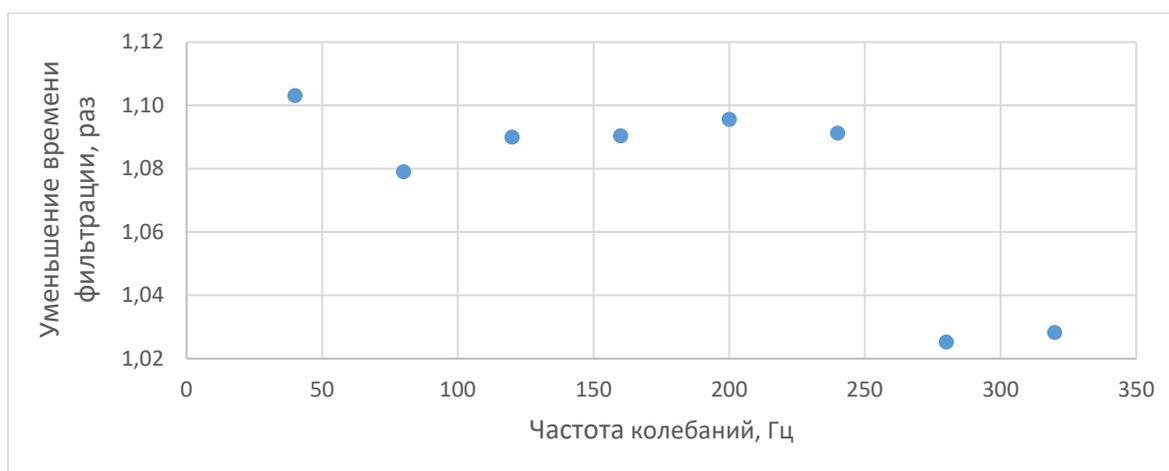


Рис. 2. Зависимости среднего (бокового сжатия) снижения в экспериментах времени фильтрации при вибрации от частоты сейсмических колебаний

Для изучения влияния интенсивности воздействия на проницаемость испытуемого образца была проведена 3-я серия экспериментов, в которых амплитуда колебаний на выходе главного сейсмического приемника составляла 2, 5, 10, 20 и 30 мВ, частота составляла 40, 120, 200 Гц, а боковое сжатие 1, 3,5 МПа, перепад давления газа - 0,01 МПа. Общее время воздействия сейсмических колебаний на испытуемый образец составило 125 минут в сутки, для всей серии – 6 часов 15 минут.

Рисунок 3 показывает графики уменьшения времени фильтрации азота через испытуемый образец от амплитуды и частоты колебаний. Видно, что в исследуемых диапазонах значений эффективность воздействия возрастает с увеличением амплитуды колебаний и практически не зависит от их частоты.

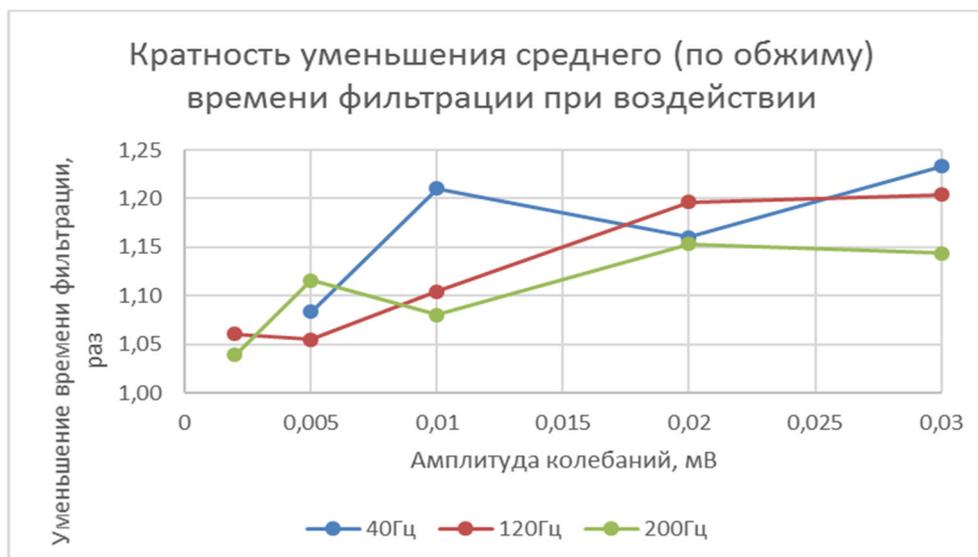


Рис. 3. Зависимости среднего (бокового сжатия) снижения в экспериментах времени фильтрации при вибрации от частоты сейсмических колебаний

На рисунке 4 показан график кратности уменьшения времени фильтрации (усредненного по боковому сжатию) в двух сериях экспериментов относительно исходного фонового значения.

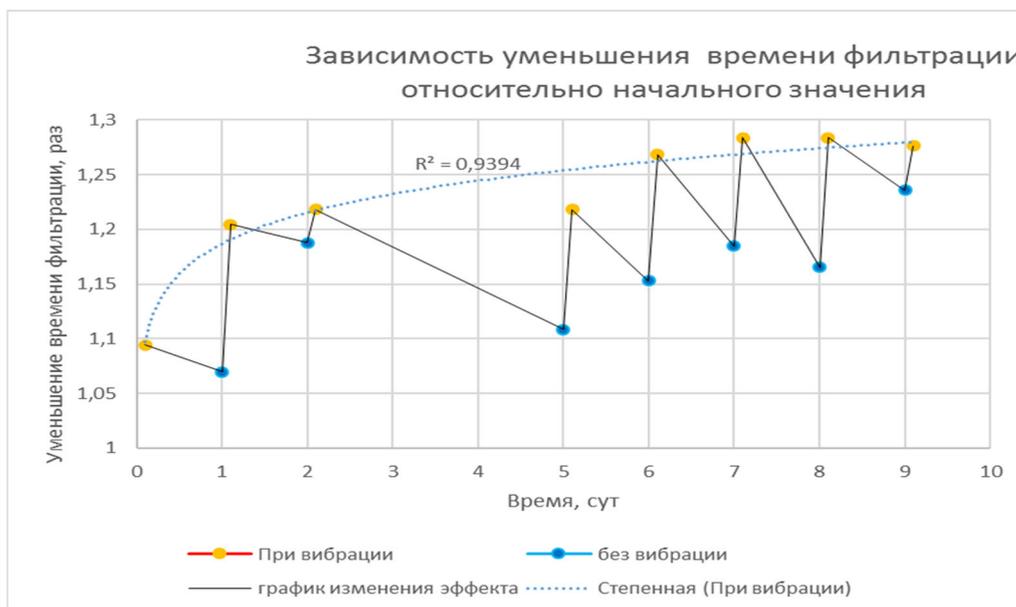


Рис. 4. Кратность уменьшения времени фильтрации (среднего по боковому обжиму) в экспериментах относительно начального значения

Хорошо видно последствие сейсмических колебаний на проницаемость трещины с пропантом в угле и повышение КПД (отношение модуля изменения времени фильтрации к исходному значению) при увеличении накопленного времени экспозиции с 8-10% до 26-28%.

## Выводы

Проницаемость дренажных трещин в угле, расклиненных пропантом, возрастает при сейсмическом воздействии с интенсивностью более 0,4 мВт/м<sup>2</sup>. Максимальный эффект достигается, когда частоты ниже  $260 \pm 20$  Гц. Эффективность сейсмического воздействия возрастает с увеличением накопленного времени до 4-3,5 часов с последующей стабилизацией.

Полезное влияние сейсмической обработки на газопроницаемость угля прослеживается в течение не менее 3 и 7 суток после прекращения воздействия.

Область применения полученных в работе результатов связана с повышением эффективности дегазации пластов и безопасности подземной добычи угля. Рекомендуемыми направлениями исследований являются процессы фильтрации в горных породах и их стимуляция упругими колебаниями низкой интенсивности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Naderi K. and Babadagli T. Influence of intensity and frequency of ultrasonic waves on capillary interaction and oil recovery from different rock types // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2010. – Т. 17. – № 3. – С. 500–508.
2. Mohammadian E, Junin R, Rahmani O, et al. Effects of sonication radiation on oil recovery by ultrasonic waves stimulated water-flooding. // *Ultrasonics*. – 2013. – Т. 53. – №2. – С. 607–614.
3. Abramov VO, Mullakaev MS, Abramova AV, et al. Ultrasonic technology for enhanced oil recovery from failing oil wells and the equipment for its implementation // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2013. – Т. 20. – № 5. – С. 1289–1295.
4. Ni GH, Dong K, Li S, et al. (2019) Gas desorption characteristics effected by the pulsating hydraulic fracturing in coal. *Fuel* 236: 190–200.
5. Westermarck R Enhanced oil recovery with downhole vibration stimulation in Osage County Oklahoma // Tulsa: Oil & Gas Consultants International Inc. – 2003.
6. Zuo SJ, Ge ZL, Zhou Z, et al. A novel hydraulic mode to promote gas extraction: Pressure relief technologies for tectonic regions and fracturing technologies for nontectonic regions // *Appl Sci- Basel*. – 2019. – Т. 9 – №7. – С. 1404.
7. Hu GZ, Sun C, Sun MF, et al. The case for enhanced coalbed methane using hydraulic fracturing in the geostructural belt // *Energy Exploration & Exploitation*. – 2018. – Т. 36. – №6. – С. 1629–1644.
8. Сердюков С. В., Курленя М. В., Рыбалкин Л. А., Шилова Т. В. Влияние гидроразрыва угля на фильтрационное сопротивление зоны дренирования дегазационной скважины // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2019. – № 2. – С. 3–13.
9. Shilova T, Rybalkin L Estimation of propped fracture compressibility in coal seam // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM* 19. – 2019. – Т. 1.3. – С 285–291.
10. ГОСТ 26450.2–85. Методы определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 17 с.

© Л. А. Рыбалкин, С. В. Сердюков, 2022