

# Роль вибрационного воздействия в трещинообразовании и газоотдаче из низкопроницаемого угольного пласта

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-5-37-40>

Низкопроницаемый угольный пласт рассматривается как активная среда. Под активной средой будем понимать среду, реагирующую на внешнее воздействие. К таким средам относятся и угольные пласты, находящиеся в процессе отработки. При вибровоздействии упругие волны способствуют развитию в пласте разнонаправленных сил, что приводит к появлению нескольких систем газопроводящих трещин. Как и все трещиноватые среды, уголь обладает свойством – хрупкостью, которое заключается в том, что при встряхивании угля происходит резкое снижение крепости из-за разрушения структуры массива. Это явление может использоваться в практике увеличения газоотдачи из пластов, в частности, при использовании вибрационного воздействия на угольный массив. Исследования подтверждают, что при воздействии низкими частотами в пласте генерируются колебания, которые должны соответствовать частоте естественных колебаний скелета породы, что приводит к появлению резонанса в угольном пласте.

В виброакустическом поле происходит увеличение трещиноватости массива, а также наблюдается существенное снижение сцепления молекул метана с углем, и это явление вызывает несколько эффектов, отражающихся на состоянии и свойствах низкопроницаемого газонасыщенного угольного пласта. Колебания, которые распространяются в продуктивном пласте в виде упругих волн, изменяют структуру угольного массива, значительно увеличивают проявление знакопеременных сил, обеспечивая образование новых систем трещин, стимулируя выход метана из пористой среды угля.

**Ключевые слова:** проницаемость угольного массива, метаноотдача, трещиноватость, вибрационное воздействие, колебания, низкопроницаемый угольный массив.

**Для цитирования:** Роль вибрационного воздействия в трещинообразовании и газоотдаче из низкопроницаемого угольного пласта / М.В. Павленко, В.Г. Мерзляков, Е.В. Сеницкая и др. // Уголь. 2023. № 5. С. 37-40. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-5-37-40.

## ПАВЛЕНКО М.В.

Канд. техн. наук, доцент  
НИТУ «МИСус»,  
119049, г. Москва, Россия,  
e-mail: mihail\_mggy@mail.ru

## МЕРЗЛЯКОВ В.Г.

Доктор техн. наук, профессор,  
ФГАОУ ВО «Московский  
политехнический университет»,  
107023, г. Москва, Россия,  
e-mail: vgm458@mail.ru

## СИНИЦКАЯ Е.В.

Старший преподаватель НИТУ «МИСус»,  
119049, г. Москва, Россия,  
e-mail: sinitskaya.ev@misis.ru

## ФЛОРОВА И.А.

Старший преподаватель НИТУ «МИСус»,  
119049, г. Москва, Россия,  
e-mail: florova.ia@misis.ru

## АДИГАМОВ Д.А.

Аспирант  
Самарского государственного  
экономического университета (СГЭУ),  
443090, г. Самара, Россия,  
e-mail: danil.adigamov@yandex.ru

## ВВЕДЕНИЕ

Проницаемость является неотъемлемым свойством угольного массива, и это является показателем для измерения особенности метаноотдачи из угольного пласта. Поэтому направленное изменение проницаемости угольного массива имеет важное направляющее значение для разработки угольного пласта. Газоносные, угленосные породы подвер-

жены влиянию геологических структур и механических нарушений [1].

Воздействие на угольный массив можно разделить на две категории, а именно на статические и динамические воздействия [2]. В данном случае в текущих исследованиях рассматриваются динамические воздействия [3, 4, 5]. Рассматриваются и исследуются критические факторы, такие как вибрационная нагрузка на угольный массив.

Как разновидность нетрадиционных коллекторов трещиноватые газовые коллекторы в угле привлекают все большее внимание из-за наличия в них значительной емкости и высокого содержания метана. Поскольку основными каналами газовыделения в трещиноватом угольном пласте являются трещины и микронанопоры, по сравнению с обычными коллекторами, то наблюдается очевидный эффект увеличения метановыделения из массива.

Газопроницаемость трещиноватых коллекторов газоносных угольных пластов – это динамическая проницаемость, которая изменяется с изменением проницаемости пород окружающего угольного пласта, и это важный параметр коллектора, который влияет на газоотдающую способность угольного массива [6].

### ЗАДАЧА ВИБРОВВОЗДЕЙСТВИЯ В ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИИ УГОЛЬНОГО МАССИВА

Для изучения характеристик трещинообразования и проницаемости углей при повторяющемся вибрационном воздействии были проведены испытания на циклическое вибровоздействие с различными временными интервалами [7, 8, 9]. Чтобы определить механизмы изменения напряжений при вибровоздействии, которые влияют на развитие трещин в угольном массиве в трехосных условиях, экспериментально изучаются различные стратификации (положение отдельных частей угольного пласта, как в вертикальном, так и горизонтальном разрезе) на основе газопроницаемости угля [2].

Для того чтобы изучить механическое поведение и характеристики проницаемости угля при совместном воздействии напряжения и фильтрации, был предложен механизм изменения проницаемости при вибрационном воздействии в процессе рассмотрения распространения волны в трещине угля [10]. При этом первичные трещины впоследствии развиваются в макроскопическую трещину.

Простейшим видом колебательного движения при вибрационном воздействии являются гармонические колебания, когда колеблющаяся величина изменяется со временем по закону синуса (1):

$$X(t) = A \cdot \sin(\omega_t + \varphi_0). \quad (1)$$

В нашем случае волновые колебания приводят к смещению стенок микротрещин угольного блока на величину  $x$  при амплитуде колебания, равной  $A$ , т.е. максимальное смещение может наступить при мгновенной фазе колебаний, которая представлена величиной  $(\omega_t + \omega_0)$ , при этом циклическая фаза колебания  $\omega_0$  будет соответствовать при текущем времени воздействия  $t$ .

Рассмотрим математическое выражение, описывающее характер колебаний, определяющее смещение стенок микротрещины угольного блока при волновом воз-

действию, как функцию двух переменных – времени вибровоздействия  $t$  и пространственной координаты  $l$  трещины. Для получения уравнения волны, то есть аналитического выражения функции двух переменных  $L = f(t, x)$  представим, что на некоторой поверхности трещины угольного блока Б возникают гармонические колебания с частотой  $\omega$ , амплитудой  $A$  и начальной фазой  $\varphi = 0$ :  $L_{\text{бл.}} = A \sin \omega t$ . Поскольку блоки угольного пласта упруго связаны между собой, то колебания от поверхности Б распространяются вдоль оси  $x$ , со скоростью  $v$  достигают точки К (см. рисунок).

Если в угольном блоке отсутствует затухание, то смещение на этой поверхности будет иметь вид:

$$L_{\text{бл.}} = A \sin \omega(t - \Delta t),$$

т.к. смещение здесь запаздывает на время  $\Delta t$  относительно точки Б. Поскольку  $\Delta t = \frac{BK}{v} = \frac{l}{v}$ , то, подставив это со-

отношение в формулу для  $L_{\text{бл.}}$ , получим уравнение волны в виде:

$$L_{\text{бл.}}(t, x) = A \sin \omega \left( t - \frac{l}{v} \right). \quad (2)$$

$$\text{Учитывая, что } \omega = \frac{2\pi}{T},$$

где  $T$  – период колебания, а длина волны  $l = v \cdot T$  формулу (2) можно записать в виде:

$$L_{\text{бл.}}(t, x) = A \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{l}{\lambda} \right). \quad (3)$$

Уравнения вибрационной волны (2) или (3) позволяют определить смещение любой поверхности микротрещины угольного блока угля с координатой  $x$  в любой момент времени  $t$  вибрационного воздействия.

Согласно проведенному анализу, изменение частоты и амплитуды вибровоздействия влияет на характеристики трещиноватости угольного массива. Влияние на массив было положительным, что способствует зарождению, развитию и расширению трещин в массиве. В то же время во время продвижения забоя при угледобыче напряжение

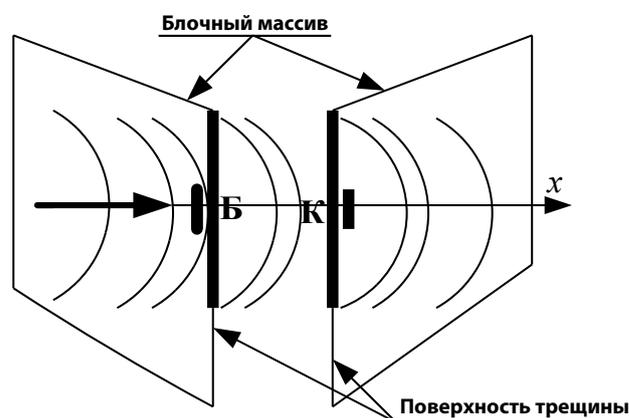


Схема распространения вибрационной волны в микротрещине блока угля

The scheme of propagation of a vibration wave in microcrack of the coal block

возмущения приводит угольный массив в состояние циклической нагрузки. Под действием циклической нагрузки параметры пор и трещин в угольном массиве изменяются, это вызывает изменение трещиноватости угольного массива, что также приводит к увеличению проницаемости [9, 10]. Поэтому изучение характеристик проницаемости угля при циклической нагрузке в процессе вибровоздействия имеет большое практическое значение для метаотдачи из массива [9, 10, 11, 12].

Проницаемость угольного массива от вибрационного воздействия может оцениваться на основе состояния потока метана при определенной частоте. При этом проницаемость угольного массива сначала уменьшается, затем увеличивается с наличием деформации и, наконец, достигает своего максимума [8, 12]. Экспериментальные результаты показали, что проницаемость газоносного угля постепенно увеличивалась с увеличением частоты и амплитуды в определенном диапазоне [8, 11, 12, 13, 14, 15, 16].

Воздействие на угольный массив с дневной поверхности генератора частотой колебаний в пределах 7-14 Гц и амплитудой колебаний 3-6 см [8, 11] приводит к поэтапному изменению состояния угольного массива, что и определило увеличение трещиноватости угольного пласта в зоне вибровоздействия [14].

Оценивая влияние вибрационного воздействия на систему «уголь – метан», можно предположить, что потеря устойчивости этой системы с переходом метана в свободную фазу возможна в динамических условиях [2, 3, 5, 8]. Высокая эффективность вибровоздействия упругими колебаниями на угольный массив достигается как через скважины с поверхности, так и из подземных скважин при рациональных режимах воздействия с учетом характеристик обрабатываемого угольного пласта и с учетом поставленных задач [7, 10, 14].

Экспериментальные исследования свойств фильтрации газа, вызванного вибрационным воздействием, были проведены с помощью использования генератора колебаний, помещенного в угольный пласт. Результаты показывают, что изменение проницаемости угля в процессе воздействия имеет очевидную стадийную характеристику и гистерезисную природу проницаемости [5, 6, 7, 14, 17].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во время вибровоздействия внутреннее выделение энергии приводит к трещинообразованию в угле. Таким образом, разработка эффективной формы вибрационного сигнала является важнейшей исследовательской проблемой [17].

Величина проницаемости угольного пласта тесно связана со структурой пор горных пород. Поэтому, основываясь на результатах испытаний, проницаемость и пористость угольного массива зависят от созданных напряжений при вибрационном воздействии.

В процессе подземной разработки угольного пласта, на который осуществляется вибрационное воздействие, имеет место многократное распределение поля напряжений, что приводит к постоянному трещинообразованию в массиве, в то же время слои угольного массива разрушаются и подвергаются повторному процессу знакопеременных нагрузок.

## Список литературы

1. Лопухов Г.П., Павленко М.В., Сальников А.Н. Блочное строение горной породы каменноугольной системы // Горная промышленность. 2016. № 4. С. 68-69.
2. Садовский М.А. Автомодельность геодинамических процессов // Вестник АН СССР. 1986. № 8. С. 3-11.
3. Чеботарев А.Г., Пальцев Ю.П. Виброакустические факторы рабочей среды при подземной и открытой добыче твердых полезных ископаемых // Горная Промышленность. 2012. № 5. С. 50-59.
4. Energy analysis of coal damage deformation under pulsating pore water pressure / H. Zhu, M. Zhang, B. Gu et al. // Journal of Central South University (Science and Technology). 2014. Vol. 45. No. 10. P. 3657-3663.
5. The mechanism of breaking coal and rock by pulsating pressure wave in single low permeability seam / X. Li, B. Lin, C. Zhai et al. // Journal of China Coal Society. 2013. Vol. 38. No. 6. P. 918-923.
6. Pore/fracture structure and gas permeability alterations induced by ultrasound treatment in coal and its application to enhanced coalbed methane recovery / P. Liu, A. Liu, F. Zhong et al. // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Vol. 205. P. 108862-108877.
7. Вибрационное воздействие через скважины и технология дегазационной подготовки низкопроницаемого угольного пласта / М.В. Павленко, Н.Г.Барнов, Д.А. Кузиев и др. // Уголь. 2020. № 1. С. 36-40. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-1-36-40.
8. Павленко М.В., Иванов П.Д. Степень восприимчивости угольного массива к изменениям при вибровоздействии и технические решения по увеличению метаноотдачи из пласта // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 2-1, (специальный выпуск 2-1). С. 174-183. DOI: 10: 25018/0236-1493-2021-210-174-183.
9. Shmonov V., Vitovtova V., Zharikov A. Experimental study of seismic oscillation effect on rock permeability under high temperature and pressure // Int. J. Rock Mech. and Mm. Science. 1999. Vol. 36. № 3. P. 405-412.
10. Pavlenko M.V. Borehole system for formation of increased fracturing of at coal seam using vibration / Proceedings of the International Colloquium DYMAMESI 2020. Prague, Czech Republik, 2020, pp. 29-32.
11. Павленко М.В., Кенжебаев К.Н. Особенности метановыделения в процессе вибровоздействия в блоках угольного массива // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 5 (специальный выпуск 10). С. 51-50. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-5-10-51-59.
12. Факторы воздействия комбайна при добыче угля на увеличение метаноотдачи массива в рабочее пространство лавы / М.В. Павленко, М.П. Хайдина, Д.А. Кузиев и др. // Уголь. 2019. № 4. С. 8-11. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-4-8-11.
13. Kong Q, Wang H.L., Xu W.Y. Experimental study on permeability and porosity evolution of sandstone under cyclic loading and unloading // Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2015. Vol. 37. No. 10. P. 1893-1900.
14. Changes in pore structure and permeability of low permeability coal under pulse gas fracturing / P. Hou, F. Gao, Y. Ju et al. // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2016. Vol. 34. P. 1017-1026.
15. Formation of Comprehensive Service System of Belt Conveyor Gearboxes / B. Gerike, Y. Drozdenko, E. Kuzin et al. // E3S Web of Conferences. 2018. No 41. 03011. DOI: 10.1051/E3SCONF/20184103011.
16. Performability of electro-hydro-mechanical rotary head of drill rig in open pit mining: A case-study / D.A. Kuziev, V.V. Zotov, E.S. Sazankova et al. // Eurasian Mining. 2022. No 37. P. 76-80. DOI: 10.17580/em.2022.01.16.
17. Impact of pulsation frequency and pressure amplitude on the evolution of coal pore structures during gas fracturing / Y. Liu, X. Wen, M. Jiang et al. // Fuel. 2020. Vol. 268. Article ID 117324.

Original Paper

UDC 622.232.72:622.411.33 © M.V. Pavlenko, V.G. Merzlyakov, E.V. Sinitskaya, I.A. Florova, D.A. Adigamov, 2023  
 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2023, № 5, pp. 37-40  
 DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-5-37-40>

**Title****THE ROLE OF VIBRATION IMPACT IN FRACTURING AND GAS RECOVERY FROM A LOW-PERMEABILITY COAL SEAM****Authors**

Pavlenko M.V.<sup>1</sup>, Merzlyakov V.G.<sup>2</sup>, Sinitskaya E.V.<sup>1</sup>, Florova I.A.<sup>1</sup>, Adigamov D.A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Federal National Independent Educational Institution of Higher Education "National University of Science and Technology MISIS" (NUST MISIS),

<sup>2</sup> FGAOU VO Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation

<sup>3</sup> FGBOU VO "Samara state economic University", Samara, 443090, Russian Federation

**Authors Information**

**Pavlenko M.V.**, PhD (Engineerin), Associate professor,

e-mail: [mihail\\_mggy@mail.ru](mailto:mihail_mggy@mail.ru)

**Merzlyakov V.G.**, Doctor of Engineering Sciences, Professor,

e-mail: [vgm458@mail.ru](mailto:vgm458@mail.ru)

**Sinitskaya E.V.**, Senior lecturer, e-mail: [sinitskaya.ev@misis.ru](mailto:sinitskaya.ev@misis.ru)

**Florova I.A.**, Senior lecturer, e-mail: [florova.ia@misis.ru](mailto:florova.ia@misis.ru)

**Adigamov D.A.**, PhD Student, e-mail: [danil.adigamov@yandex.ru](mailto:danil.adigamov@yandex.ru)

**Abstract**

A low-permeability coal seam is regarded as an active medium. The active medium is defined as one that reacts to external impacts. This includes coal seams that are being mined. Elastic waves generated by vibration contribute to emergence of multidirectional forces within the seam, which generates several gas-conducting systems of fractures. Coal shares the same property with all the other fractured media, i.e. brittleness, which is manifested by a sharp decrease in hardness due to destruction of the massif's structure when coal is shaken. This phenomenon can be utilized in the practice to enhance gas recovery from seams, in particular, when using vibration impact on the coal matrix. Studies confirm that exposure to low frequencies generates vibrations within the seam, which have to match the natural vibration frequency of the rock matrix and cause a resonance effect in the coal seam. An increase in the rock mass fracturing takes place within the vibroacoustic field, and a significant decrease is observed in bonding of the methane molecules with coal. This phenomenon causes several effects that impact the state and properties of the low-permeability gas-saturated coal seam. The vibrations that propagate within the pay zone as elastic waves change the structure of the coal seam and significantly increase the occurrence of alternating forces to produce new fracture systems and to stimulate methane escape from the coal porous medium.

**Keywords**

Permeability of coal mass, Methane recovery, Fracturing, Vibrational impact, Oscillation, Low-permeability coal mass.

**References**

- Lopukhov G.P., Pavlenko M.V. & Salnikov A.N. Block structure of the rock of the carboniferous system. *Gornaya promyshlennost*, 2016, (4), pp. 68-69. (In Russ.).
- Sadovsky M.A. Self-similarity of geodynamic processes. *Vestnik Akademii Nauk SSSR*, 1986, (8), pp. 3-11. (In Russ.).
- Chebotarev A.G. & Fingers Yu.P. Vibroacoustic factors of the working environment during underground and open mining of solid minerals. *Gornaya promyshlennost*, 2012, (5), pp. 50-59. (In Russ.).
- Zhu H., Zhang M., Gu B. & Shen X. Energy analysis of coaldamage deformation under pulsating pore water pressure. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, Vol. 45, (10), pp. 3657-3663.
- Li X., Lin B., Zhai C., G. Li & Ni G. The mechanism of breaking coal and rock by pulsating pressure wave in single low permeability seam. *Journal of China Coal Society*, 2013, Vol. 38, (6), pp. 918-923.
- Liu P., Liu A., Zhong F., Jiang Y. & Li J. Pore/fracture structure and gas permeability alterations induced by ultrasound treatment in coal and its application

to enhanced coalbed methane recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, (205), pp. 108862–108877.

7. Pavlenko M.V., Barnov N.G., Kuziev D.A., Kenzhabaev K.N. & Monzoev M.V. Vibration impact through wells and the technology of degassing of the preparation of low-permeability coal seam. *Ugol'*, 2020, No. 1, pp. 36-40. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2020-1-36-40.

8. Pavlenko M.V. & Ivanov P.D. The degree of susceptibility of the coal massif to changes during vibration and technical solutions to increase methane recovery from the reservoir. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten*, 2021, (2-1), (Special issue 2-1), pp. 174-183. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2021-210-174-183.

9. Shmonov V., Vitovtova V. & Zharikov A. Experimental study of seismic oscillation effect on rock permeability under high temperature and pressure. *Int. J. Rock Mech. and Mm. Science*, 1999, Vol. 36, (3), pp. 405-412.

10. Pavlenko M.V. Borehole system for formation of increased fracturing of at coal seam using vibration. Proceedings of the International Colloquium DYMAMESI 2020, Prague, Czech Republik, 2020, pp. 29-32.

11. Pavlenko M.V. & Kenzhebaev K.N. Features of methane release in the process of vibration in coal blocks. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten*, 2019, (5), (Special issue 10), pp. 51-50. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2019-5-10-51-59.

12. Pavlenko M.V., Khaidina M.P., Kuziev D.A., Pihtorinskiy D. & Muratov A.Z. Impacts of the combine harvester in the production of coal to increase methane recovery array in the workspace lava. *Ugol*, 2019, (4), pp. 8-11. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2019-4-8-11.

13. Kong Q., Wang H.L. & Xu W.Y. Experimental study on permeability and porosity evolution of sandstone under cyclic loading and unloading. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, Vol. 37, (10), pp. 1893-1900.

14. Hou P., Gao F., Ju Y. et al. Changes in pore structure and permeability of low permeability coal under pulse gas fracturing. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, (34), pp. 1017–1026.

15. Gerike B., Drozdenko Y., Kuzin E., Ananyin I. & Kuziev D. Formation of Comprehensive Service System of Belt Conveyor Gearboxes. *E3S Web of Conferences*, 2018, 41, 03011. DOI: 10.1051/E3SCONF/20184103011.

16. Kuziev D.A., Zotov V.V., Sazankova E.S. & Muminov R.O. Performability of electro-hydro-mechanical rotary head of drill rig in open pit mining: A case-study. *Eurasian Mining*, 2022, (37), pp. 76-80. DOI: 10.17580/em.2022.01.16.

17. Liu Y., Wen X., Jiang M. et al. Impact of pulsation frequency and pressure amplitude on the evolution of coal pore structures during gas fracturing. *Fuel*, 2020, (268), Article ID 117324.

**For citation**

Pavlenko M.V., Merzlyakov V.G., Sinitskaya E.V., Florova I.A. & Adigamov D.A. The role of vibration impact in fracturing and gas recovery from a low-permeability coal seam. *Ugol'*, 2023, (5), pp. 37-40. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-5-37-40.

**Paper info**

Received December 22, 2022

Reviewed March 15, 2023

Accepted April 27, 2023