

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.272.6 + 622.831

К ТЕОРЕТИЧЕСКИМ ОСНОВАМ ОПИСАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ

В. Н. Опарин

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: oparin@misd.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Для теоретического описания взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами в многофазных угольных пластах при их разработке впервые дается доказательство существования аналитического “операторного продолжения”, связывающего между собой уравнение Ленгмюра и кинематическое уравнение для волн маятникового типа в напряженных геосредах блочно-иерархического строения.

Теоретические основы, угольные месторождения, “поршневой механизм” протекания массогазообменных процессов, геомеханика, физико-химия, уравнение Ленгмюра и кинематическое выражение для волн маятникового типа, операторное продолжение

Развитие теоретических основ для описания массо-газообменных процессов в многофазных геосредах со сложным структурным строением в изменяющихся полях горного давления и температур имеет важное значение не только для прогнозирования катастрофических событий при освоении месторождений полезных ископаемых по различным их видам (техногенные землетрясения, горные удары, внезапные выбросы угля, породы и газа, подземные пожары и т. д.), но и для совершенствования существующих и разработки новых энергоэффективных, в достаточной мере безопасных и экологически приемлемых технологий ведения горных работ и недропользования в целом.

Типичными представителями такого рода геосред являются месторождения “углеводородного ряда”: угольные различной стадии метаморфизма, нефтегазовые и газоконденсатные, горючих сланцев и др. В этом отношении роль высококачественных углей Кузбасса достаточно уникальна: они используются как высококачественное химико-энергетическое сырье, при добыче которого попутно можно извлекать метан из угольных пластов не только с целью профилактики газодинамических проявлений, но и в промышленных целях.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-05-00573а) и ОНЗ РАН (проект ОНЗ РАН-3.1).

Таким образом, разработка феноменологических основ и теоретических методов описания сложных процессов взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами при отработке угольных пластов различной стадии метаморфизма требует особого внимания исследователей. Это важно еще и потому, что развитие нелинейных геомеханических процессов, как показано в [1–4], способно генерировать сорбционный метан за счет релаксационного механизма деформирования молекулярной структуры угля в весьма значительных объемах: путем отщепления от алифатической бахромы атомов метильной группы и водорода и объединения их в молекулы метана, вступающие в сорбционную связь с углем. В [1, 2] это показано на примере действия сил горного давления в квазистатическом приближении.

Ранее в [3, 4] возможность существования такого процесса генерации молекул метана отмечалась для динамического деформирования угольного вещества при внезапных выбросах угля и газа в шахтах. В этой связи особо отметим работу Р. Л. Мюллера [3], появившуюся еще в начале 50-х годов XX в., где шла речь о механо-химических преобразованиях в процессах деструкции угленосных массивов. В 70–80-х годах это направление исследований, но уже в более широком аспекте, оформилось в такую научную дисциплину, как механохимия [5].

В настоящее время отсутствуют в необходимом объеме теоретические исследования, позволяющие давать количественные оценки реальным запасам свободного и сорбированного метана в угольных месторождениях и осуществлять верификацию выдвигаемых гипотез о его генерации [1]. В равной мере это относится и к другим “органогенно насыщенным пластам”, в том числе к сланцевым месторождениям горючих полезных ископаемых, “тяжелой нефти”.

Однако разработка и внедрение в промышленность высокоэффективных и безопасных технологий добычи угля и шахтного метана, особенно на больших глубинах, связаны как с конкретными формами существования метана в угольных (органогенно насыщенных) пластах, так и массо-газообменными процессами, в которые они включены за счет развития геомеханических процессов, индуцируемых техногенными воздействиями. К настоящему времени опубликовано немало работ, посвященных различным аспектам и свойствам газонасыщенного угля [6–11; и др.]. Активно развиваются и механико-математические методы для описания фильтрационных процессов в многофазных геосредах со структурой для прогнозирования эволюции напряженно-деформированного состояния, проницаемости трещинно-пористого геовещества продуктивного пласта для жидкостей и газов в изменяющихся полях напряжений, деформаций и температур от различных источников возмущения. В значительной мере они ориентированы на оценку дебета воды, нефти и газа при бурении скважин или проходке выработок, а также объема запасов соответствующих полезных ископаемых [12–16].

Отмеченный цикл экспериментальных и теоретических исследований условно можно отнести к “квазистатическому направлению”, где матричная структура геовещества и ее топологические особенности либо фиксированы во времени, либо слабо изменяются (в линейно-упругом приближении) за счет влияния напряженно-деформированного состояния массивов горных пород, вмещающих продуктивные пласты. В таком случае для описания процессов миграции содержащихся в твердой матрице жидкостей и газов по системе пор и трещин принимаются упрощающие гипотезы, позволяющие в рамках континуальных моделей механики сплошной среды использовать численные решения соответствующих систем дифференциальных и/или интегральных уравнений с заданными начальными и граничными условиями, учитывающими в том числе и характер (вид) источников возмущения. По сути, такой переход позволяет описывать сложный эволюционный процесс тепло-массогазообмена, в котором реальная структура и фазовый состав геоматериалов заменяются “эффективными” их характеристиками по проницаемости, теплопроводности, упругим модулям и др.

Такое структурное “обезличивание” (осреднение) реальных свойств геовещества нередко приводит к утрате способности в рамках соответствующих подходов описывать реально наблюдаемые физико-механические эффекты в массивах горных пород при осуществлении технологических операций по управлению свойствами и добыче полезных ископаемых углеводородного сырья. В качестве важных примеров можно привести особенности “нелинейной реакции” продуктивных толщ углеводородов на землетрясения, мощные технологические взрывы и вибровоздействия с поверхности Земли [17–19], где значительной становится механическая роль нелинейных упругих волн маятникового типа в напряженных геосредах блочно-иерархического строения. Осциллирующий режим движения их материальных носителей — конкретных по размеру структурных элементов массивов горных пород в стесненных условиях — приводит к тому, что амплитудно-периодный спектр сейсмоакустического фона при определенном уровне горного давления (и вида напряженно-деформированного состояния породного массива) начинает существенно влиять на исходную структуру геовещества [17–19] за счет квазирезонансного механизма трансформации потенциальной упругой энергии в кинетическую энергию движения его структурных элементов [18].

Развитию основ теории распространения упругих волн во флюидонасыщенных пористых средах существенный импульс дали работы М. Био [20]. Однако с тех пор (50-е годы XX в.) не было значимых попыток “автономизировать” движение структурных отдельностей геоматериалов с наличием в их трещинно-поровом пространстве многофазового заполнителя (газ, жидкость, мелкие твердотельные фракции) при теоретическом анализе динамико-кинематических характеристик регистрируемых в натуральных условиях широкополосного диапазона по амплитудам и частоте сейсмических волн.

С открытием явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия, а затем и сопряженных с ним нелинейных упругих волн маятникового типа [21–23] положено начало механико-математическому моделированию динамико-кинематических характеристик этой группы волн, обладающих существенными отличиями от линейных продольных и поперечных упругих волн [24–30]. *Этот цикл экспериментальных и теоретических исследований условно можно отнести к “динамическому направлению”, где матричная структура геовещества и ее топологические особенности (существенно влияющие на флюидогазопроницаемость!) уже не являются фиксированными, но способны изменяться во времени и пространстве “осциллирующим образом”.* Это является следствием энергетических условий распространения волн маятникового типа и квазирезонансного механизма возникновения катастрофических событий в напряженных массивах горных пород блочно-иерархического строения [17].

Поскольку цикл исследований [21–30] относится преимущественно к разработке рудных месторождений, то наиболее важные результаты, связанные с проявлением “осциллирующего” движения геоблоков различного иерархического уровня (от нано-, микро- и выше) в стесненных условиях в “маятниковом приближении”, необходимо проверить на примере поведения структурных неоднородностей угленосных толщ различной стадии метаморфизма.

О “ПОРШНЕВОМ МЕХАНИЗМЕ” ВОЗНИКНОВЕНИЯ МАССО-ГАЗООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В НАПРЯЖЕННЫХ ГЕОСРЕДАХ

В последние годы в ИГД СО РАН выполнен крупный цикл научных исследований по изучению особенностей взаимодействия между геомеханическими, тепловыми и физико-химическими процессами при отработке угольных пластов различной стадии метаморфизма Кузбасса, позволивший верифицировать отмеченные выше результаты и обнаружить существование неиз-

вестного ранее “поршневого механизма” протекания массо-газообменных процессов [31–34]. Этот эффект имеет принципиально важное значение для повышения уровня и качества прогнозирования внезапных выбросов угля, породы и газа, а также определения условий возникновения очаговых зон подземных пожаров. Не меньшую значимость это открытие имеет и для развития основ новых геотехнологий дегазации “органогенно-насыщенных” пластов, извлечения из них жидких углеводородов, а также реализации геотехнологий “реакторного типа” [35].

По существу, возможность “поршневого механизма” возникновения нелинейных массо-газообменных процессов в геосредах и геоматериалах следует из активно развиваемой ныне теории волн маятникового типа [17], давшей импульс формированию нового научного направления под названием “**нелинейная геомеханическая термодинамика**” [36]. Последняя является обобщением классической термодинамики на напряженные геосреды блочно-иерархического строения, где существенная роль принадлежит кинетической энергии структурных отдельных элементов заданных уровней их колебательных движений в стесненных условиях (в приближении абсолютно твердых тел). Количественная мера “стесненности” колебательных движений структурных элементов в массивах горных пород связывается с геомеханическим инвариантом $\mu_{\Delta}(\delta)$, характеризующим близкое к нормальному распределение расстояний между берегами трещин δ к диаметрам Δ отделяемых ими геоблоков [37, 38].

Приведенные в [31–34] результаты физического моделирования и натурных экспериментов по изучению взаимодействия между геомеханическими, тепловыми и физико-химическими процессами при отработке угольных месторождений Кузбасса и выполненное обобщение позволили открыть неизвестный ранее “поршневой механизм” возникновения массо-газообменных процессов в породных массивах, свидетельствующий о наличии генетической связи между выбросо- и пожароопасностью угольных пластов различной стадии метаморфизма (рис. 1). Доказательство наличия такой (“обратной”) связи приводится в исследовании [34], позволившем предложить новые представления не только об условиях формирования очаговых зон подземных пожаров, но и о возможном механизме возникновения самовозгорания и взрыва метано-воздушных смесей в подземных выработках.

Так, комплексные экспериментальные исследования [31–34] по анализу связей между деформационно-волновыми (рис. 1а, б) и тепловыми (рис. 1в) процессами, возникающими в структурированных геоматериалах, а также в угольных образцах разного марочного состава (месторождения Кузбасса) при одноосном жестком нагружении со скоростью $\sim 3.3 \cdot 10^{-6}$ м/с до разрушения, позволили установить:

— практически с начала нагружения в угольных образцах возникают *низкочастотные процессы* внутреннего микродеформирования — компонентов $[(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}), 10^{-2}]$, обусловленные низкочастотным ($\sim 0.5–5$ Гц) движением структурных элементов по типу колебания связанных между собою “физических маятников”. Причем амплитуда таких колебаний возрастает (рис. 1а) с увеличением относительного σ/σ^B уровня напряжений во время \hat{t} нагружения до разрушения ($\hat{t} = t/t^B$, t — текущее время нагружения образца до момента t^B достижения им предела прочности σ^B);

— характер распределения (положения экстремумов) микродеформаций (рис. 1б, на примере ε_x) и индуцируемых температур (рис. 1в) по сканируемым поверхностям угольных образцов (x, y) характеризует линейные размеры структурных неоднородностей.

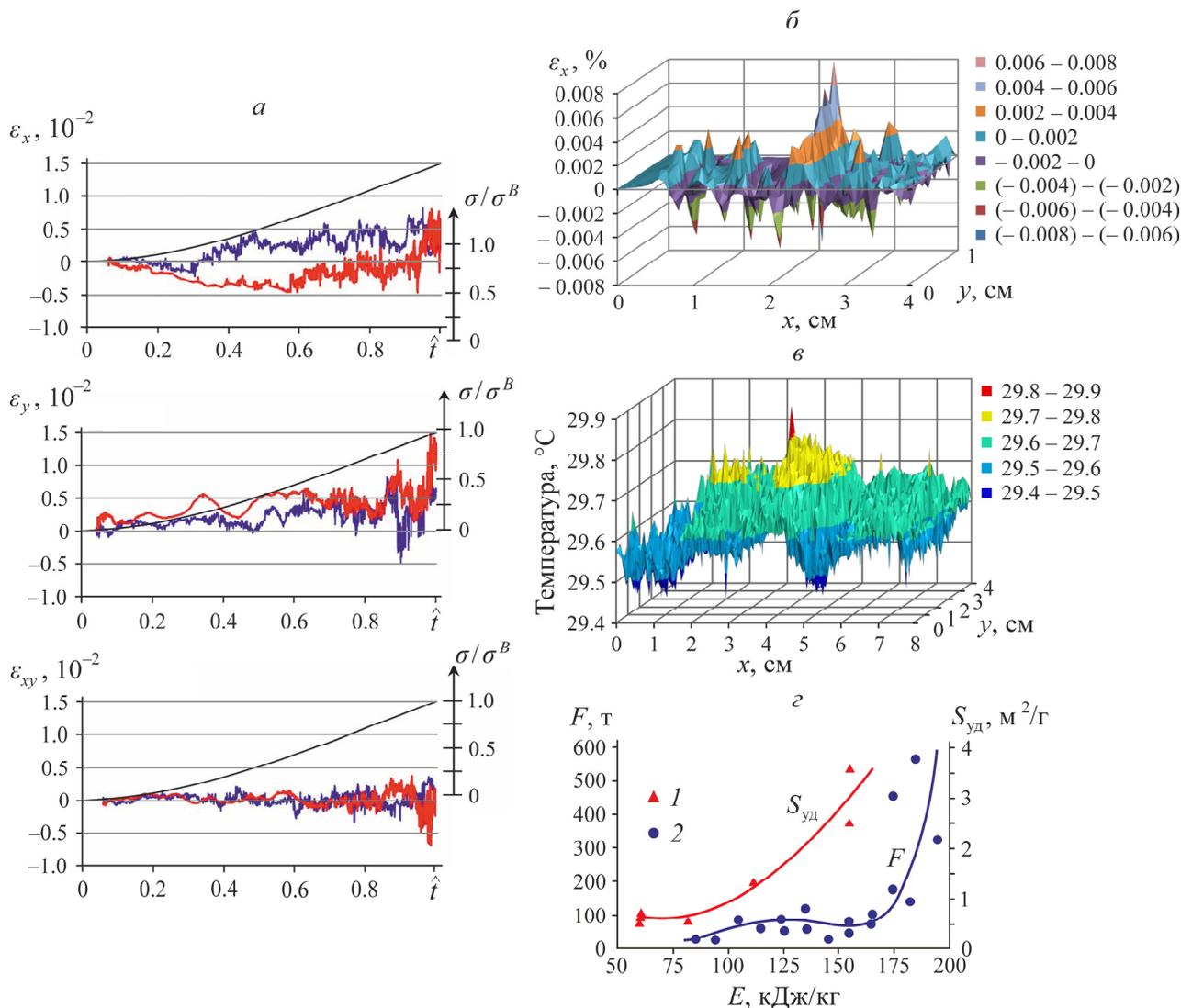


Рис. 1. “Поршневой механизм” возникновения нелинейных массо-газообменных процессов в напряженных углеродных геоматериалах (пояснения в тексте)

Кроме того, существует статистически значимая связь между уровнями возрастания температуры угольных образцов в процессе нагружения до разрушения, их прочностью на одноосное сжатие, выходом летучих веществ и внутренней энергией релаксации метаноносности угольных пластов. На рис. 1в приведены зависимости удельной поверхности угля $S_{уд}$ и силы внезапных выбросов F от внутренней энергии углеметана E , построенные по соответствующим данным анализа выбросов угля и газа Кузбасса [32].

В отличие от угольных образцов [33], возникновение аналогичного низкочастотного деформационно-волнового процесса в образцах горных пород и искусственных геоматериалов с проявленными их структурными неоднородностями наблюдается обычно при уровнях напряжений, превышающих половину предела прочности на одноосное сжатие $\hat{t} > 1/2$ [31]. Так, испытания призматических образцов песчаника, мрамора и сильвинита на одноосное сжатие позволили установить “стадийность” в изменении амплитудно-частотных характеристик для компонентов микродеформаций, регистрируемых оптико-телевизионным комплексом ALMEC-tv:

- на первой стадии (упругого деформирования: $\sigma < 0.5\sigma^*$, σ^* — предел прочности) колебательные изменения микрокомпонентов деформаций практически отсутствуют;
- на второй стадии (нелинейно упругого деформирования: $0.5\sigma^* < \sigma < \sigma^*$) амплитуды колебаний микродеформаций существенно возрастают, сохраняя достигнутые значения и на ниспадающей стадии, с доминирующим частотным диапазоном 0.5–4 Гц;
- на заключительной стадии — остаточной прочности — амплитуды колебаний микродеформаций довольно резко уменьшаются (в 3–5 раз) относительно достигнутых на предыдущей.

В данной статье основное внимание уделяется ответу на вопрос ключевой значимости: существуют ли в настоящее время экспериментально-теоретические предпосылки для установления формализованных связей между деформационно-волновыми и физико-химическими процессами, протекающими в реальных многофазных органогенно-насыщенных массивах горных пород, при нарушении их исходного напряженно-деформированного состояния (источниками различного типа), а также при наличии господствующего на заданных глубинах поля температур? Применительно к проблемам безопасности отработки угольных месторождений и газо-массообменным процессам при извлечении метана из продуктивных пластов в физико-химическом аспекте важнейшую роль играют адсорбционные и абсорбционные процессы в угольном веществе различной стадии метаморфизма, а значит, его молекулярная и надмолекулярная структуры, пористость и трещиноватость — важнейшие характеристики их “газоемкости”.

Размеры и форма пор в углях различной стадии метаморфизма обладают широким диапазоном своих проявлений (от молекулярных размерами 0.4–0.7 нм и до макропор размерами 100 нм и более — вплоть до 10^{-4} м и более, т. е. размеров видимых невооруженным глазом пор и трещин) [39].

Согласно [40], каменный уголь обладает развитой сетью пор и трещин. При этом наиболее высокая пористость наблюдается у антрацитов (до $0.14 \text{ м}^3/\text{т}$ или до 21 % по объему) и каменных углей (до $0.09 \text{ м}^3/\text{т}$ или до 12 % по объему), а сорбционный объем занимает 74–86 % от общей пористости, являясь значительным коллектором газов. Основными механизмами движения метана в угле рассматривают диффузию (в микропорах) и фильтрацию (в макропорах и трещинах). Особо отметим, что размеры и топология этих “дефектов” угольного вещества в модельных расчетах обычно принимаются фиксированными (“застывшими”) во времени. При теоретическом моделировании движения жидкостей и газов в “высоконапряженных” геосредах считается, что происходит “смыкание трещин”, а основной процесс движения жидкостей и газов можно описать в рамках “диффузионных моделей” с некоторыми эффективными параметрами проницаемости геовещества [12–14].

В последние годы стали разрабатываться более сложные модели для описания массопереноса и проницаемости напряженных массивов горных пород с использованием различных источников, опираясь на концепцию о проницаемых средах с двойной пористостью в изменяющемся поле температур [13–16]. Для количественных прогнозных оценок разрабатываются и используются различные алгоритмы для решения очень сложных (комплексных) систем дифференциальных уравнений, описывающих процессы сорбции/десорбции жидкостей и газов, движения последних в таких средах (уравнения сохранения массы, закон Дарси, уравнение теплопроводности, уравнения Ленгмюра и состояния газов).

Однако применяемые для численного решения таких систем уравнений предположения (“упрощения”) нередко связаны с незнанием о существовании более глубоких механических процессов внутри многофазных блочно-иерархически построенных геосред [31], а используемая операция “осреднения” по некоторому объему геоматериалов для получения “эффективных характеристик” (упругие модули, проницаемость и проч.) приводит к утрате возможности изучать связанные с этим “тонкие” геомеханические и физико-химические динамические процессы в реальных геосредах.

По существу, открытый в [31 – 33] “поршневой механизм” протекания массо-газообменных процессов (см. рис. 1) в угольных пластах различной стадии метаморфизма — яркое свидетельство для подобного рода ситуаций, связанных с численным их моделированием. Очевидное здесь противоречие касается реального механического поведения разных и широкого диапазона по линейным размерам пор и трещин в условиях сложного нагружения геоматериалов. **Важно, что раскрытие и закрытие берегов трещин в таких геосредах — процесс осциллирующий с весьма значимыми амплитудами и периодами**, хотя произвольное осреднение его по времени и в пространстве дает некие “эффективные характеристики” с соответствующими средними значениями (в том числе и равными нулю). Такой “результат”, будучи полезным для получения эффективных (с точки зрения математиков) алгоритмов решения сложных систем уравнений, приводит к весьма негативным последствиям, связанным с качеством физической интерпретации модельных расчетов в сравнении с натурными данными.

УРАВНЕНИЕ ЛЕНГМЮРА

Как известно [41], абсорбция газов — это объемное их поглощение жидкостью или твердым телом (абсорбентами) с образованием соответствующего раствора. Адсорбция представляет собой более “узкое” понятие абсорбции — поглощение вещества из газовой фазы или жидкого раствора поверхностным слоем твердого тела или жидкости [42].

В последнем случае принято считать, что такой процесс обусловлен наличием “адсорбционного силового поля, создаваемого за счет нескомпенсированных межмолекулярных сил в поверхностном слое”, а соответствующее вещество называется адсорбентом.

В [43] отмечается, что основные представления о существовании адсорбционных процессов в течение XIX – первых десятилетий XX в. (в основном на поверхности углей) были связаны с экспериментальным наблюдением де Соссюра (1814 г.): чем легче газ конденсируется, тем большее количество его адсорбируется на данном адсорбенте. Аррениус сопоставил объемы различных газов, адсорбированных углем, с константой a в уравнении Ван-дер-Ваальса (1873 г.):

$$\left(p + a \frac{N^2}{V^2} \right) (V - bN) = NkT, \quad (1)$$

где N — количество молекул газа; V — его объем; p — давление; T — абсолютная температура; k — постоянная Больцмана; a , b — характерные для данного вещества “константы”, учитывающие особенности притяжения молекул.

Такое сравнение позволило Аррениусу заключить, *что между поверхностью твердого адсорбента и молекулами газа действуют силы, аналогичные силам притяжения*. Классические работы А. А. Титова и Г. Хэмфри (1910 г.) по адсорбции некоторых газов на углях связаны с количественной оценкой “ван-дер-ваальсовской адсорбции”. В уравнении (1) член aN^2/V^2 назван “внутренним давлением”, а постоянная величина b оценивалась как *учетверенный объем молекулы газа* при условии моделирования их “слабо притягивающимися” упругими сферами.

Уравнение (1) позволяет количественно описывать свойства реальных газов лишь для диапазонов “относительно высоких” температур T и низких давлений P , поскольку “константы” a и b зависят от абсолютной температуры. С публикацией работ [44, 45] появились теоретические основы для постановки более тонких и специальных экспериментов по изучению реальной (тонкой) структуры межмолекулярных сил “слабого притяжения”, лежащих в основе “ван-дер-ваальсовской адсорбции”, но уже на базе представлений о существовании “канонических рядов атомно-ионных радиусов”.

Следует отметить, что Ленгмюр, выдвигая в 1914–1918 гг. теорию “мономолекулярной локализованной адсорбции” (молекулы адсорбата “фиксированы” — не передвигаются по поверхности твердого тела), развил также и представление о строении “мономолекулярных адсорбированных слоев” на поверхности жидкостей. Изучая закономерности адсорбции и свойства мономолекулярных слоев *поверхностно-активных веществ*, ему удалось показать, что “разреженные” монослои обладают свойствами “двумерного газа”, в “насыщенных” монослоях молекулы становятся “определенным образом ориентированными” в пространстве, что в ряде случаев позволяло установить их строение, форму и размеры [46].

По сути дела, в данных [44] и отмеченных результатах Ленгмюра уже содержатся необходимые физико-химические предпосылки для развития более общих представлений о возможной “зонально-стратифицированной структуре” объемного состояния газожидкостных фаз как в поровом, так и в трещинном пространстве геоматериалов (многофазных сред). Применительно к физико-механическим свойствам горных пород и твердых тел эти процессы, очевидно, имеют непосредственное отношение к физико-химическим процессам, лежащим в основе приобретения геоматериалами анизотропных свойств на надмолекулярном масштабном уровне.

И. Ленгмюр (1900–1916 гг.) при исследовании адсорбции газов на твердых поверхностях пришел к заключению, что для этого процесса существует некоторый предел и вывел соответствующее уравнение для “изотермы мономолекулярной адсорбции” (изотерма Ленгмюра). В обозначениях [40] это уравнение можно записать в виде

$$\Gamma = \Gamma_{\infty} \frac{kp}{1 + kp}, \quad (2)$$

а при адсорбции из растворов

$$\Gamma = \Gamma_{\infty} \frac{kc}{1 + kc}, \quad (3)$$

где Γ_{∞} — максимальная адсорбция при полном раскрытии поверхности твердого тела “мономолекулярным слоем” адсорбируемого газа; Γ — количество адсорбированного вещества (газа) на поверхности твердого тела при постоянной температуре T в момент “равновесия системы”, когда скорость адсорбции молекул газа твердой поверхностью \mathcal{G}_a становится равной скорости их десорбции \mathcal{G}_d ; p — давление газа; $k = k_a / k_d$ (k_a — константа скорости адсорбции, k_d — соответственно десорбции).

При выводе уравнений (2) и (3) принималось, что относительная площадь для “активных центров”, занятых адсорбированными молекулами, равна Q и, следовательно, свободная доля поверхности от таких молекул равна $1 - Q$ ($Q = \Gamma / \Gamma_{\infty}$). Тогда в предположении о том, что температура T постоянна, а скорость адсорбции пропорциональна давлению газа p и доле свободной поверхности $1 - Q$, получаются соотношения:

$$\mathcal{G}_a = k_a p(1 - Q), \quad \mathcal{G}_d = k_d Q. \quad (4)$$

При достижении “равновесного состояния” физико-химической системы выполняется условие равенства \mathcal{G}_a и \mathcal{G}_d . В случае адсорбции из растворов в (3) параметр c означает “равновесную концентрацию адсорбируемого вещества”. На рис. 2 приведены примеры изотерм Ленгмюра адсорбции трех (1–3) различающихся веществ на одном и том же сорбате [40].

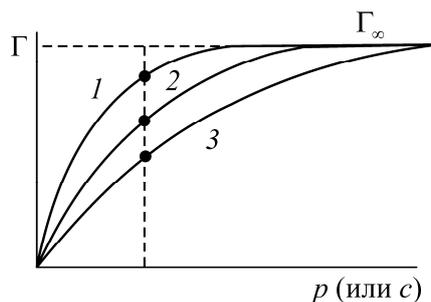


Рис. 2. Изотермы адсорбции по Ленгмюру [40]

Таким образом, уравнение Ленгмюра имеет две “константы”: Γ_{∞} характеризует предельную адсорбционную способность адсорбента и k — способности адсорбтива адсорбироваться. Как следует из (2), (3) и рис. 2 (здесь 1–3 соответствуют значениям k в порядке $k_1 > k_2 > k_3$), чем больше k , тем лучше вещество адсорбируется. Представленные зависимости отвечают простейшим изотермам адсорбции, описываемым уравнением Ленгмюра.

Как известно, свободный и сорбированный газ в многофазных средах (в том числе и в угле) являются источниками “внутренней упругой энергии”. Через напряженное состояние “твердой матрицы” вещества эта энергия достаточно тесно связана с уровнем горного давления. В “линейном приближении” условие термомеханического равновесия газовых компонентов описывается классическим уравнением

$$pV = \frac{m + \Delta m}{\mu} RT, \quad (5)$$

где p — давление; V — объем пор или трещин; m — масса “свободного” газа; Δm — приращение массы газа при десорбции; μ — молекулярный вес; T — абсолютная температура; R — газовая постоянная.

С учетом наличия “поршневого механизма” возникновения массо-газообменных процессов параметр V становится существенно зависимым от времени (например, с частотой осцилляций 0.5–5 Гц, см. рис. 1). **Это может являться одной из основных причин неравенства газового и флюидного давления в порах и трещинах геоматериалов с господствующим уровнем горного давления в заданном объеме массива горных пород (твердой матрице).**

В случае “перенапряженных” участков массивов горных пород можно ожидать, что обсуждаемая взаимосвязь между напряженно-деформированным состоянием “перфорированной” твердой матрицы геовещества с газожидкими включениями и уровнем литостатического давления становится много сложнее, а уравнения массо-газообмена (сохранения масс) будут становиться нелинейными.

КИНЕМАТИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ МАЯТНИКОВЫХ ВОЛН

Количественное описание пространственно-временной зависимости изменения объемов V пор и трещин различного масштабного уровня в диапазонах реального их существования в массивах горных пород, коррелирующих с поршневым механизмом возникновения “осциллирующих” массо-газообменных процессов, можно характеризовать с привлечением современных представлений [38] о блочно-иерархическом строении горных пород в каноническом виде и теории волн маятникового типа [17].

Аппроксимируя поры геовещества в виде “узловых пятен” между структурными его элементами (от надмолекулярного до макромасштабного уровня), средний диаметр которых сравним или не превышает двукратную “толщину” отделяющих их трещин (“объемных границ” между структурными неоднородностями), будем рассматривать динамическое поведение только берегов трещин в геоматериалах с позиций теории волн маятникового типа [17]. Здесь используются следующие физико-механические представления и феноменологические связи.

Во-первых, это наличие статистически инвариантной связи между “раскрытием” среднего расстояния между берегами трещин δ_i в горных массивах и диаметрами отделяемых геоблоков Δ_i различного иерархического уровня i :

$$\mu_{\Delta}(\delta) = \frac{\delta_i}{\Delta_i} = \left(\frac{1}{2} \div 2 \right) \cdot 10^{-2} \text{ для любого } i. \quad (6)$$

Данная характеристика может использоваться для оценки “меры подвижности” $\nu_{\Delta}(\delta)$ структурных элементов (кристаллов, мацерелл, блоков) в стесненных условиях массивов горных пород и фактически сопряжена с $\mu_{\Delta}(\delta)$:

$$\nu_{\Delta}(\delta) = (10^{-2} \div 10^{-1}) \mu_{\Delta}(\delta). \quad (7)$$

Поскольку отделяющие структурные неоднородности (геоблоки) трещины или поры всегда частично заполнены газом, жидкостью или более мелким фрагментированным твердым веществом, для реальных массивов горных пород применяется упрощенная связь:

$$\nu_{\Delta}(\delta) \sim 10^{-1} \mu_{\Delta}(\delta). \quad (8)$$

Эмпирические формулы (6)–(8) позволили объяснить открытое в 80–90-е годы XX в. явление знакопеременной реакции горных пород на взрывные (динамические) воздействия, а затем существование волн маятникового типа [17].

Суть этого явления заключается в том, что при образовании полостей внутри массивов горных пород вследствие мощных взрывов в их окрестностях происходят смещения разных знаков между геоблоками, колебательное движение друг относительно друга, что обусловлено стесненным поворотом и трансляционным движением породных блоков разного иерархического уровня, зависящего от размеров образующихся полостей, горного давления и энергии взрывов.

Гипотеза о возможности существования в массивах горных пород нелинейных упругих волн маятникового типа, носителями которых являются не абстрактные математические “элементарные объемы”, а реальные структурные элементы геологического вещества в приближении “абсолютно твердых тел” впервые представлена в работе [23]. Для их регистрации и теоретического анализа в последнее десятилетие ведутся активные исследования и разработки в ряде институтов СО РАН в рамках интеграционных проектов [47].

Реальные значения структурных характеристик $\mu_{\Delta}(\delta)$ и $\nu_{\Delta}(\delta)$, в силу их статистической природы, зависят от вида напряженно-деформированного состояния горных пород и учитываются в кинематическом выражении для волн маятникового типа. Простейшее “одномерное” представление для скорости распространения волн маятникового типа дано в [19, 48]:

$$\mathcal{G}_{\nu} = \frac{(1 + \nu[\sigma])\mathcal{G}_{\varepsilon}\mathcal{G}_p}{\mathcal{G}_{\varepsilon} + \nu[\sigma]\mathcal{G}_p}, \quad (9)$$

где \mathcal{G}_v — скорость распространения маятниковой волны (μ -волна); \mathcal{G}_p — скорость распространения продольной волны в геоблоках-носителях μ -волны; \mathcal{G}_e — средняя скорость трансляционного относительного движения “соударяющихся” геоблоков диаметром Δ ; $v[\sigma]$ — параметр, зависящий по δ из (6), (7) от действующих в массиве горных пород напряжений σ (индексы i, δ, Δ опускаем).

Характер такой зависимости на допредельной стадии деформирования горных пород можно аппроксимировать функциями параболического вида, например типа [17, 19]:

$$v[\sigma] = v_0 \left[2 - \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^2 \right], \tag{10}$$

где v_0 — минимальное значение параметра $v_\Delta(\delta)$ из (7), (8) при всестороннем сжатии до предела объемной прочности σ_0 (часто это величина порядка 10^{-3}).

В общем случае тензорного аргумента σ выражение (10) приобретает векторный вид, когда проявляются волноводные свойства для маятниковых волн (по [17, 49] — геомеханические волноводы): динамико-кинематические характеристики μ -волн становятся зависимыми от направления к источнику излучения и его вида.

На рис. 3 приведена простейшая механическая модель блочной среды (движение кубических блоков одного размера без трения, которые нетрудно заменить на шаровую форму) для расчета скорости распространения маятниковой волны по (9) от силового воздействия $F(t)$, а на рис. 4 — расчетные кривые ее изменения в относительных единицах к скорости распространения продольных волн \mathcal{G}_p в зависимости от \mathcal{G}_e . Этот скоростной параметр “соударения” геоблоков (вещественных носителей μ -волн в приближении абсолютно твердых тел) зависит от силовой $F(t)$ — характеристики источника излучения μ -волн.

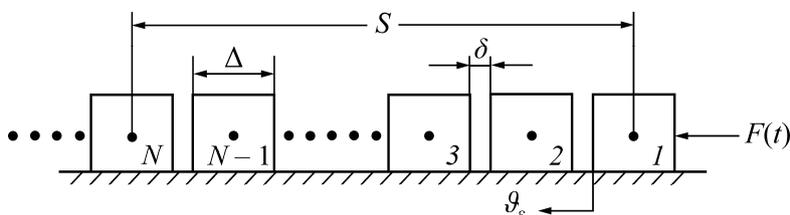


Рис. 3. Механическая модель к расчету скоростной характеристики \mathcal{G}_v маятниковых волн по [48]

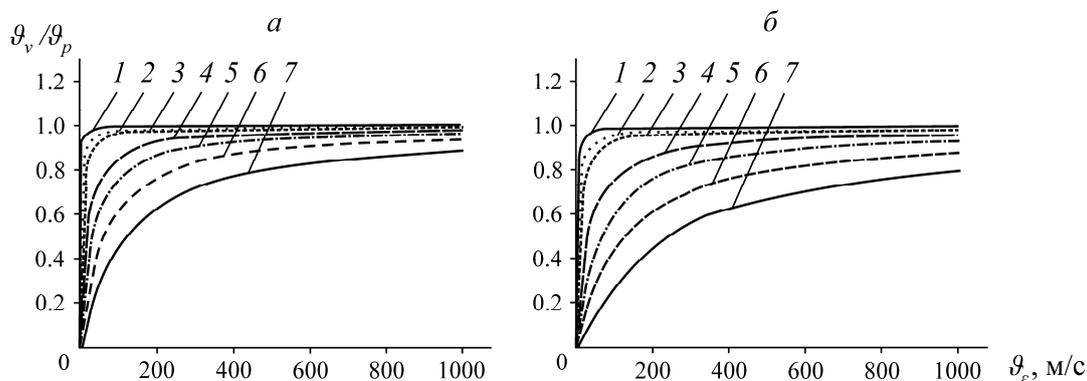


Рис. 4. Изменение относительной (к продольной) скорости маятниковых волн в зависимости от \mathcal{G}_e и скорости продольных волн при $\mathcal{G}_p = 3000$ м/с (а) и $\mathcal{G}_p = 6000$ м/с (б): 1 — $\nu = 10^{-4}$; 2 — $\nu = 5 \cdot 10^{-4}$; 3 — $\nu = 10^{-3}$; 4 — $\nu = 5 \cdot 10^{-3}$; 5 — $\nu = 10^{-2}$; 6 — $\nu = 2 \cdot 10^{-2}$; 7 — $\nu = 4 \cdot 10^{-2}$ (по [18, 19])

С учетом формулы (9) кривые на рис. 4 иллюстрируют характер влияния напряженного состояния горных пород на скорость распространения маятниковой волны. Так, уменьшение значений структурного параметра ν , которое происходит согласно (10) с ростом напряжений σ , ведет к достаточно быстрому возрастанию скорости распространения маятниковой волны \mathcal{G}_ν , вплоть до значений скорости распространения продольной волны (при $\nu = 0$ среда с полностью сомкнутыми трещинами). Аналогичная тенденция роста скорости распространения маятниковых волн наблюдается и по скоростному параметру \mathcal{G}_ε , что означает увеличение значений \mathcal{G}_ν с возрастанием мощности источника их излучения (силового воздействия $F(t)$, рис. 3).

Экспериментальное доказательство отмеченных закономерностей, предсказанных теоретически в [18, 19], дано методом физического моделирования и натурными измерениями в условиях рудника Таштагольский [49, 50].

Современное развитие теории волн маятникового типа позволяет выделить следующие основополагающие результаты.

- Возможность поступательного и вращательного осциллирующих движений структурных элементов геоматериалов в стесненных условиях напряженных массивов горных пород (либо искусственно задаваемых напряжений на границах образцов горных пород или определенных их объемов) и, следовательно, обладания составными фракталами кинетической энергии.

- Существование волн маятникового типа позволяет моделировать их вещественные носители — структурные элементы соответствующего иерархического уровня (от надмолекулярного до фракталей, соизмеримых с источниками возмущения) — как “соударяющиеся” сосредоточенные нелинейно упруго взаимодействующие массы.

- Спектральный состав упругих волновых пакетов для волн маятникового типа при этом имеет канонический вид [17, 50]:

$$f_i = (\sqrt{2})^i f_0, \quad i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots; \quad f_0 = \frac{\mathcal{G}_p}{2\Delta}, \quad (11)$$

где \mathcal{G}_p — скорость распространения продольной волны в геоблоке (структурном элементе) диаметром Δ .

- Каноническая структура частотного спектра маятниковых волн (11) отражает закон “квантования” структурных отдельностей горных пород и геоматериалов [38], и подстановка вместо Δ в формулу (11) для базовой частоты f_0 канонических размеров Δ_j структурных блоков (неоднородностей) дает эмпирическое выражение для f_i из (11).

О ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ УРАВНЕНИЕМ ЛЕНГМЮРА И КИНЕМАТИЧЕСКИМ ВЫРАЖЕНИЕМ ДЛЯ ВОЛН МАЯТНИКОВОГО ТИПА

Динамико-кинематические свойства маятниковых волн принципиально важны для описания поведения реальных геосред от силовых источников разного вида. Это обусловлено важными особенностями в изменении напряженно-деформированного состояния многофазных сред с внутренней иерархической структурой составляющих их отдельностей, особенно в нелинейных динамических процессах.

Что в данных процессах важно учитывать? Полагаю, что это:

- “мозаичность структуры” полей напряжений и деформаций внутри образцов горных пород и геоматериалов даже при “кажущихся” однородных краевых условиях их внешнего нагружения;

- разномодульность фазовых составляющих или “вкраплений” газа, жидкости в твердой матрице породного вещества и, соответственно, описывающих их напряженно-деформированное состояние математических уравнений в статике и динамике [16];

- ярко выраженная “агрегация” фазовых составляющих в общем объеме геоматериалов, с локализацией газов и жидкостей в поровом и трещинном пространстве твердой матрицы;

- при достижении определенного уровня горного давления (напряженности) возникают низкочастотные (!) осциллирующие движения структурных отдельностей внутри геоматериалов (проявление “поршневого” механизма газо- массообменных процессов), что существенно меняет их характеристики проницаемости по сравнению с исходной структурой: большинство ранее изолированных пор и трещин внутри заданного объема горных пород, угля и других геоматериалов становятся топологически связанными между собой не только в пространстве, но и во времени.

Отмеченные особенности внутреннего строения и геомеханического поведения многофазных сред свидетельствуют о том, что в реально происходящих массо-газообменных и тепловых процессах геосред и, в частности, при отработке угольных месторождений значительно бóльшая роль должна принадлежать не столько “константам” для описания адсорбционных (десорбционных) процессов в весьма идеализированных представлениях, заложенных в уравнениях Ленгмюра (1) и (2), но и некоторым их “объемным” аналогам — “коэффициентам адсорбции”, являющимся на самом деле зависимыми от размеров пор и трещин, состава их газо-жидкостных компонентов (смесей), динамико-кинематических характеристик (в “поршневом” приближении) движения берегов трещин и изменения формы пор в топологическом пространстве с изменяющимся во времени фактором связности. Такие изменения во времени зависят от исходного вида напряженно-деформированного состояния породного массива, типа (форма, энергия, амплитудно-частотный спектр) и места расположения источника возмущения.

Сформулированная “вербально” идея на самом деле имеет не только большое теоретическое значение, но и непосредственно касается решения важных прикладных задач: интерпретации натурных измерений по изучению особенностей протекания массо-газообменных процессов в органогенно насыщенных слоях (угли, горючие сланцы, торфы, нефтегазовые пласты и проч.), разработки новых технологий извлечения полезных компонентов в заданном фазовом состоянии, т. е. относится к разряду “фундаментальных” и касается развития основ теории управления сложными нелинейными процессами “*направленного массо-газообмена*” в многофазных напряженных геосредах блочно-иерархического строения. Как показано в [38], понятие “мозаичности структур” наиболее удобно и точно можно описать кластерами из канонических рядов структурных отдельностей, в пределе переходящих в канонические ряды атомно-ионных радиусов [44].

Для “*формального воплощения*” отмеченной идеи уже имеются достаточные основания.

Во-первых, это накопленный опыт [39, 40] по использованию “констант” из уравнения Ленгмюра (2) в горном деле для прогнозирования склонности угольных пластов к внезапным выбросам и их газоносности.

Во-вторых, опыт разработки технологий управления газоносностью угольных пластов для различных целей: повышения уровня безопасности ведения горных работ по таким факторам, как загазованность подземных выработок (проблемы вентиляции), возникновение подземных пожаров, взрывов газа, катастрофические проявления горного давления и др.; в последние десятилетия газовая компонента угольных месторождений применяется уже в промышленных целях (в том числе и “сланцевый газ”).

В-третьих, наличие фундаментального экспериментально-теоретического задела по особенностям распространения волн маятникового типа в напряженных геосредах, энергетическому условию их возникновения, динамико-кинематическим характеристикам и видам источников возмущения [17].

Более подробно остановимся на последнем обстоятельстве, имеющем непосредственное отношение к открытию “поршневого механизма” в протекании сложных газо-массообменных процессов в многофазных геоматериалах и их породных массивах (см. рис. 1).

Действительно, сравнение структуры кривых, приведенных на рис. 2 для изотерм по Ленгмюру, и на рис. 4 для изменения скоростных характеристик волн маятникового типа в зависимости от “силовых характеристик” (в первом случае от давления p , а во втором — от \mathcal{G}_e ; \mathcal{G}_e зависит от напряженного состояния массива и силовой характеристики F в источнике их излучения, см. рис. 3) показывает их “однотипность” — наличие зависимости гиперболического типа.

Особое значение имеет последовательность приведенных кривых относительно “физико-механических” характеристик геовещества: в первом случае — это коэффициент k , характеризующий адсорбционную способность, сильно зависящую от механических параметров — пористости и трещиноватости; во втором — скорость распространения продольных волн, зависящих от таких механических характеристик, как модуль Юнга E , коэффициент Пуассона ν и плотность вещества ρ , которые также зависят от трещиноватости и пористости.

Наличие двух интервалов или “ветвей” сравниваемых кривых на рис. 2 и рис. 4 — нелинейного и асимптотического поведения, плавно переходящих одна в другую, — также свидетельствует о том, что должна существовать “детерминированная связь” между скоростями развития физико-химических массообменных процессов в геоматериалах с динамическими геомеханическими процессами изменения параметров пор и трещин (низкочастотные деформационно-волновые процессы в таком случае становятся “модулирующими” [17] для физико-химических!). Как экспериментальное доказательство существования низкочастотного “модулирующего начала”, описывающего взаимодействие между геомеханическими и физико-химическими массообменными процессами, следует рассматривать рис. 1. Если рассуждения верны, должно существовать формализованное — “операторное” — соответствие между этими разными процессами, где временной фактор становится одним из основных аргументов в соответствующих функциональных зависимостях (рис. 1а). Для проверки данной гипотезы обратимся к уравнениям (2) и (9).

Для дальнейшего их совместного анализа введем дополнительные обозначения, поскольку в уравнении (9) содержатся “объемные характеристики” геоматериалов, в то время как понятие адсорбции относится к идеализированным “поверхностным характеристикам”, не зависящим явно от времени. Полагая, что общий процесс адсорбции складывается из отдельных актов адсорбции, а его “макропроявления” описываются тем же уравнением Ленгмюра (2), но уже с другими (“объемными”) коэффициентами, перепишем его в следующем виде:

$$A = A_* \frac{\kappa p}{1 + \kappa p}, \quad (12)$$

где A — адсорбционный аналог “изотермы мономолекулярной адсорбции” (вместо Γ); A_* — предельное значение A (вместо Γ_∞ или максимальная адсорбция при заполнении абсорбентом пор и трещин в заданном геомеханическом состоянии геоматериала); κ — аналог параметра k (характеризует отношение скоростей адсорбции и удаления газов из заданного объема V пор и/или трещин, имеющих различный вещественный состав).

Из сравнения видов функциональных представлений (9) и (12) нетрудно заключить, что они становятся тождественными, если ввести линейный по аргументам оператор отображения $\Omega\{\dots\}$ комбинаций механических и физико-химических параметров по типу:

$$\Omega\{\dots\} \equiv \left. \begin{array}{l} A \rightarrow \mathcal{G}_p \\ p \rightarrow \mathcal{G}_\varepsilon \\ \kappa \rightarrow \frac{1}{\nu[\sigma]\mathcal{G}_p} \\ A_* \rightarrow \mathcal{G}_p(\nu[\sigma]+1) \end{array} \right\}. \quad (13)$$

Отсюда следует, что при явной зависимости параметров соответствия (13) от времени (например, по типу низкочастотных осцилляторов, рис. 1а), возникает новая задача: поиска калибровочных коэффициентов в операторе соответствия $\Omega\{\dots\}$ для уравнений (9) и (12), а также верификации полученных результатов в сравнении с имеющимися измерениями в лабораторных и натурных экспериментах. Этому направлению исследований будут посвящены отдельные работы.

ВЫВОДЫ

Таким образом, существует тесная связь между нелинейными массо-газообменными процессами в многофазных напряженных геосредах блочно-иерархического строения с протекающими в них физико-химическими процессами. При этом отмечен эффект “модуляции” низкочастотными деформационно-волновыми процессами физико-химических массо-газообменных процессов, обуславливающих “поршневой механизм”.

Процесс “модуляции” может быть количественно описан в рамках теории волн маятникового типа. Предложен оператор соответствия между уравнением Ленгмюра и кинематическим уравнением для волн маятникового типа.

Автор выражает благодарность Н. В. Капустиной за помощь в оформлении работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булат А. Ф., Минеев С. П., Прусова А. А. Генерирование сорбционного метана, обусловленное релаксационным механизмом деформирования молекулярной структуры угля // ФТПРПИ. — 2016. — № 1. — С. 91–99.
2. Булат А. Ф., Скиночка С. И., Паламерчук Т. А., Анциферов В. А. Метаногенерация в угольных пластах. — Днепропетровск: Лира ЛТД, 2010. — 328 с.
3. Мюллер Р. Л. К вопросу о возможной роли химических процессов при внезапных выбросах угля и газа в угольных шахтах // Вопросы теории внезапных выбросов угля и газа. — М.: ИГД АН СССР, 1959. — С. 156–172.
4. Фейт Г. Н., Малинникова О. Н. Особенности и закономерности геомеханических и физико-химических процессов формирования опасности газодинамических явлений в шахтах // ГИАБ. — 2007. — Т. 13. — № 1. — С. 193–206.
5. Болдырев В. В. Реакционная способность твердых веществ. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. — 303 с.
6. Эттингер И. Л. Физическая химия газоносного угольного пласта. — М.: Наука, 1981. — 103 с.
7. Саранчук В. И., Айруни А. Т., Ковалев К. Е. Надмолекулярная организация, структура и свойства угля. — Киев: Наук. думка, 1988. — 192 с.

8. **Gregg S. J., Sing K. S. W.** Adsorption, surface area and porosity, London and New York: Academic Press, 1967. — 306 p.
9. **Малышев Ю. Н., Трубецкой К. Н., Айруни А. Т.** Фундаментально прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов. — М.: АГН, 2000. — 519 с.
10. **Минеев С. П.** Свойства газонасыщенного угля. — Днепропетровск: НГУ, 2009. — 220 с.
11. **Алексеев А. Д.** Физика угля и горных процессов. — Киев: Наук. думка, 2010. — 425 с.
12. **Баренблатт Г. И., Желтов Ю. П., Кочина П. Я.** Об основных представлениях теории фильтрации в трещиноватых средах // ПММ. — 1960. — Т. 24. — № 5. — С. 58–73.
13. **Wu Y.-S.** Multiphase fluid flow in porous and fractured reservoirs, Elsevier, Amsterdam, 2016. — 418 p.
14. **Coussy O.** Mechanics and physics of porous solids, John Wiley & Son Ltd., 2010. — 281 p.
15. **Zhou X., Ghassemi A.** Finite element analysis of coupled chemo-poro-thermo-mechanical effects around a well bore in swelling shale, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2009, Vol. 46, No. 4. — P. 769–778.
16. **Назарова Л. А., Назаров Л. А.** Эволюция напряжений и проницаемости трещиновато-пористого породного массива в окрестности добычной скважины // ФТПРПИ. — 2016. — № 3. — С. 11–19.
17. **Адушкин В. В., Опарин В. Н.** От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах // ФТПРПИ. — Ч. I. — 2012. — № 2. — С. 3–27; Ч. II. — 2013. — № 2. — С. 3–46; Ч. III. — 2014. — № 4. — С. 10–38; Ч. IV. — 2016. — № 1. — С. 3–49.
18. **Опарин В. Н., Симонов Б. Ф., Юшкин В. Ф., Востриков В. И., Погарский Ю. В., Назаров Л. А.** Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях. — Новосибирск: Наука, 2010. — 404 с.
19. **Опарин В. Н., Симонов Б. Ф.** О нелинейных деформационно-волновых процессах и виброволновых геотехнологиях освоения нефтегазовых месторождений // ФТПРПИ. — 2010. — № 2. — С. 3–25.
20. **Biot M. A.** Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency Range, J. of the Acoustical Society of America, 1956, Vol. 28, No. 2. — P. 179–191.
21. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Ревуженко А. Ф., Шемякин Е. И.** О некоторых особенностях реакции горных пород на взрывные воздействия в ближней зоне // ДАН. — 1987. — Т. 293. — № 1. — С. 67–70.
22. **Курленя М. В., Адушкин В. В., Гарнов В. В., Опарин В. Н., Ревуженко А. Ф., Спивак А. А.** Знакопеременная реакция горных пород на динамические воздействия // ДАН. — 1992. — Т. 323. — № 2. — С. 263–265.
23. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И.** О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа v_{μ} // ДАН. — 1993. — Т. 333. — № 4. — С. 515–521.
24. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Балмашнова Е. Г., Востриков В. И.** О динамическом поведении “самонапряженных” блочных сред. Ч. I: Одномерная механико-математическая модель // ФТПРПИ. — 2001. — № 1. — С. 3–11.
25. **Опарин В. Н., Балмашнова Е. Г., Востриков В. И.** О динамическом поведении напряженных блочных сред. Ч. II: Сравнение теоретических и экспериментальных данных // ФТПРПИ. — 2001. — № 5. — С. 12–18.
26. **Александрова Н. И.** Лекции по теме “Маятниковые волны” в рамках курса “Нелинейная геомеханика”: учеб. пособие. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012. — 72 с.
27. **Александрова Н. И.** О распространении упругих волн в облачной среде при импульсном нагружении // ФТПРПИ. — 2003. — № 3. — С. 38–47.
28. **Александрова Н. И., Черников А. Г., Шер Е. Н.** О затухании маятниковых волн в блочном массиве горных пород // ФТПРПИ. — 2006. — № 5. — С. 67–74.
29. **Шер Е. Н., Александрова Н. И., Айзенберг-Степаненко М. В., Черников А. Г.** Влияние иерархической структуры блочных горных пород на особенности распространения сейсмических волн // ФТПРПИ. — 2007. — № 6. — С. 20–27.
30. **Александрова Н. И.** Нестационарные волновые процессы в блочных и упругих средах с учетом вязкости и внешнего сухого трения: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Новосибирск: ИГиЛ СО РАН, 2015. — 42 с.

31. Опарин В. Н., Усольцева О. М., Семенов В. Н., Цой П. А. О некоторых особенностях эволюции напряженно-деформированного состояния образцов горных пород со структурой при их одноосном нагружении // ФТПРПИ. — 2013. — № 5. — С. 3–19.
32. Опарин В. Н., Киряева Т. А., Гаврилов В. Ю., Шутилов Р. А., Ковчавцев А. П., Танайно А. С., Ефимов В. П., Астраханцев И. Е., Грнев И. В. О некоторых особенностях взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами в угольных пластах Кузбасса // ФТПРПИ. — 2014. — № 2. — С. 3–30.
33. Опарин В. Н., Киряева Т. А., Усольцева О. М., Цой П. А., Семенов В. Н. Об особенностях развития нелинейных деформационно-волновых процессов в угольных образцах различной стадии метаморфизма при нагружении до разрушения в изменяющемся поле температур // ФТПРПИ. — 2015. — № 4. — С. 3–24.
34. Опарин В. Н., Киряева Т. А., Гаврилов В. Ю., Танашев Ю. Ю., Весенин Н. Т. К проблеме возникновения очагов подземных пожаров // ФТПРПИ. — 2016. — № 3. — С. 155–175.
35. Опарин В. Н. Геотехнологии будущего — геотехнологии “реакторного типа”: современные тенденции, научный задел, ключевые проблемы // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды: Тр. Всерос. конф. с участием иностр. ученых. — В 2 т. Т. 1: Геотехнология. Прикладная геомеханика. Обогащение полезных ископаемых. Экология. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012. — С. 5–19.
36. Опарин В. Н. Волны маятникового типа и “геомеханическая температура” // Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах: Тр. 2-й Рос.-Кит. науч. конф. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012. — С. 13–19.
37. Курленя М. В., Опарин В. Н., Еременко А. А. Об отношении линейных размеров блоков пород к раскрытию трещин в структурной иерархии массивов // ФТПРПИ. — 1993. — № 3. — С. 3–10.
38. Опарин В. Н., Танайно А. С. Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении. — Новосибирск: Наука, 2011. — 259 с.
39. Ходот В. В. Внезапные выбросы угля и газа. — М.: ГНТИ лит. по горному делу, 1961. — 364 с.
40. Докукин А. В. Основные проблемы горной науки. — М.: Недра, 1979. — 382 с.
41. Danckwerts P. V. Gas – liquid reactions. N.Y., 1970.
42. Рамм В. М. Адсорбция газов. — М.: Химия, 1976. — 656 с.
43. The collected works. Oxf., 1960–1962, Vol. 1–2; Surface chemistry // Nobel lectures. Chemistry 1922–1941. Amst.; N.Y., 1966.
44. Курленя М. В., Опарин В. Н. О масштабном факторе явления зональной дезинтеграции горных пород и канонических рядах атомно-ионных радиусов // ФТПРПИ. — 1996. — № 2. — С. 3–13.
45. Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Акинин А. А., Балмашнова Е. Г. О новой шкале структурно-иерархических представлений как паспортной характеристике объектов геосреды // ФТПРПИ. — 1998. — № 5. — С. 16–33.
46. Зеленин К. Н., Ноздрачев А. Д., Поляков Е. Л. Нобелевские премии по химии за 100 лет. — СПб., 2003. — 872 с.
47. Опарин В. Н., Аннин Б. Д., Чугуй Ю. В. и др. Методы и измерительные приборы для моделирования и натурных исследований нелинейных деформационно-волновых процессов в блочных массивах горных пород. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. — 320 с.
48. Курленя М. В., Опарин В. Н. Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. II // ФТПРПИ. — 2000. — № 4. — С. 3–26.
49. Итоги научной и научно-организационной деятельности за 2012 г. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2013. — 324 с.
50. Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Кулинич Н. А., Рублев Д. Е., Юшкин А. В. О верификации кинематического выражения для волн маятникового типа по данным сейсмических измерений в условиях рудника Таштагольский и мраморного карьера Искитимский // ФТПРПИ. — 2015. — № 2. — С. 3–23.

Поступила в редакцию 9/IV 2017