

## Причины трещинообразования и признаки деформации угольного пласта в зоне вибрационного воздействия

М.В. Павленко✉, Е.В. Сеницкая, И.А. Флорова, Д.Г. Сандакова

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация

✉ mihail\_mggy@mail.ru

**Резюме:** Применение вибрационного воздействия для эффективной подготовки низкопроницаемого угольного пласта – перспективный и постоянно совершенствующийся процесс. Главная трудность теоретического исследования состоит в том, что угольные пласты очень разнообразны по своим свойствам и представляют собой сложную среду. При вибрационном воздействии происходит изменение емкостных и фильтрационных характеристик угольного массива, что приводит к изменению структуры и емкости порово-трещинного пространства угля. Такая реакция находит хорошее объяснение: каждый акт вибрационного воздействия вызывает быстрое изменение в угольном массиве в соответствии с действующими напряжениями во время вибрации. Эта точка зрения была положена в основу теоретических рассуждений, с целью обоснования рационального воздействия по направленному вибровоздействию на угольный пласт, для изменения трещиноватости и дальнейшей интенсификации метаноотдачи. Это подтверждается как лабораторными, так и производственными экспериментами по вибрационному воздействию. Подобную природу имеют изменения в окружающей среде после сильных землетрясений даже на больших расстояниях от источника воздействия. Поэтому наиболее простым по конструктивной реализации и менее затратным по энергетике и материалоемкости является направленный колебательный процесс на угольный низкопроницаемый пласт, который совершается с использованием виброустановок как наземного, так и подземного исполнения.

**Ключевые слова:** низкопроницаемый угольный пласт, вибровоздействие, газоотдача, горный массив, трещинообразование

**Для цитирования:** Павленко М.В., Сеницкая Е.В., Флорова И.А., Сандакова Д.Г. Причины трещинообразования и признаки деформации угольного пласта в зоне вибрационного воздействия. *Горная промышленность*. 2024;(2):134–138. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-134-138>

## Causes of fracturing and evidence of coal seam deforming in the vibration impact zone

M.V. Pavlenko✉, E.V. Sinitskaya, I.A. Florova, D.G. Sandakova

National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

✉ mihail\_mggy@mail.ru

**Abstract:** The use of vibration effects for the effective preparation of a low-permeability coal seam is a fairly promising and constantly improving process. The main difficulty of theoretical research is the fact that coal seams are very diverse in their properties and represent a complex environment. Under the influence of vibration, the capacitive and filtration characteristics of the coal massif change. This leads to a change in the structure and capacity of the porous-fissured space of coal. This reaction finds a good explanation: each act of vibration action causes a rapid change in the coal mass in accordance with the operating stresses during vibration. This point of view was used as the basis for theoretical reasoning, in order to justify the rational impact of directional vibration on the coal seam, to change fracturing and further intensify methane recovery. This is confirmed by both laboratory and industrial experiments on vibration effects. Changes in the environment after strong earthquakes are of a similar nature, even at great distances from the source of the impact. Therefore, the simplest in terms of constructive implementation and less costly in terms of energy and material consumption is a directed oscillatory process on a low-permeability coal seam, which is performed using vibration installations of both surface and underground design.

**Keywords:** low-permeability coal seam, vibrational impact, gas release, rock mass, fracturing

**For citation:** Pavlenko M.V., Sinitskaya E.V., Florova I.A., Sandakova D.G. Causes of fracturing and evidence of coal seam deforming in the vibration impact zone. *Russian Mining Industry*. 2024;(2):134–138. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-134-138>

## Введение

При эксплуатации угольных месторождений используются многочисленные и постоянно совершенствующиеся методики увеличения метаноотдачи из угольных пластов. И, тем не менее, достигнутый уровень значений коэффициента газоотдачи из угольного пласта низок.

Трещиноватый угольный массив состоит из многочисленных пористых и проницаемых блоков, отделенных друг от друга трещинами. Естественно, данные свойства угольных пластов накладывают свой отпечаток на особенности протекания процессов фильтрации газов [1–3]. Поэтому такая структура угольного массива обуславливает проявление обменных процессов между системой блоков и системой трещин [3–5].

Проведенный комплекс исследований по вибрационному воздействию на угольный массив можно рассматривать как важный этап исследований этой проблемы [6; 7]. На данном этапе была выполнена серия натуральных экспериментов, впервые обнаружен ряд эффектов вибрационного воздействия [6–9]. Сделаны попытки их объяснения.

Оценивая влияние вибрационного воздействия на систему «уголь+метан», можно предположить, что потеря устойчивости системы с выделением метана в свободную фазу возможна в динамических условиях и в условиях, при которых угольный массив может под действием колебаний терять структурную однородность.

Существующая задача – использования вибрационного излучения сейсмических волн рассматривает динамическую систему (вибратор + угольный массив) – как совокупность сосредоточенных масс и упругих элементов [2; 4; 6; 8].

Подтверждая в частном случае вибровоздействие на угольный массив и справедливость предложенной динамической системы, а также с учетом результатов проведенных экспериментов можно: выявить и ряд принципиальных аналогий [6; 7; 10; 11]. Полученные результаты в целом показывают, что при изменении амплитуды и частоты колебаний на модели для согласования экспериментальных данных приходится изменять параметры последней, что, очевидно, резко увеличивает предсказательную ценность такой модели.

С точки зрения сложности отвода газа из низкопроницаемого угольного пласта с высоким содержанием метана и низкой газопроницаемостью изучались распространение пульсирующей волны напряжения и механизм разрушения угля с использованием теоретического подхода к данной проблеме, лабораторного эксперимента и полевых испытаний. Исследование показывает, что воздействие пульсирующей волны вибровоздействия может увеличивать напряжение в одних областях и уменьшать в других. Эффект вибровоздействия в угольном массиве приводит к тому, что даже небольшое пульсирующее воздействие создает лучший эффект трещинообразования, чем обычное статическое воздействие [2; 10; 11]. На основе исследований была предложена технология вибровоздействия на низкопроницаемый угольный пласт для изменения его газопроницаемости [10; 11]. Экспериментальные исследования здесь являются доминирующими, хотя и реализуются методом проб и ошибок.

Однако эволюция структуры трещин и пор угольного массива при вибровоздействии ясна, особенно когда вынужденная частота вибрации совпадает с собственной частотой пласта, что проявляется в результате резонансных

явлений [11; 13]. Результаты экспериментов показывают, что вибровоздействие при относительно низких частотах (менее 100 Гц) увеличивает общий объем пор и создает дополнительные системы газопроводящих трещин [6; 11; 13].

## Методы исследования

В исследовании был проведен эксперимент по вибровоздействию на низкопроницаемый угольный массив в лабораторных масштабах, и было предварительно сформировано более 3500 последовательных по времени импульсов [6; 9]. Наблюдался максимум метаноотдачи из угольного массива в лабораторных условиях при частоте 30–40 Гц, и при вибровоздействии на установке подземного исполнения при частоте 11–14 Гц, что подтверждает наличие резонанса на данном этапе вибровоздействия [6; 7; 11; 13].

Вибровоздействие в натуральных условиях повторяет характер процесса вибровоздействия на образец угля в лабораторных условиях, что и приводит к аналогичным результатам, так как исследуемый кусок отбитого газоносного угля рассматриваем как небольшой угольный массив. Можно предположить, что газовыделения из отбитого куска угля и угольного массива качественно подобны и отличаются, только количественно. Опыт подтверждает это предположение.

Вибрационное воздействие в области низких частот (1–100 Гц) на низкопроницаемый угольный пласт приводит к поэтапному изменению состояния угольного массива, что и определило увеличение трещиноватости и метаноотдачи угольного пласта в зоне вибровоздействия [6; 7; 10; 11; 13].

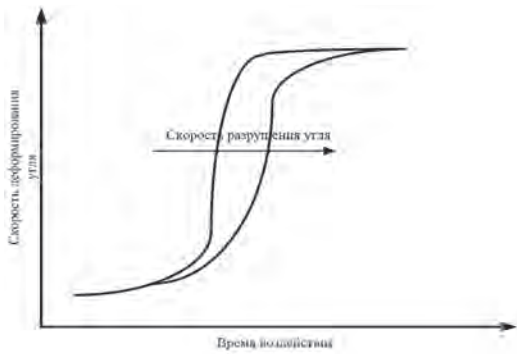
В настоящее время вибраторы, различного исполнения, являются не только одними из наиболее распространенных инструментов вибрационного воздействия, но благодаря ряду принципиальных преимуществ перед другими источниками сейсмических волн все чаще являются инструментом воздействия в различных областях исследований среды, исследований нелинейных явлений и т.д. Полная контролируемость вибрационных воздействий по сравнению с другими воздействиями очевидна, и оценка действительных возможностей вибратора как источника сейсмических волн становится весьма актуальной [11; 14–17].

## Геометрия трещинообразования в угольном массиве

Создание трещин в угольном массиве под действием знакопеременных воздействий – наиболее хрупкая форма разрушения угля, которое может произойти при вибровоздействии. При больших степенях деформирования вероятность трещинообразования увеличивается, как это проиллюстрировано на диаграмме хрупкого перехода в угольном массиве (рис. 1).

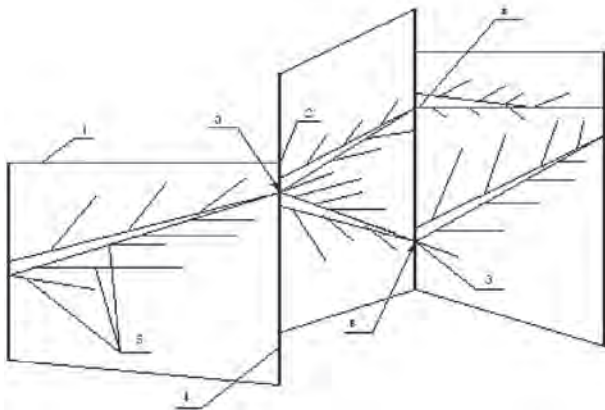
Во время использования вибрационного воздействия для обработки ближайшей зоны пласта, оно может оказать существенное влияние на угольную и горную массу вокруг скважины. Вибровоздействие приводит к снижению прочности угольного массива, что способствует адсорбции газа. Наконец, образуется дополнительная сеть трещин, которая способствует повышению проницаемости угольного массива по метану [8; 11]. Объем метаноотдачи из угольного пласта увеличивается.

При этом проницаемость угольного массива, является



**Рис. 1**  
Хрупкий переход в трещиноватом угольном массиве при вибровоздействии

**Fig. 1**  
Brittle transition in fractured coal massif under vibration impact



**Рис. 2**  
Образование ветвящейся сети трещин и ступенек скола на границах угольных блоков: а – соединение параллельных трещин за счет вторичного скола или сдвига; б – образование ступенек скола при прохождении трещины через образовавшуюся поверхность; в – образование ветвящейся сети трещин после прохождения трещины через границу поверхности угля; 1 – плоскость трещины; 2 – ступенька скола; 3 – направление распространения трещины; 4 – граница поверхности; 5 – система возникшей трещиноватости, во время вибрационного воздействия на угольный пласт.

**Fig. 2**  
Formation of a branching fracture pattern and the cleavage steps at the boundaries of the coal blocks: а – connection of the parallel fractures due to secondary cleavage or shear; б – formation of the cleavage steps when the fracture passes through the formed surface; в – formation of the branching fracture pattern after the fracture passes through the coal surface boundary; 1 – a fracture plane; 2 – a cleavage step; 3 – direction of the fracture propagation; 4 – the surface boundary; 5 – the system of fractures formed during the vibration impact on the coal seam.

критически важным свойством для добычи газа из газоносного угольного пласта. На неё оказывают влияние геометрия пор и трещин угольного массива.

Мелкие трещины, образующие взаимосвязанную сеть трещин, повышают коэффициент проницаемости угольного массива, обеспечивают новые каналы перемещения метана в угольном массиве (рис. 2).

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, с учетом поставленных задач [16]. Поэтому фильтрационные процессы в угольном массиве после вибрационного воздействия в образовавшихся блоках обязаны полученной новой системе трещин [3; 7; 17].

**Заключение**

Применение вибровоздействия при обработке угольного пласта – достаточно перспективный и достаточно исследованный процесс. Главная трудность теоретического исследования состоит в том, что пласты очень разнообразны по своим свойствам и представляют собой сложную неоднородную структуру. Результаты, касающиеся динамики взаимодействия вибрационного источника с реальным угольным пластом, свидетельствуют о характере этого взаимодействия. Мы анализируем влияние вибрационного воздействия на образование и рост трещин в угольном массиве, используя результаты моделирования, исследования в лабораторных условиях на образцах угля и натурные исследования. Полученные результаты разномасштабных экспериментов объясняют напряженно-деформированную природу угольного массива.

Основываясь на сложной ситуации с метановыделением из угольного пласта с низкой проницаемостью, необходимо учитывать механизм формирования трещиноватости при вибрационном воздействии с использованием теоретических исследований, математического моделирования и результатов натурных испытаний для решения безопасности в угольных шахтах [16; 18]. Результаты исследований показывают, что вибровоздействие в определенном диапазоне частот на массив угля ведет к росту трещиноватости и способствует стимулированию метаноотдачи даже в случае, когда вибровоздействие осуществляется на низкопроницаемый угольный массив. Указанные результаты привели к необходимости считать вибрационное воздействие обязательным элементом комплексного воздействия для обеспечения трещиноватости и увеличения фильтрационных потоков метана в угольных блоках угольных пластов. Таким образом, при вибровоздействии происходит изменение емкостных и фильтрационных характеристик угольного массива.

**Список литературы / References**

1. Премыслер Ю.С., Яновская М.Ф. Влияние микротрещиноватости угля на скорость десорбции из него метана. *Известия АН СССР. ОТН. Metallurgiya i toplivo*. 1960;(3):92–98.  
Premysler Yu. S., Yanovskaya M.F. The effect of coal microcrackage on the rate of methane desorption from it. *Izvestiya AN SSSR. OTN. Metallurgiya i Toplivo*. 1960;(3):92–98. (In Russ.)



2. Павленко М.В., Барнов Н.Г., Кузиев Д.А., Кенжабаев К.Н., Монзоев М.В. Вибрационное воздействие через скважины и технология дегазационной подготовки низкопроницаемого угольного пласта. *Уголь*. 2020;(1):36–40. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-1-36-40>  
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;(1):36–40. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-1-36-40>
3. Одинцев В.Н. Оценка микротрещинообразования в угле при десорбции метана. *Записки Горного института*. 2001;(1):146–150. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/9736> (дата обращения: 25.02.2024).  
Odintsev V.N. Estimation of microcracking in coal during methane desorption. *Journal of Mining Institute*. (In Russ.) Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/9736> (accessed: 25.02.2024).
4. Khoreshok A., Kantovich L., Kuznetsov V., Preis E., Kuziev D. The results of cutting disks testing for rock destruction. *E3S Web of Conferences*. 2017;15:03004. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/20171503004>
5. Лопухов Г.П., Павленко М.В., Сальников А.Н. Блочное строение горной породы каменноугольной системы. *Горная промышленность*. 2016;(4):68–69.  
Lopukhov G.P., Pavlenko M.V., Salnikov A.N. Block structure of carboniferous system rock strata. *Russian Mining Industry*. 2016;(4):68–69. (In Russ.)
6. Павленко М.В., Хайдина М.П., Кузиев Д.А., Пихторинский Д., Муратов А.З. Факторы воздействия комбайна при добыче угля на увеличение метаноотдачи массива в рабочее пространство лавы. *Уголь*. 2019;(4):8–11. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-4-8-11>  
Pavlenko M.V., Khaidina M.P., Kuziev D.A., Pihorinskiy 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):8–11. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-4-8-11>
7. Клементьева И.Н., Кузиев Д.А. Современное состояние и перспективы развития конструкций карьерных комбайнов для безвзрывной послойной выемки прочных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(2):123–128. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-02-0-123-128>  
Klement'eva I.N., Kuziev D.A. Actual status and prospects for future development of surface miners, designed for for blastless lit-by-lit excavation of solid rock. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(2):123–128. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-02-0-123-128>
8. Павленко М.В., Базаров Б.А., Конакбаева А.Н., Мезенцева А.В. Воздействие механических колебаний на газонасыщенный угольный массив как деформируемую систему. *Уголь*. 2022;(4):46–49. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-4-46-49>  
Pavlenko M.V., Bazarov B.A., Konakbaeva A.N., Mezentseva A.V. The effect of mechanical vibrations in a gas-saturated coal massif as a deformable system. *Ugol'*. 2022;(4):46–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-4-46-49>
9. Павленко М.В., Федотов И.Е. Кинетика десорбции метана из угля под действием вибрационного воздействия. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2000;(8):34–36.  
Pavlenko M.V., Fedotov I.E. Kinetics of methane desorption from coal under the action of vibration. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2000;(8):34–36. (In Russ.)
10. Павленко М.В., Агарков А.В., Горбунов П.В. Вибрационное воздействие через скважину с дневной поверхности с целью увеличения проницаемости угольного массива. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2001;(1):40–43.  
Pavlenko M.V., Agarkov A.V., Gorbunov P.V. Vibration effect through a well from the daytime surface in order to increase the permeability of the coal massif. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2001;(1):40–43. (In Russ.)
11. Павленко М.В., Десятерик Н.И., Розгон В.Д. Вибрационное воздействие на низкопроницаемый угольный пласт с целью изменение его состояния. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2001;(8):24–26.  
Pavlenko M.V., Desyaterik N.I., Rozgon V.D. Vibration effect on a low-permeable coal seam in order to change its state. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2001;(8):24–26. (In Russ.)
12. Павленко М.В., Велесевич В.И. Исследование принципов возбуждения и движения жидкости в угольном пласте посредством вибрации. В кн.: *Geotehnika-Geotehcnics 2010: материалы 14-й Международ. симпозиума, Gliwice-Ustroń, Польша*; 2010. С. 169–174.
13. Павленко М.В., Воробьев А.Н. Определение собственных частот колебаний пласта (математическая модель). *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2010;(5):142–143. Режим доступа: [https://giab-online.ru/files/Data/2010/5/Vorobyev\\_5\\_2010.pdf](https://giab-online.ru/files/Data/2010/5/Vorobyev_5_2010.pdf) (дата обращения: 25.02.2024).  
Vorobev A.N., Pavlenko M.V. Definition of internal frequencies of seam vibrations (mathematical model). *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2010;(5):142–143. (In Russ.) Available at: [https://giab-online.ru/files/Data/2010/5/Vorobyev\\_5\\_2010.pdf](https://giab-online.ru/files/Data/2010/5/Vorobyev_5_2010.pdf) (accessed: 25.02.2024).

14. Hou P., Gao F., Ju Y., Cheng H., Gao Y., Xue Y., Yang Y. Changes in pore structure and permeability of low permeability coal under pulse gas fracturing. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016;34:1017–1026. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.08.015>
15. Bahr H.-A., Fischer G., Weiss H.-J. Thermal-shock crack patterns explained by single and multiple crack propagation. *Journal of Materials Science*. 1986;21(8):2716–2720. <https://doi.org/10.1007/BF00551478>
16. Баловцев С.В., Скопинцева О.В. Научно обоснованные технологические решения по снижению аэрологических рисков действующих и проектируемых угольных шахтах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(2):139–151. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_2\\_0\\_139](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_2_0_139)  
Balovtsev S.V., Skopintseva O.V. Science-based technological solutions for aerological risks reducing in operating and designing coal mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(2):139–151. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_2\\_0\\_139](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_2_0_139)
17. Павленко М.В., Мерзляков В.Г., Сеницкая Е.В., Флорова И.А., Адигамов Д.А. Роль вибрационного воздействия в трещинообразовании и газоотдаче из низкопроницаемого угольного пласта. *Уголь*. 2023;(5):37–40. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-5-37-40>  
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):37–40. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-5-37-40>
18. Сластунов С.В., Коликов К.С., Ермак Г.П., Ютяев Е.П. Решение проблемы безопасности угледобычи в долгосрочной программе развития отрасли. *Горный журнал*. 2015;(4):46–49. <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.04.08>  
Slastunov S.V., Kolikov K.S., Ermak G.P., Yutyayev E.P. Safety of coal mining in long-run development. *Gornyi Zhurnal*. 2015;(4):46–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.04.08>

**Информация об авторах**

**Павленко Михаил Васильевич** – кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: mihail\_mggy@mail.ru

**Сеницкая Елена Владимировна** – старший преподаватель, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: sinitskaya.ev@misis.ru

**Флорова Ирина Анатольевна** – старший преподаватель, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: florova.ia@misis.ru

**Сандакова Дарима Галсановна** – аспирант, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: dsandakova@inbox.ru

**Information about the authors**

**Michael V. Pavlenko** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: mihail\_mggy@mail.ru

**Elena V. Sinitskaya** – Senior Lecturer, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: sinitskaya.ev@misis.ru

**Irina A. Florova** – Senior Lecturer, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: florova.ia@misis.ru

**Darima G. Sandakova** – Postgraduate Student, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: dsandakova@inbox.ru

**Article info**

Received: 24.02.2024

Revised: 20.03.2024

Accepted: 25.03.2024

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 24.02.2024

Поступила после рецензирования: 20.03.2024

Принята к публикации: 25.03.2024