

Экспериментально-аналитические основы взаимодействия нелинейных геомеханических и физико-химических массо-газообменных процессов в углепородных массивах

Кайсин Ван¹, Т.А. Киряева²✉

¹ Ляонинский инженерно-технический университет, г. Ляонин, Китайская Народная Республика

² Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация

✉ coalmetan@mail.ru

Резюме: Рассмотрены теоретико-экспериментальные основы количественной оценки взаимодействия нелинейных геомеханических и физико-химических процессов в напряженных угленосных массивах горных пород в натурных условиях ведения горных работ с повышенным сейсмическим риском от землетрясений и массовых технологических взрывов, а также влиянием температурного и структурного факторов. Дано описание лабораторных исследований Института горного дела СО РАН поршневого механизма процессов газообмена и массопереноса. Показано, что при определенном равномерно увеличивающемся значении давления нагружения при одноосном сжатии угольного образца поток газа через него начинает увеличиваться. Получены закономерности такого увеличения газовых потоков для семи различных газов, также получен гистерезисный вид изменения интенсивности потоков газов через разномарочные угольные образцы от циклично изменяющегося давления пресса.

Ключевые слова: геомеханика, нелинейные деформационно-волновые процессы, массивы горных пород, массо-газообменные процессы, очаговые зоны, катастрофические события, угольный образец, маятниковые волны, поршневой механизм, гистерезисный вид нагружения, газопроницаемость

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-17-00148, <https://rscf.ru/project/23-17-00148/>

Для цитирования: Ван К., Киряева Т.А. Экспериментально-аналитические основы взаимодействия нелинейных геомеханических и физико-химических массо-газообменных процессов в углепородных массивах. *Горная промышленность*. 2025;(4):157–164. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-157-164>

Experimental and analytical foundations of interaction between non-linear geomechanical and physiochemical mass-gas exchange processes in coal masses

Kaixing Wang¹, T.A. Kiryayeva²✉

¹ Liaoning Technical University, Liaoning, People's Republic of China

² N.A. Chinakal Institute of Mining of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

✉ coalmetan@mail.ru

Abstract: The theoretical and experimental foundations for quantitative assessment of the interaction between non-linear geomechanical and physiochemical processes are considered in stressed coal-bearing rock masses under natural mining conditions with an increased seismic risk from the earthquakes and large-scale technological blasts, as well as the influence of the temperature and the structural factors. A description is given of laboratory research into the piston mechanism of gas exchange and mass transfer processes that was performed by the Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. It is shown that at a certain uniformly increasing value of the loading pressure under uniaxial compression of a coal sample, the gas flow through it begins to increase. The patterns of such an increase in the gas flows for 7 different gases were obtained as well as a hysteresis view of the changes in the intensity of gas flows through samples of different coal grades depending on the cyclically changing press load.

Keywords: geomechanics, non-linear deformation-wave processes, rock masses, mass-gas exchange processes, focal zones of catastrophic events, coal sample, pendulum waves, piston mechanism, hysteretic type of loading, gas permeability

Acknowledgments: The study has been supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 23-17-00148, <https://rscf.ru/en/project/23-17-00148/>

For citation: Wang K., Kiryaeva T.A. Experimental and analytical foundations of interaction between non-linear geomechanical and physiochemical mass-gas exchange processes in coal masses. *Russian Mining Industry*. 2025;(4):157–164. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-157-164>

Введение

Роль горнодобывающего комплекса России в стратегии развития базообразующих энергетического, горно-металлургического и химико-технологического направлений в промышленности общеизвестна, равно как и необходимость обеспечения устойчивого их функционирования на длительную перспективу. Одной из тенденций развития горнодобывающей промышленности в мире является проведение горных работ на все более глубоких (часто более 1000 м) горизонтах. Развитие горных работ по освоению более глубоких горизонтов залегания полезных ископаемых нередко сопровождается ростом температур и уровня горного давления. Это сопряжено с возникновением катастрофических событий в виде горных ударов, внезапных выбросов породы, угля и газа, техногенных землетрясений, взрывов метана, подземных пожаров и проч., наносящих большой социально-экономический и экологический ущерб.

Исследования этих процессов, выполненные в Институте горного дела (ИГД) СО РАН [1], в общей своей совокупности направлены на углубление понимания физической сущности фундаментальных законов, лежащих в основе геомеханических и физико-химических процессов, определяющих эффективность и безопасность освоения угольных месторождений, а также на всестороннее изучение поршневого механизма процессов газообмена и массопереноса.

Современный научный задел для изучения взаимодействия нелинейных геомеханических и физико-химических массо-газообменных процессов в напряженных угленосных массивах горных пород

Глубина является комплексным отражением уровня напряженности горного массива, состояния и свойств самой окружающей породы, при этом начинают проявляться не изученные ранее нелинейные геомеханические свойства горных пород.

В последние годы в ИГД СО РАН разрабатываются теоретико-экспериментальные основы количественной оценки взаимодействия нелинейных геомеханических и физико-химических процессов в напряженных угленосных массивах горных пород в натурных условиях ведения горных работ с повышенным сейсмическим риском от землетрясений и массовых технологических взрывов, а также влиянием температурного и структурного факторов.

Проведен комплекс лабораторных исследований угольных образцов Кузбасса на одноосное жесткое сжатие до разрушения с привлечением геомеханических и физико-химических процессов (рис. 1).

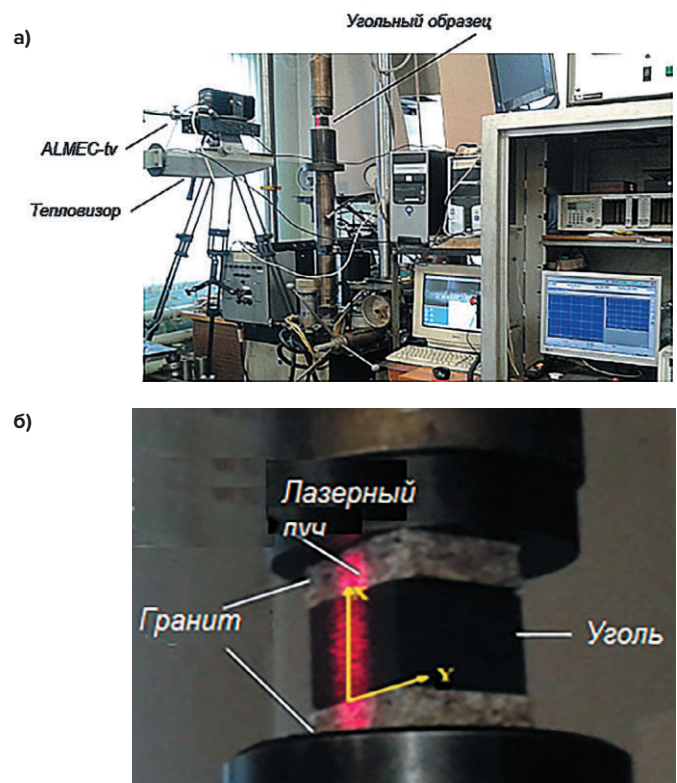


Рис. 1
Лабораторная установка (а) для исследования нелинейных упругих волн маятникового типа и кубический образец угля (б) марки К Березово-Бирюлинского месторождения (Кузбасс)

Fig. 1
A laboratory setup (a) for studying non-linear elastic waves of the pendulum type and a cubic sample of the K-Grade coal (b) from the Berezovo-Biryulinsky deposit (Kuzbass)

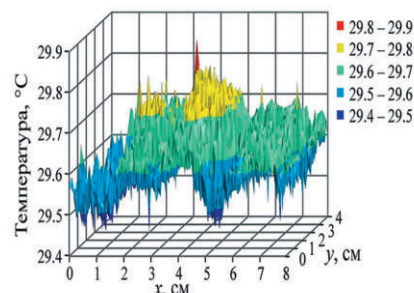


Рис. 2
Трехмерные диаграммы распределения: а – температуры в угле и граните перед видимым разрушением испытуемого угольного образца ($t = 240^\circ\text{C}$, $s = 12 \cdot 106 \text{ Па}$); б – распределение микродеформаций по сканируемой поверхности угольного образца при задаваемых прессом напряжениях непосредственно перед его разрушением

Fig. 2
3D distribution diagrams: а - temperature in coal and granite before visible failure of the tested coal sample ($t = 240^\circ\text{C}$, $s = 12 \cdot 106 \text{ Па}$); б - distribution of micro-deformations on the scanned surface of the coal sample at loads created by the press immediately before its failure

Получено подобие «осциллирующих» распределений для полей температур и деформаций (рис. 2), которое связано с внутренним строением испытываемых образцов угля различных стадий метаморфизма [2].

Получены снимки картирования поверхности образца угля в моменты достижения различных уровней нагружения. Сканированный анализ поверхности показал, что деформация неоднородна с самого начала нагружения образца [2]. Несмотря на то что заданным видом нагружения угольного образца является одноосное сжатие с постоянной скоростью перемещения траверсы пресса, тем не менее в пространственно-временном поле микродеформаций по сканируемым поверхностям присутствуют области как укорочения, так и удлинения. По мере повышения напряжения они видоизменяются, отражая осциллирующие движения структурных элементов материала в стесненных условиях.

Установлено, что практически с самого начала нагружения в угольных образцах возникают низкочастотные процессы внутреннего микродеформирования, отличающиеся низкочастотным диапазоном их колебаний (0,5–5 Гц), причем их амплитуда возрастает с увеличением уровня напряжений, а скорость около 1 м/с [3]. Это означает, что при увеличении давления на угольный образец структурные отдельности угольного вещества ведут себя как микроскопические «поршни», проталкивая газ (например, метан) через угольный образец. Этим и объясняется повышение газовыделения в угольных шахтах после землетрясений.

Таким образом, выполненные экспериментально-теоретические исследования позволили доказать, что существует детерминированная связь между нелинейными деформационно-волновыми процессами, индуцируемыми природно-техногенными землетрясениями и мощными технологическими взрывами в породных массивах, в виде пакетов нелинейных упругих волн маятникового типа «квазиметрового» скоростного диапазона, и модулируемыми ими режимами повышенной газодинамической активности угольных шахт Кузбасса. Низкоскоростные (квазиметрового скоростного диапазона) группы волн маятникового типа способны индуцировать повышенную «циклическую» газообильность в угольных шахтах.

Экспериментальный стенд для комплекса лабораторных исследований угольных образцов Кузбасса на одноосное жесткое сжатие до разрушения с привлечением геомеханических и физико-химических процессов

В основу обработки экспериментальных данных была положена теория взаимодействия геомеханических и массообменных процессов в нефтяных пластах, а затем и экспериментально обнаруженный поршневой механизм возникновения нелинейных массо-газообменных процессов при испытаниях угольных образцов различного марочного состава [2–12].

В созданном авторами статьи совместно с ИФП СО РАН стенде (рис. 3) для исследования «поршневого механизма» угольные образцы вклеивались в металлические модули для проведения испытаний на специальном гидравлическом прессе, а затем одноосно нагружались до состояния, близкого к разрушению. Для этого заранее экспериментально определено предельное давление нагружения угольных образцов разных стадий метаморфизма.

Размеры и топология трещин или пор угольного вещества принимаются фиксированными («застывшими») во



Рис. 3
Фотографии стенда для исследования «поршневого механизма»:
а – фотография пресса;
б – металлический модуль с угольным образцом внутри;
в – угольный образец, вклеенный в металлический модуль

Fig. 3
Photographic images of the test bench for studying the “piston mechanism”:
a - a photographic image of the press;
б - a metal module with a coal sample inside;
в - a coal sample glued into a metal module

времени. Но раскрытие и закрытие берегов трещин или пор в таких геосредах – процесс, осциллирующий с практически значимыми амплитудами и периодами. Это подтверждают и более ранние эксперименты [1; 13–20], и открытый позднее «поршневой» эффект [21], который заключается в том, что при увеличивающемся давлении нагружения угольного образца поток газа через него в некоторый момент времени начинает увеличиваться.

Вначале, при увеличении нагрузки пресса на угольный образец от нуля до давления около 6 МПа, поток газа через образец уменьшался с 85 мл/мин до 75 мл/мин, как и можно было бы предположить по логике сдавливания обычного материала (рис. 4).

Но затем (после достижения давления 6 МПа и далее) в

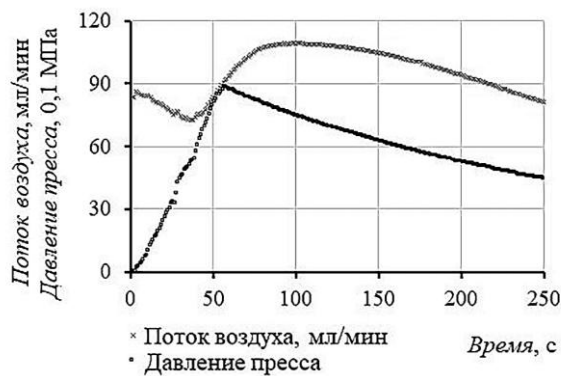


Рис. 4
Типичный график изменения потока воздуха через угольный образец и давления пресса от времени нагружения

Fig. 4
A typical graph of variations in the air flow through the coal sample and the press load depending on the loading time

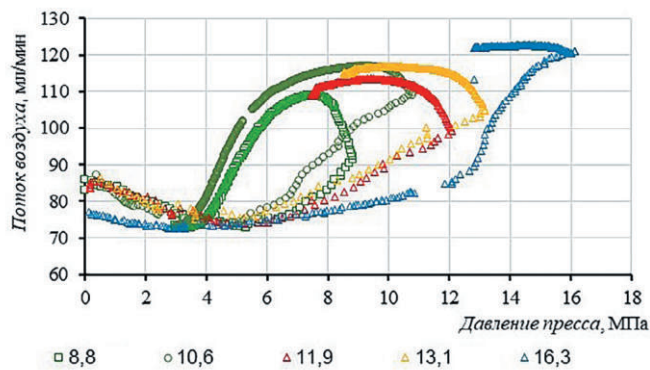


Рис. 5
Изменение газопроницаемости образцов природного угля при воздействии на них меняющегося механического давления

Fig. 5
Changes in the gas permeability of natural coal samples when exposed to varying mechanical pressure

результате «поршневого» эффекта в угольном образце поток газа через него начинал резко увеличиваться от 75 до 110 мл/мин. При нормировании потока воздуха, прошедшего через угольный образец, на давление пресса получены зависимости, показывающие, что на некотором промежутке времени при увеличении давления нагружения поток проходящего через угольный образец воздуха также возрастает. После прекращения нагрузки пресса на угольный образец давление пресса «самопроизвольно» падало, поток газа через угольный образец через некоторый промежуток времени возвращался к первоначальному уровню, наблюдался «эффект гистерезиса» (рис. 5).

Эксперименты по определению зависимостей потока газа через один и тот же угольный образец №1 марки Ж с $V_{daf} = 31\%$ от давления пресса были проведены при различных максимальных давлениях нагружения от пресса (с 8,8 до 16,3 МПа), без доведения угольного образца до его разрушения. Гистерезисный вид изменения интенсивности потоков газов через разномарочные угольные образцы от циклично изменяющегося давления пресса количественно демонстрирует большую роль «поршневого механизма» в развитии массо-газообменных процессов в массивах горных пород от источников различного вида

механического их возбуждения, индуцирующего нелинейные упругие волны маятникового типа.

Пропускание различных газов через угольные образцы

Вначале через угольный образец пропускался воздух и проводили измерения интенсивности его потока до и во время нагружения образца. Затем аналогичные измерения осуществлялись с водородом H_2 , гелием He , метаном CH_4 , углекислым газом CO_2 , угарным газом CO . После пропускания обозначенных газов в завершение повторно пропускался воздух при нагружении испытуемого угольного образца. Во всех угольных образцах при пропускании через них обозначенных газов проявляется действие «поршневого» эффекта. Аналогичные результаты получены для других угольных образцов шахт Кузбасса.

Влияние химического состава газов на их проницаемость в углепородных массивах и их геоматериалах

В обозначенных выше условиях газопроницаемость испытуемых геоматериалов, как ожидалось нами, должна была зависеть и от соотношения размеров молекул газов с размерами каналов их проницаемости. Были проведены измерения расхода газа при постоянном его входном давлении для двух образцов (табл. 1) природного угля с разных шахт Кузбасса, помещённых герметично в измерительную ячейку.

Измерения проводились последовательно для всех указанных ниже газов при входном давлении $5 \cdot 10^{-3}$ МПа. Усреднённые результаты выполненных экспериментов представлены в табл. 2.

Таблица 1
Показатели качества углей

Table 1
Indicators of the coal grades

№ угольного образца	Марка угля	Зольность, %	Выход летучих веществ, %	Влажность, %	Объёмный вес, 103 кг/м³
2	ГЖ	5,4	37,2	3,6	1,27
3	Ж	6,8	38,1	2,2	1,28

Таблица 2
Объёмный расход газов при одинаковом входном давлении $5 \cdot 10^{-3}$ МПа

Table 2
Volumetric gas flow rate at the same inlet pressure of $5 \cdot 10^{-3}$ МПа

Газ	Расход, мл/мин, угольный образец №2	Расход, мл/мин, угольный образец №3
Воздух сухой	138,6	212,5
Метан CH_4	149,8	216,5
Водород H_2	133,6	196,1
Двуокись углерода CO_2	141,6	214,5
Окись углерода CO	134,5	210,2
Гелий He	126,7	192,8
Воздух сухой*	133,8	207,4

Примечание. * – Осуществлено повторно – по завершении испытаний обозначенных здесь газов.
Note. * - Performed repeatedly - upon completion of tests of the gases indicated here.

Как следует из табл. 2, объемный расход обозначенных в ней газов при их пропускании через испытываемые угольные образцы №2 и №3 с входным давлением $5 \cdot 10^{-3}$ МПа и в соответствии с их химической спецификацией можно представить в виде соответствующих этим образцам упорядоченных рядов «проницаемости»:

для образца №2 –

He [126,7] < H₂ [133,6] < CO [134,5] < Воздух [138,6] < CO₂ [146,6] < CH₄ [189,8];

для образца №3 –

He [192,8] < H₂ [196,1] < CO [210,2] < Воздух [212,5] < CO₂ [214,5] < CH₄ [216,8].

Сравнение этих рядов показывает для них полную идентичность как по структуре химической спецификации их членов, так и по порядку следования в направлении роста уровней «проницаемости» испытываемых газов. Однако проявляется довольно неожиданное свойство: чем больше обозначенных атомов в молекулах испытываемых газов, тем выше уровень их «проницаемости». Вероятно, необходимо учитывать уровень межмолекулярного силового взаимодействия между молекулами испытываемых газов и молекулами угольного вещества.

Газоносность угольных отложений, газообильность горных выработок и газодинамические явления в угольных шахтах в большой мере зависят как от вида напряженно-деформированного состояния (НДС), так и от коллекторских свойств углей и вмещающих пород. Газоносность угольных пластов определяется объемом и распределением пор и трещин, способностью тонких пор сорбировать газ; газообильность выработок и газодинамические явления в угольных шахтах, помимо вида НДС, зависят от формы пор и ориентации трещин, а также топологической связи между ними [2; 3; 5–37].

В Институте катализа СО РАН на 19 образцах природных углей Кузбасса определялись распределения объема пор по их характерным эффективным размерам методом ртутной порометрии. Измерение порогрaмм вдавливания ртути проводили на приборе AutoPore IV 9500 (Micromeritics Instrument Corporation, США) в области давлений 0,10 – 60 000,00 psia (0,007 – 4300 атм). Измерение объема вдавленной ртути V в зависимости от внешнего давления P позволило определить распределение объема пор по их характерным эффективным размерам. По результатам измерений к «реальным порам» внутри частиц угля относят поры размером меньше 1000 нм. Для адсорбции газов и паров основное значение имеют микропоры, определяющие удельную поверхность угля. Они имеют диаметр «входного отверстия» 0,5–0,7 нм, соизмеримый с диаметром молекул многих газов, поэтому их еще называют молекулярными порами. Например, эффективные диаметры молекул газов, использованных в описанных выше экспериментах, имеют следующие размеры (табл. 3).

Для изучения распределения радиусов пор различных углей в работе [25] использовали изотермы адсорбции азота, а для анализа распределения пор больших радиусов – ртутный пористометр. Несмотря на то что распределение пор для обозначенных четырех типов «угля» изменяется в пределах практически всего диапазона радиусов пор, тем не менее существенное различие для разных типов угля наблюдается лишь для пор с радиусом меньше 1 нм. Применительно к изучаемому нами «поршневому механизму» важно, чтобы размеры угольных пор были соизмеримы

Таблица 3
Эффективные диаметры
молекул некоторых газов

Table 3
Effective molecule diameters
of some gases

Газ	D, нм
Водород H ₂	0,275
Гелий He	0,218
Углекислый газ CO ₂	0,465
Метан CH ₄	0,416
Воздух	0,374

Источник: [22]. Режим доступа: <https://chem21.info/page/185076109216083174213107214054212091058034166219/> (дата обращения: 28.04.2025).

Source: [22]. Available at: <https://chem21.info/page/185076109216083174213107214054212091058034166219/> (accessed: 28.04.2025).

с эффективными диаметрами молекул проходящих через них газов. Диаметр молекул исследуемых нами газов менее 1 нм (см. табл. 3).

Полученные научные результаты по изучению «поршневого механизма» имеют непосредственное отношение и к описанию аналогичных процессов в целом для месторождений «углеводородного ряда»: нефтегазовым, угольным, горючих сланцев и др. Уголь из нефти имеет весьма малый объем пор с радиусом более 1 нм. В обугленной смоле приблизительно 1/3 от общего объема пор составляют поры с радиусом менее 1 нм, тогда как остальные 2/3 объема составляют поры с радиусом от 7 до 12 нм. Объем пор древесного угля имеет более однородное распределение – приблизительно 90% его принадлежит порам с радиусами от 1 до 200 нм, а остальные 10% принадлежат порам с радиусами менее 1 нм. Отмеченное выше свидетельствует с очевидностью, что «осциллирующее» движение берегов трещин в соответствии с диаметрами структурных неоднородностей в маятниковом режиме способно качественно изменять «механизмы» проницаемости углеводородного геовещества согласно изменяющимся отношениям диаметров молекул жидкостей и газов к раскрывающимся или закрывающимся внутренним дефектам геоматериалов.

Выводы

На основе описанного выше и ранее проведенного комплекса лабораторных исследований по более детальному изучению недавно открытого «поршневого механизма» возникновения массо-газообменных процессов в угольных образцах появились экспериментально-аналитические основания для установления детерминированной взаимосвязи параметров нелинейных геомеханических, физико-химических и сорбционных процессов в угольных пластах, при наличии которых создаются реальные условия для возникновения выбросов угля и газа, подземных пожаров.

Поры и трещины действительно существенно влияют на газопроницаемость угольных пластов. Но, как оказывается, они не являются «фиксированными» во времени и пространстве, а способны изменяться в пространстве и времени «осциллирующим» образом. Это обусловлено «модулирующим началом» индукции нелинейных деформационно-волновых процессов при распространении пакетов нелинейных упругих волн маятникового типа от динамических источников разного вида (взрывы, зем-

летрясения, горные удары, внезапные выбросы угля и газа, вибровоздействие и др.).

Для аналитического описания такой «модуляции» чл.-корр. В.Н. Опариным предложен оператор соответствующей им связи Ω . Механическая «модуляция» при этом осуществляется путем изменения во времени параметров, характеризующих внутреннюю структуру геовещества, через «поршневой механизм» осциллирующего движения и изменения поверхностей объема пор и трещин, коэффициент их топологической связности [8–12; 26–37]. В операторе используются функциональные зависимости для скорости распространения маятниковых волн. Решение поставленной задачи по установлению непосредственных количественных связей между деформационно-волновыми и физико-химическими процессами, таким образом, свелось к поиску калибровочных коэффициентов для этого оператора.

Необходимые для расчетов феноменологические зависимости устанавливались на основе данных микро-наноструктурного анализа особенностей строения и фазового состояния угольного вещества различного марочного состава с применением рентгенофазового анализа и масс-спектропии в режиме *in situ*, а также корреляционного анализа натурных данных о геомеханических свойствах угленосных толщ Кузбасса [3; 31–37].

Список литературы / References

1. Опарин В.Н., Киряева Т.А., Потапов В.П., Юшкин В.Ф. *Новые методы и информационные технологии в экспериментальной геомеханике*. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2021. 292 с.
2. Oparin V.N., Kiryaeva T.A., Usoltseva O.M., Tsoi P.A., Semenov V.N. Nonlinear deformation – wave processes in various rank coal specimens loaded to failure under varied temperature. *Journal of Mining Science*. 2015;51(4):641–658. <https://doi.org/10.1134/S1062739115040003>
3. Опарин В.Н., Киряева Т.А., Качурин Н.М., Юшкин В.Ф. Взаимодействия нелинейных геомеханических и газообменных процессов при отработке месторождений углеводородного ряда. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2023;(3):521–543. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2023-3-1-521-543>
Oparin V.N., Kiryaeva T.A., Kachurin A.N., Yushkin V.F. Interactions of nonlinear geomechanical and gas exchange processes during exhaustment hydrocarbon fields. *Izvestiya Tulkogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2023;(3):521–543. (In Russ.) <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2023-3-1-521-543>
4. Oparin V.N., Adushkin V.V., Kiryaeva T.A., Potapov V.P., Cherepov A.A., Tyukhrin V.G., Glumov A.V. Effect of pendulum waves from earthquakes on gas-dynamic behavior of coal seams in Kuzbass. *Journal of Mining Science*. 2018;54(1):1–12. <https://doi.org/10.1134/S1062739118013269>
5. Kurlenya M.V., Oparin V.N., Vostrikov V.I. Pendulum-type waves. Part I: State of the problem and measuring instrument and computer complexes. *Journal of Mining Science*. 1996;32(3):159–163. <https://doi.org/10.1007/BF02046583>
6. Kurlenya M.V., Oparin V.N., Vostrikov V.I. Pendulum-type waves. Part II: Experimental methods and main results of physical modeling. *Journal of Mining Science*. 1996;32(4):245–273. <https://doi.org/10.1007/BF02046215>
7. Kurlenya M.V., Oparin V.N., Vostrikov V.I., Arshavskii V.V., Mamadaliev N. Pendulum waves. Part III: Data of on-site observations. *Journal of Mining Science*. 1996;32(5):341–261. <https://doi.org/10.1007/BF02046155>
8. Oparin V.N. Theoretical fundamentals to describe interaction of geomechanical and physicochemical processes in coal seams. *Journal of Mining Science*. 2017;53(2):201–215. <https://doi.org/10.1134/S1062739117022031>
9. Adushkin V.V., Oparin V.N. From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed geomeidia. Part I. *Journal of Mining Science*. 2012;48(2):203–222. <https://doi.org/10.1134/S1062739148020013>
10. Adushkin V.V., Oparin V.N. From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed geomeidia. Part II. *Journal of Mining Science*. 2013;49(2):175–209. <https://doi.org/10.1134/S1062739149020019>
11. Adushkin V.V., Oparin V.N. From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed geomeidia. Part III. *Journal of Mining Science*. 2014;50(4):623–645. <https://doi.org/10.1134/S1062739114040024>
12. Adushkin V.V., Oparin V.N. From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed geomeidia. Part IV. *Journal of Mining Science*. 2016;52(1):1–35. <https://doi.org/10.1134/S106273911601009X>
13. Wang K., Pan Y., Dou L., Oparin V.N. Study on recognition of pendulum-type wave propagation in block rock mass. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*. 2018;21(2):95–110.

14. Wang K.X., Aleksandrova N.I., Pan Y.S., Oparin V.N., Dou L.M., Chanyshv A.I. Effect of block medium parameters on energy dissipation. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2019;60(5):926–934. <https://doi.org/10.1134/S0021894419050171>
15. Oparin V.N. Pendulum waves and basics of “geomechanical thermodynamics”. *Geohazard Mechanics*. 2023;1(1):38–52. <https://doi.org/10.1016/j.ghm.2022.12.001>
16. Oparin V.N., Karpov V.N., Timonin V.V., Konurin A.I. Evaluation of the energy efficiency of rotary percussive drilling using dimensionless energy index. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022;14(5):1486–1500. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.12.021>
17. Ивашин В.В. (ред.) *Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях*. Новосибирск: Наука; 2010. 404 с.
18. Kurlenya M.V., Oparin V.N., Vostrikov V.I. Anomalously low friction in block media. *Journal of Mining Science*. 1997;33(1):1–11. <https://doi.org/10.1007/BF02765421>
19. Kurlenya M.V., Oparin V.N., Vostrikov V.I. Geomechanical conditions for quasi-resonances in geomaterials and block media. *Journal of Mining Science*. 1998;34(5):379–386. <https://doi.org/10.1007/BF02550693>
20. Vostrikov V.I., Oparin V.N., Chervov V.V. On some features of solid-body motion under combined vibrowave and static actions. *Journal of Mining Science*. 2000;36(6):523–528. <https://doi.org/10.1023/A:1016618112261>
21. Kiryaeva T.A. Piston mechanism of interaction of non-linear geomechanical and physicochemical gas exchange and mass transfer processes in coal-bearing rocks. *Geohazard Mechanics*. 2023;1(2):110–118. <https://doi.org/10.1016/j.ghm.2023.03.002>
22. Майссел Л., Глэнг Р. (ред.) *Технология тонких пленок (справочник)*. М.: Советское радио; 1977. Т. 1. 664 с.
23. Малышев Ю.Н., Трубецкой К.Н., Айруни А.Т. *Фундаментально прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов*. М.: Изд-во Акад. горн. наук; 2000. 519 с.
24. Everett D.H. Manual of symbols and terminology for physicochemical quantities and units. Appendix II: Definitions, terminology and symbols in colloid and surface chemistry. *Pure and Applied Chemistry*. 1972;31(4):577–638. <https://doi.org/10.1351/pac197231040577>
25. Рубин А. (ред.) *Химия промышленных сточных вод*. М.: Химия; 1983. 360 с.
26. Опарин В.Н., Адушкин В.В., Востриков В.И., Усольцева О.М., Мулев С.Н., Юшкин В.Ф. и др. Развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геотомографии. Часть I: Формулировка и обоснование задачи исследований. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(1):5–25. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-01-0-5-25>
Oparin V.N.1, Adushkin V.V.1, Vostrikov V.I.1, Usol'tseva O.M.1, Mulev S.N.2, Yushkin V.F. et al. An experimental and theoretical framework of nonlinear geotomography. Part I: Research problem statement and justification. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(1):5–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-01-0-5-25>
27. Опарин В.Н., Адушкин В.В., Востриков В.И., Юшкин В.Ф., Киряева Т.А. Развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геотомографии. Часть II: Динамико-кинематические характеристики волн маятникового типа в напряженных геосредах и сейсмо-эмиссионные процессы. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(11):5–26. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-11-0-5-26>
Oparin V.N., Adushkin V.V., Vostrikov V.I., Yushkin V.F., Kiryaeva T.A. Experimental and theoretical framework of nonlinear geotomography. Part II: Dynamic and kinematic characteristics of pendulum waves in high-stress geomedia and processes of seismic emission. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(11):5–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-11-0-5-26>
28. Опарин В.Н., Адушкин В.В., Востриков В.И., Юшкин В.Ф., Киряева Т.А. Развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геотомографии. Часть III: Перспективные системы контроля деформационно-волновых процессов в подземных и наземных условиях ведения горных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(12):5–29. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-12-05-29>
Oparin V.N., Adushkin V.V., Vostrikov V.I., Yushkin V.F., Kiryaeva T.A. Experimental and theoretical framework of nonlinear tomography. Part III: Promising systems to control deformation and wave processes in surface and underground mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(12):5–29. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-12-05-29>
29. Мельников Н.Н. (ред.) *Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах*. Новосибирск: Изд-во Сибирского отд-ния Российской акад. наук, 2018. Т. 1. 549 с.
30. Мельников Н.Н. (ред.) *Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах*. Новосибирск: Изд-во Сибирского отд-ния Российской акад. наук, 2019. Т. 2. 545 с.
31. Kiryaeva T.A. *Methods of energy analysis and prediction of gas-dynamics in coal-and-methane coal seams in Kuzbass*. Riga: LAPLAMBERT Academic Publishing; 2019. 332 p.

32. Oparin V.N., Kiryaeva T.A., Gavrilov V.Yu., Shutilov R.A., Kovchavtsev A.P., Tanaino A.S. et al. Interaction of geomechanical and physicochemical processes in Kuzbass coal. *Journal of Mining Science*. 2014;50(2):191–214. <https://doi.org/10.1134/S106273911402001X>
33. Киряева Т.А., Опарин В.Н., Яценко Д.А. Микро-наноструктурный анализ особенностей в строении угольного вещества в зависимости от стадий его метаморфизма. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(5):5–23. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_5_0_5
Kiryaeva T.A., Oparin V.N., Yatsenko D.A. Micro and nano structure analysis of coal substance versus coal ranks. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(5):5–23. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_5_0_5
34. Oparin V.N., Kiryaeva T.A. Operator of connection between the Langmuir equation and oparin's kinematic equation for pendulum-type waves. Part I. In: Solovev D.B., Savaley V.V., Bekker A.T., Petukhov V.I. (eds) *Proceeding of the International Science and Technology Conference "FarEastCon 2021". Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol 275. Singapore: Springer; 2022, pp. 1–13. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8829-4_1
35. Oparin V.N., Kiryaeva T.A. Operator of connection between the Langmuir equation and oparin's kinematic equation for pendulum-type waves. Part II. In: Solovev D.B., Savaley V.V., Bekker A.T., Petukhov V.I. (eds) *Proceeding of the International Science and Technology Conference "FarEastCon 2021". Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol 275. Singapore: Springer; 2022, pp. 15–29. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8829-4_2
36. Oparin V.N., Kiryaeva T.A. Operator of connection between the Langmuir equation and oparin's kinematic equation for pendulum-type waves. Part III. In: Solovev D.B., Savaley V.V., Bekker A.T., Petukhov V.I. (eds) *Proceeding of the International Science and Technology Conference "FarEastCon 2021". Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol 275. Singapore: Springer; 2022, pp. 31–43. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8829-4_3
37. Опарин В.Н., Качурин Н.М., Киряева Т.А., Потапов В.П. О проблеме разработки экспериментально-аналитических основ теории взаимодействия геомеханических и физико-химических газообменных процессов при отработке угольных месторождений. *Науки о Земле*. 2023;(3):503–521. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2023-3-1-503-521>
Oparin V.N., Kachurin N.M., Kiryaeva T.A., Potapov V.P. On the problem of developing the experimental and analytical foundations of the theory of interaction of geomechanical and physical and chemical processes during the mining of coal deposits. *Izvestiya Tulkogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2023;(3):503–521. (In Russ.) <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2023-3-1-503-521>

Информация об авторах

Ван Кайсин – доктор технических наук, профессор, Ляонинский инженерно-технический университет, г. Ляонин, Китайская Народная Республика; <https://orcid.org/0000-0001-8907-3342>; e-mail: kaixing_wang@163.com

Татьяна Анатольевна Киряева – доктор технических наук, зав. отделом экспериментальной геомеханики, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-4159-9198>; e-mail: coalmetan@mail.ru

Information about the authors

Kaixing Wang – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Liaoning Technical University, Liaoning, People's Republic of China; <https://orcid.org/0000-0001-8907-3342>; e-mail: kaixing_wang@163.com

Tatiana A. Kiryaeva – Dr. Sci. (Eng.), Head of the Experimental Geomechanics Department, N.A. Chinal Institute of Mining of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-4159-9198>; e-mail: coalmetan@mail.ru

Article info

Received: 06.05.2025

Revised: 05.06.2025

Accepted: 23.06.2025

Информация о статье

Поступила в редакцию: 06.05.2025

Поступила после рецензирования: 05.06.2025

Принята к публикации: 23.06.2025