

Прогноз успешности обработки угольного массива при вибровоздействии в технологии подготовки угольного пласта и конечная метаноотдача из массива

М.В. Павленко✉, А.Э. Адигамаев, Е.В. Сеницкая, И.А. Флорова

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

✉ mihail_mggy@mail.ru

Резюме: Вибрационное воздействие является экологичным и эффективным методом в технологии повышения проницаемости газоносного угольного массива, где учитывается резонанс в угольном пласте при возбуждении вибрационных волн, что, в свою очередь, способствует стимулированию образования пор и трещин в углях с использованием волн колебаний, генерируемых низкочастотной вибрацией. Для изучения влияния частоты вибровоздействия, его резонансного эффекта на повышение трещиноватости угольного пласта, а также для изучения механизмов, лежащих в основе повышения проницаемости угля с использованием этого метода, в рамках исследований была оценена конечная метаноотдача из угольного массива.

Обзор литературы, лабораторные эксперименты и полевые испытания позволили авторам оценить механизм вибровоздействия на угольный массив. Цель проведенного исследования – дать оценку трещинообразования и метаноотдачи из угля. Вибрационная волна может увеличивать напряжение в угольном массиве в одних областях и уменьшать в других областях воздействия. Можно утверждать, что в дополнение к эффекту воздействия волн напряжения в угле при вибровоздействии даже небольшое пульсирующее давление приводит к тому, что создаёт лучший эффект трещинообразования в пласте, чем при обычном статическом давлении. Авторами высказаны предположения о влиянии вибрационных колебаний, возникающих на контакте виброизлучателя с угольным пластом, а именно предложено простое объяснение часто наблюдаемого эффекта увеличения трещинообразования от частоты вибровоздействия на газоносный угольный массив. Отмечено возникновение резонансной частоты в динамической системе «вибратор + угольный массив», при вибрационном воздействии приводящей к увеличению трещиноватости.

Применение вибраторов в горной промышленности в различном исполнении является не только одним из наиболее эффективных инструментов вибрационного воздействия на угольный массив, но благодаря ряду принципиальных преимуществ перед другими источниками воздействия на массив угля оно все чаще применяется как научный инструмент исследований.

Ключевые слова: угольный пласт, вибровоздействие, метаноотдача, массив угля, частота колебаний, газопроницаемость, трещиноватость, низкопроницаемый угольный пласт

Для цитирования: Павленко М.В., Адигамаев А.Э., Сеницкая Е.В., Флорова И.А. Прогноз успешности обработки угольного массива при вибровоздействии в технологии подготовки угольного пласта и конечная метаноотдача из массива. *Горная промышленность*. 2026;(1):130–134. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-1-130-134>

Forecasting successful coal seam mining when vibration impact is used for coal seam preparation and final methane recovery from the seam

M.V. Pavlenko ✉, A.E. Adigamov, E.V. Sinitskaya, I.A. Florova

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

✉ mihail_mggy@mail.ru

Abstract: Vibration treatment is an environmentally friendly and effective method to increase the permeability of a gas-bearing coal mass, which takes into account the resonance in the coal seam when the vibration waves are excited, which in turn helps stimulate formation of pores and fractures in coals using the waves generated by low-frequency vibration. The final methane recovery from the coal mass was evaluated as part of the research in order to study the effect of the vibration frequency and its resonant effect on enhancing the fracturing of the coal seam as well as to study the mechanisms underlying the increase in coal permeability using this method.

The mechanism of fracture formation and methane release from coal as the result of vibration impact on the coal mass was evaluated using literature review, laboratory experiments and field tests. Research shows that a vibration wave can increase stresses in some areas and decrease them in others. It can be stated that even a small pulsating pressure, combined with the effect of stress waves in the coal mass due to vibration, can lead to create a better fracturing effect in the formation than the

conventional static stress. Assumptions are made about the impact of vibrations taking place at the contact of the vibrator and the coal seam, namely, a simple explanation is proposed for the effect of the enhanced fracture formation due to the frequency of vibration often observed in a gas-bearing coal mass. The occurrence is noted of a resonant frequency in the "vibrator + coal seam" dynamic system leading to enhanced fracture formation.

Application of vibrators in various designs in the mining industry is not only one of the most efficient tools for vibration treatment of the coal masses, but is also becoming increasingly popular as a research tool due to a number of fundamental advantages over the other methods of coal preparation.

Keywords: coal seam, vibration effect, methane recovery, coal mass, vibration frequency, gas permeability, fracturing, low permeability coal seam

For citation: Pavlenko M.V., Adigamov A.E., Sinitskaya E.V., Florova I.A. Forecasting successful coal seam mining when vibration impact is used for coal seam preparation and final methane recovery from the seam. *Russian Mining Industry*. 2026;(1):130–134. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-1-130-134>

Введение

Актуальность и значительный вес в настоящее время приобретает проблема повышения коэффициента метаноотдачи в связи с вводом в эксплуатацию новых угольных шахт со сложными физическими и геологическими условиями, а также в связи с углублением горных работ для разрабатываемых угольных пластов в месторождениях такого типа. Интерес к этому предмету обусловлен необходимостью решения ряда проблем, среди которых особое место занимает проблема снятия газового барьера как в подготовительных выработках, так и в очистном забое при добыче угля [1].

Теоретический и физический анализ процессов, происходящих при метаноотдаче из низкопроницаемых угольных пластов, а также решение этой задачи безусловно требуют более детального подхода для обеспечения повышения коэффициента извлечения метана [1; 2].

Применение многочисленных и постоянно совершенствующихся методик увеличения метаноотдачи из угольных пластов не обеспечивает требуемого уровня снижения газообильности в горных выработках при эксплуатации угольных месторождений и это указывает на то, что достигнутый уровень значений коэффициента газоотдачи из угольного массива низок.

Постановка задачи получения оптимальной вибрационной частоты

Идея использования вибрационного воздействия на угольный массив появилась в связи с трудностями извлечения метана из низкопроницаемого угольного пласта. К тому времени мы уже знали кое-что о необычайно высокой чувствительности угольного массива к вибрационным воздействиям и изменению при этом его напряженного состояния [3; 4].

В природных условиях газовыделение из газоносных угольных пластов практически стабильно, т.е. все процессы преобразования строения угольного массива идут очень медленно, а в массопереносе преобладают диффузионные процессы. Проведенное вибровоздействие на угольный пласт изменяет динамику метановыделения из низкопроницаемого угольного массива.

Исследования газоотдачи из угля проводились в лабораторных условиях при атмосферном давлении, а проведенный эксперимент осуществлялся в диапазоне частот 0–100 Гц и амплитуде 0,1–3,9 мм с использованием вибрационной установки типа ВЭДС, техническая сторона которой характеризуется однокомпонентной гармонической вибрацией вертикальной направленности воздействия. Полученные результаты на виброустановке с использованием исследуемого газоносного угля явились основой для

теоретических предпосылок с целью дальнейшего выполнения экспериментов на шахтном поле.

При выполнении экспериментов на лабораторном стенде в процессе исследования установлено существование взаимосвязи между параметрами вибровоздействия (частота, амплитуда) и газовыделением, что позволяет прогнозировать успешность обработки угольного пласта и оптимизировать процесс их проведения в конкретных горных условиях. Результат оказался положительным: было обнаружено отчетливое влияние вибровоздействия на режим изменения газоотдачи из угля.

Как показал опыт, целесообразно применение вибрационного воздействия для увеличения метаноотдачи из угольного массива при определенных частотах [4; 5].

Тематическое исследование поставленной задачи

Повышение проницаемости угольного пласта для увеличения метаноотдачи из низкопроницаемого угольного пласта всегда было основным направлением исследований в области борьбы с газовыделениями в горные выработки [6; 7], а также разработки технологии дегазации угольного пласта и попутной добычи метана [8; 9].

Известно, что при изменении напряжения в угольном пласте наблюдается распад системы «уголь–метан» с переходом метана в свободную фазу, что возможно в динамических условиях [3; 5]. На экспериментальном стенде типа ВЭДС в процессе эксперимента установлена определенная область эффективного вибровоздействия на навеску угля в зависимости от соотношения частоты и амплитуды, которая обуславливает переход к состоянию, при котором происходит процесс разделения системы «уголь+метан». Для оптимального вибровоздействия необходима передача максимальной энергии вибрации на уголь, направленная на внутреннюю структуру системы «уголь+метан», её перестройку [9–13]. Именно в этом случае энергия вибровоздействия с максимальной эффективностью приводит к дестабилизации системы «уголь–метан», поскольку вся энергия, выделяющаяся при неупругих колебаниях, идет на создание трещиноватости и высвобождение метана из угольного массива.

Анализ характерных изменений данных метаноотдачи из угля с использованием вибровоздействия

Эксперимент проводился на навеске весом 50 г угля пласта «Бреевский», природная метаноносность которого составляет 20,9 м³/т. Код и марка угля: уголь шахты «Комсомолец» АО «Ленинскуголь» (марка угля Г, 2Г). Код, подгруппа, группа и марка по ГОСТ 25543–88 060421, табл. 1.

Можно предположить, что, учитывая физический смысл вибровоздействия, первая энергетическая зона вибраци-

Таблица 1
Характеристика
размолоспособности углей
пласта «Бреевский»

Table 1
Grinding characteristics of
coals from the Breyevsky
seam

Метод размолоспособности углей	Условное обозначение	Нормативный документ ГОСТ (ИСО)	Значение показателя
ВТИ, ед.	YRV TJ	15489–84	1,76
Хардгрова, ед.	НУJ	5074–80	54

онной волны при частоте вибрации 1–30 Гц и амплитуде 3,9–3,6 мм связана с относительно высокими амплитудами колебаний частиц угля на образец угля весом 50 г. При этом рост съёма метана при вибровоздействии в пересчёте на тонну исследуемого образца угля составил от 0,1 до 6,3 м³/т.

Во второй энергетической зоне вибровоздействия при частоте вибрации 30–40 Гц и амплитуде 3,6–2,1 мм наблюдается максимальное метановыделение при росте съёма метана из угольного массива 6,3–7,8 м³/т. Это изменение в метаноотдаче из образца угля возникает при участии вибровоздействия, идущего на разрушение трещиновато-блочной структуры угля.

В третьей энергетической зоне вибровоздействия при частоте вибрации в диапазоне 40–90 Гц и амплитуде 2,1–0,4 мм энергия вибровоздействия затухает – происходит исчерпание «зазоров» трещин и реализуется процесс согласованного движения системы «уголь–метан», съём метана из угля снижается и составляет 7,8–0,1 м³/т.

В процессе проведения лабораторных экспериментов вибрационного воздействия на образец угля в диапазоне низких частот 1–100 Гц наибольшая эффективность метаноотдачи из угля наблюдалась при частотах 30–40 Гц при амплитудах 3,6–2,1 мм. Это указывает на возникновение эффекта резонанса в системе «уголь+метан» [4; 5].

Можно утверждать, что в данном случае после вибровоздействия наблюдается максимальная метаноотдача из угольного массива и по прогнозным данным остаточная метаноносность обработанного угля снижается до уровня 1,5–2,5 м³/т, что обеспечивает безопасность по подготовке и разработке угольного газоносного пласта.

Испытываемый образец газоносного угля рассматриваем в проведённом эксперименте как небольшой угольный массив. Нами предположено, что при вибровоздействии в лабораторных условиях газосодержание из исследуемого образца угля и массива угольного пласта в реальных условиях качественно подобно и отличается только количественными параметрами.

Решение задачи метаноотдачи безусловно требует теоретического и практического анализа процессов, происходящих при вибровоздействии на продуктивные пласты низкопроницаемого угольного массива для дегазации массива и повышения коэффициента извлечения метана.

Поэтому практические исследования для изучения эффективной дегазации низкопроницаемого метаноносного угольного пласта с использованием нового метода вибровоздействия на массив невозможно решать без применения современных научных подходов и новых методов воздействия.

С точки зрения сложности оценки газоотдачи из угольного пласта с высоким содержанием метана и низкой газопроницаемостью в исследовании изучалось вибрационное воздействие на уголь с использованием стендового лабораторного эксперимента и полевых производственных ис-

пытаний [5; 7; 8]. Известно, что вибрационные волны могут увеличивать напряжение в одних областях и уменьшать в других областях угольного пласта, что приводит к появлению новых систем трещин в массиве [3; 5]. В дополнение к полученному эффекту вибровоздействия на угольный массив можно предположить, что это воздействие приводит к тому, что даже небольшое пульсирующее воздействие на угольный массив создает значительный эффект метаноотдачи. На основе исследований и полученных значений метаноотдачи при определенных частотах вибровоздействия была предложена технология подготовки низкопроницаемого угольного пласта для безопасной и эффективной его отработки [7; 8].

Проведенные экспериментальные исследования с образцами газоносного угля, а также исследования в производственных условиях являются доминирующими, хотя и реализуются методом проб и ошибок.

Эволюция появления новых систем трещин в низкопроницаемом угольном массиве при вибровоздействии ясна, особенно когда вынужденная частота вибрации совпадает с собственной частотой пласта, что вызывает явление резонанса.

Поэтому для увеличения проницаемости газоносных угольных пластов и повышения эффективности метаноотдачи из него в качестве нового метода воздействия предлагается вибрационное воздействие на пласт.

Оценки полученных параметров вибровоздействия на газонасыщенный уголь

Результаты показали, что раздробленный уголь обладает высокой начальной десорбционной способностью и при вибровоздействии снижается остаточное содержание метана до уровня 60–70% от начального объёма метаноносности угольного массива.

При оценке влияния вибрационного воздействия на систему «уголь–метан» можно предположить, что вибрационное воздействие в диапазоне низких частот 0–100 Гц на низкопроницаемый угольный пласт приведёт к поэтапному изменению состояния массива, что определит увеличение трещиноватости и увеличение метаноотдачи из угольного массива в зоне вибровоздействия [9].

Эффективность вибровоздействия на газоносный низкопроницаемый угольный массив достигается как через скважины с поверхности, так и из подземных скважин при рациональных режимах воздействия с учётом характеристик отработываемого угольного пласта и поставленных производственных задач по подготовке массива к эффективной отработке.

При этом скорость фильтрации метана по трещинам и порам в низкопроницаемом угольном массиве является важным свойством для дальнейшей добычи метана. Увеличение метаноотдачи при вибровоздействии служит прогнозным фактором для оценки проницаемости угольного массива как трещиновато-пористой среды, основанной на модели образования трещин в угле. Это отражается в опыте.

Достоинства и полная контролируемость процесса вибрационного воздействия на угольный массив по сравнению с другими воздействиями на угольный пласт очевидны, и оценка действительных возможностей вибровоздействия становится весьма актуальной [3; 5]. Существующая задача для использования вибрационного воздействия на низкопроницаемый угольный пласт [4; 8; 9] может рассматриваться как совокупность сосредоточенных масс и упругих элементов, а именно как динамиче-

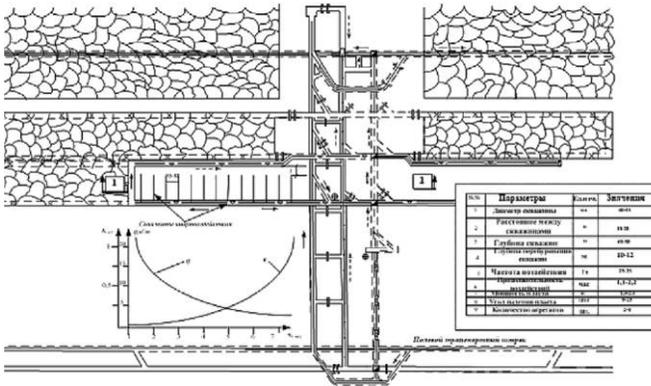


Рис. 1
Технологическая схема заблаговременной подготовки с использованием вибровоздействия на массив: на графике указана зависимость метаноотдачи от коэффициента трещиноватости угольного пласта на участке обработки

Fig.
A technological diagram of advance coal preparation using vibration treatment of the coal mass: the line graph shows the dependence of the methane recovery on the fracturing ratio of the coal seam in the treatment area

ская система (вибратор + угольный массив). Полученные результаты в целом приводят к тому, что при изучении эффекта вибровоздействия как на лабораторном стенде, так и с использованием полученных экспериментальных данных на производственном объекте позволяют оценивать параметры последней, что очевидно резко увеличивает предсказательную ценность такой модели (рис. 1).

Результаты экспериментов по вибровоздействию показывают, что вибрация влияет на образование новых систем трещин, изменяющих характеристики разрабатываемых угольных массивов. Вибровоздействие изменяет степень неоднородности, сложность и характер распределения пор в угле. Изменение характеристик угля при вибровоздействии в блоках указывает на то, что наблюдается увеличение концентрации трещин и пор в угле, что соответственно приводит к интенсивной метаноотдаче из угольного массива [5; 10; 11].

На участке вибровоздействия в пласте наблюдается разгруженная зона, зона повышенного дренирования газа, что связано с образованием повышенной трещиноватости и, как следствие, проницаемости, что приводит к увеличению дегазации пласта до уровня 60–70%, решается вопрос безопасности, а следовательно, и технологии подготовки низкопроницаемого газоносного угольного пласта, принимаются планировочные решения по предприятию: увеличивается длина выемочных столбов, увеличивается скорость подвигания забоя и нагрузка на очистной забой.

Заключение

При вибровоздействии на метаноносный уголь наблюдается интенсивное метановыделение, это связано с образованием новых систем трещин в низкопроницаемом угольном пласте, а также с внутрискелетными микро-разрушениями, оказывающими влияние на газоотдачу из угольного массива.

Список литературы / References

1. Рубан А.Д., Забурдюев В.С., Захаров В.Н. Coalbed methane: resources, extraction problems, disposal methods. *Наука и техника в газовой промышленности*. 2009;(3):49–57. Ruban A.D., Ziburduyev V.S., Zakharov V.N. Метан угольных пластов: ресурсы, проблемы извлечения, способы утилизации. *Science and Technology in the Gas Industry*. 2009;(3):49–57. (In Russ.)

Энергия вибровоздействия на низкопроницаемый угольный пласт идёт на создание дополнительных новых систем трещин в массиве. Этого воздействия на газоносный угольный массив достаточно для внесения существенных изменений в состояние системы «уголь–метан» с переходом метана в свободное состояние.

Оценивая сложную ситуацию обеспечения газоотдачи из угольного пласта с низкой проницаемостью и высоким содержанием метана, необходимо учитывать механизм формирования вибрационного воздействия на массив с использованием теоретических исследований, математического моделирования и результатами натурных испытаний [3–5]. Динамика взаимодействия вибрационного источника с угольным массивом, как показал эксперимент, свидетельствует о нелинейном характере метановыделения при этом воздействии из газоносного угольного массива [5].

Используя результаты моделирования, исследований в лабораторных условиях на образце угля и натурных экспериментов, мы анализируем влияние вибрационного воздействия на увеличение метановыделения, результатом которого явилось образование новых систем трещин в угольном массиве.

Результаты исследований показывают, что определенная частота вибровоздействия приводит к увеличению метаноотдачи из угля в случае, когда вибровоздействие осуществляется на низкопроницаемый угольный массив в диапазоне резонансных частот [5; 10; 11]. Главная трудность практического исследования вибровоздействия на угольный массив состоит в том, что в реальных условиях низкопроницаемые газоносные угольные пласты очень разнообразны по своим свойствам и представляют собой сложную неоднородную структуру. Динамика взаимодействия вибрационного источника с угольным пластом указывает на изменяющийся характер этого взаимодействия, отмечено наличие резонансной частоты воздействия в динамической системе «вибратор–угольный массив» [4; 5].

Фильтрационные процессы, происходящие в угольных низкопроницаемых угольных пластах при выполнении вибровоздействия на массив угля, отличаются чрезвычайной сложностью, поэтому при изучении метановыделения из угольного пласта выделяют теоретическое и экспериментальное направления исследований. Поэтому производственный эксперимент, выполненный в шахтных условиях, всегда выполняет двойственную роль: он служит прежде всего для определения некоторых замыкающих соотношений математической модели и проверки соответствия математической задачи реальному физическому процессу в натурных условиях. Поэтому проведенные исследования и полученные численные значения в процессе экспериментов по вибровоздействию позволяют предсказать ход его протекания и последствия физического влияния на метаноносный угольный пласт в реальных условиях.

Успешное выполнение вибрационного воздействия на угольный массив по снижению газоносности массива позволит уменьшить риск при принятии управленческих решений по безопасной и эффективной технологии отработки угольного пласта.

2. Рубан А.Д., Забурдяев В.С., Артемьев В.В. Особенности дегазации угольных пластов на шахтах с высокой производительностью очистных забоев. *Безопасность труда в промышленности*. 2009;(9):16–21. Режим доступа: <https://btpnadzor.ru/archive/1-1052> (дата обращения: 02.11.2025).
Ruban A.D., Zaburdyayev V.S., Artemiev V.V. Features of coal seam degassing in mines with high productivity of sewage treatment plants. *Occupational Safety in Industry*. 2009;(9):16–21. Available at: <https://btpnadzor.ru/archive/1-1052> (accessed: 02.11.2025).
3. 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>
Pavlenko M.V., Sinitzskaya 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>
4. 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., Sinitzskaya 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>
5. 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>
6. Премыслер Ю.С., Яновская М.Ф. Влияние микротрещиноватости угля на скорость десорбции из него метана. *Известия АН СССР. ОТН. Metallургия и топливо*. 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.)
7. 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., 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):8–11. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-4-8-11>
8. Васючков Ю.Ф., Павленко М.В. Подготовка низкопроницаемых угольных пластов к безопасной отработке на основе применения вибровоздействия. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2004;(8):310–312.
Vasyuchkov Yu.F., Pavlenko M.V. Preparation of low-permeability coal seams for safe mining based on the use of vibration. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2004;(8):310–312. (In Russ.)
9. 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*. 2021;(2-1):174–183. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-174-183>
Pavlenko M.V., Ivanov P.D. Degree of sensitivity of the coal mass to changes during vibration and technical solutions to increase methane reference from the formation. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(2-1):174–183. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-174-183>
10. 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>
11. Wei J., Ren Y., Wen Z., Zhang L., Jiang W. A new permeability model under the influence of low-frequency vibration on coal: Development and verification. *Transport in Porous Media*. 2022;145(3):761–787. <https://doi.org/10.1007/s11242-022-01874-5>
12. Клементьева И.Н., Кузиев Д.А. Выемочно-погрузочный драглайн с ковшом инновационной конструкции. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(7):149–157. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-07-0-149-157>
Klementyeva I.N., Kuziev D.A. Extracting-and-loading dragline with innovative design bucket. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(7):149–157. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-07-0-149-157>
13. Соловьев С.В., Кузиев Д.А. Исследование жесткостных параметров привода тягового механизма драглайна ЭШ-10/70. *Уголь*. 2017;(1):37–38.
Soloviev S.V., Kuziev D.A. Dragline ESH-10/70 linkage stiffness parameters study. *Ugol'*. 2017;(1):37–38. (In Russ.)

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

Адигамов Аркадий Энгелевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: arkad.adigamow@yandex.ru

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

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

Информация о статье

Поступила в редакцию: 22.10.2025

Поступила после рецензирования: 16.12.2025

Принята к публикации: 24.12.2025

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

Arkadiy E. Adigamov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, MISIS University of Science and Technology, Russian Federation, arkad.adigamow@yandex.ru

Elena V. Sinitzskaya – Senior Lecturer, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: sinitzskaya.ev@misiss.ru

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

Article info

Received: 22.10.2025

Revised: 16.12.2025

Accepted: 24.12.2025