

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.272.6

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИМИ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ КУЗБАССА

**В. Н. Опарин^{1,4}, Т. А. Киряева¹, В. Ю. Гаврилов²,
Р. А. Шутилов², А. П. Ковчавцев³, А. С. Танайно¹,
В. П. Ефимов¹, И. Е. Астраханцев¹, И. В. Гренив²**

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: coalmetan@mail.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

²Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, E-mail: gavrilov@catalysis.ru,
просп. Академика Лаврентьева 5, 630090, г. Новосибирск, Россия

³Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, E-mail: kap@isp.nsc.ru,
просп. Академика Лаврентьева 13, 630090, г. Новосибирск, Россия

⁴Новосибирский государственный университет,
ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Россия

Представлены экспериментальные данные лабораторных и натуральных исследований по особенностям взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами в угольных пластах Кузбасса различной стадии метаморфизма с учетом влияния температурного фактора. Анализируется связь между напряженно-деформированным состоянием угольных образцов с температурой, а также ИК-излучением. Изучается влияние температуры и микроструктуры угольного вещества в энергомассообменных процессах (изменение массы, выхода летучих, удельной поверхности частиц угля, внутренней энергии релаксации метаноносности, а также влагосодержания). Обсуждается связь между выбросо- и пожароопасностью угольных пластов с позиций единой постадийной термомеханической и термохимической зависимости в поведении угольного вещества при его формировании в натуральных условиях и последующего извлечения ведением горных работ. Введен обобщенный показатель количественного описания петрографических свойств углей, с использованием которого даны классификация и описано распределение петрографических групп угольных пластов районов Кузбасса.

Напряженно-деформированное состояние, температура, уголь, выход летучих, удельная поверхность, структура, пористость, плотность, окисление, горение, выбросоопасность, стадии метаморфизма, классификация

ВВЕДЕНИЕ

Последние годы XX в. ознаменовались крупными достижениями и открытиями, связанными с исследованием и описанием особенностей геомеханического поведения массивов горных пород блочного строения. Современные знания о физико-механических свойствах продуктив-

ных пластов каменного угля, калийно-магниевых и других солей, рудных и нефтегазовых месторождений, несмотря на их существенное различие, тем не менее указывают на наличие общих закономерностей в развитии крупномасштабных геомеханических процессов [1].

Именно такого уровня знания с учетом существенных особенностей протекания геомеханических процессов на конкретных, по существу многофазных, месторождениях полезных ископаемых могут служить основой для построения надежных систем геомеханико-геодинамической безопасности горных предприятий, работающих в условиях повышенного риска по катастрофическим событиям [2, 3]. В известном смысле они обеспечивают «инвариантное» методологическое ядро для разного вида месторождений полезных ископаемых при построении достаточно универсальных геомеханических мониторинговых систем.

В последнее десятилетие в этом направлении ведутся активные исследования и разработки в России и за рубежом большими коллективами исследователей из институтов естественно-научного профиля в рамках междисциплинарных интеграционных проектов [4, 5]. Особое внимание уделяется комплексному исследованию сейсмо-деформационных и эмиссионных акустоэлектромагнитных методов в рамках изучения нелинейных геомеханических процессов, индуцированных ведением горных работ, в том числе в геодинамически активных зонах.

Появилось понимание фундаментальной значимости структурного фактора для объяснения широкой гаммы обнаруженных при этом геомеханико-геофизических явлений и сложных массообменных процессов. Структура горных пород также определяет их физико-химические, физико-механические и технологические свойства. Знание структуры горных пород дает возможность понять формы существования метана в угольном пласте, позволяющие уточнить физико-химические основы управления газодинамическими процессами при ведении горных работ.

Влияние температуры на механические свойства и другие физические характеристики горных пород (электропроводность, скорость распространения упругих волн и др.) также давно известно [6, 7]. Известно и влияние горного давления на физико-механические характеристики горных пород и их массивов, положенное в свое время в основу создания геофизических методов диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния пород [8–10]. И тем не менее актуальность проблемы разработки эффективных методов оперативной и детальной диагностики контроля за изменением температуры в угольных пластах по мере их отработки со временем только возрастает, поскольку температурный фактор является одним из существенно влияющих не только на газодинамическую активность угольных месторождений, но и на процессы самовозгорания и горения угольных массивов. В то же время важна информация и о характере деформирования угля в зависимости от действующих в массиве напряжений.

К настоящему времени в геомеханическом аспекте наиболее изучены два известных термодинамических эффекта: изменение температуры твердого тела при изменении его напряженного состояния и зависимость интенсивности инфракрасного (ИК) излучения с поверхности тела от температуры [11, 12]. Идентифицирован ряд динамических процессов [13] по данным изменений мощности инфракрасного излучения с поверхности различных геоматериалов. Соответствующие исследования для угля авторами данной работы проведены впервые. Известные из предшествующих исследований знания о свойствах и состояниях геовещества угольных пластов, каменной соли, нефтегазоносных массивов и др. указывают на общность геомеханической основы протекающих в них процессов. Все угольные месторождения планеты содержат газ, их разработка сопровождается разного вида газопроявлениями — от квазистатических до динамических, поэтому изучение механохимической основы изменения газонасыщенности углей должно проводиться параллельно.

Уровень развития современных экспериментально-измерительных комплексов позволяет заключить, что блок информации, относящийся к дистанционному контролю за изменением температуры испытуемых образцов горных пород, может формироваться по данным ИК-излучения сканируемых поверхностей на базе двухэкспозиционной спекл-фотографии с применением лазерного измерительного оптико-телевизионного комплекса ALMEC-TV. В. М. Жигалкиным, О. М. Усольцевой и П. А. Цоем впервые проведена серия экспериментов с использованием этой системы по высокоточному и детальному контролю деформационно-волновой картины на песчанике, мраморе и сильвините при различных режимах жесткого одноосного их нагружения до разрушения на прессовой установке “Instron-8802”. По сути, впервые удалось зафиксировать теоретически предсказанный В.Н. Опариным в рамках теории волн маятникового типа процесс “геомеханического кипения» структурных неоднородностей испытуемых образцов геоматериалов перед их разрушением [14].

Установлено, что уже при достижении менее 50 %-го уровня напряжений по отношению к пределу прочности испытуемых образцов пород внутри них возникают низкочастотные процессы микродеформирования между структурными отдельностями. Последние генерируются медленными (квазистатическими) силовыми воздействиями от пресса в режиме жесткого нагружения. Амплитуда таких деформационно-волновых процессов существенно зависит от уровня задаваемого макронагружения. Построены волновые пакеты для осредненных компонентов микродеформации на образцах из песчаника и мрамора при одноосном сжатии. С помощью преобразования Фурье определены соответствующие им амплитудно-частотные характеристики для выделяемых четырех стадий процесса микродеформирования: упругого, нелинейно упругого, постпикового участка и участка остаточной прочности. На стадии предразрушения возникают, а на стадии постпиковой нагрузки сохраняются колебания с частотой 0.5–4 Гц [14].

В случае проявления подобных деформационно-волновых процессов для угольных образцов это означает возникновение неучитываемого ранее “поршневого механизма” движения газожидкостной фазы в угольных геоматериалах, сосредоточенной в основном в поровом и трещинном пространстве, отделяющем между собой двигающиеся в осциллирующем режиме фракталы твердой матрицы.

В настоящее время оценка газокинетических свойств угольных пластов выполняется на основе разработанных в СССР под руководством акад. А. А. Скочинского приложений теории сорбции. Однако уже на глубинах около 250 м, как оказалось [15], газоносность угольного пласта превышает предельно возможную сорбционную способность угля, установленную в лабораторных условиях. С позиций нелинейной геомеханики многофазных геосред, как представляется, следует рассматривать и наблюдаемый в ряде случаев важный эффект выделения газов из угольных пластов, в количественном отношении много большем, чем это можно было бы ожидать исходя из данных метаноемкости образцов угля по данным лабораторных экспериментов. Пока же большинство специалистов, и это отражено в нормативных методических разработках, используют представления и эмпирические зависимости, в известной мере увязанные с теорией сорбции.

В последние десятилетия российскими учеными активно развиваются представления о свойствах углеметанового пласта как твердого углегазового раствора [16]. С открытием волн маятникового типа, изучением деформационно-волновых процессов в окрестностях горных выработок наступил новый этап в понимании реальной сложности решения проблемы обеспечения безопасных условий ведения горных работ при освоении полезных ископаемых на глубоких горизонтах, возникло новое направление исследований — геомеханическая термодинамика [17].

Начиная с определенных глубин и в зависимости от скоростей проходки подготовительных выработок и очистных забоев, степени технологической изрезанности и нарушенности горного массива динамика развития геомеханических процессов в многофазных геосредах определяется не только упругопрочностными и реологическими свойствами твердых компонентов полезных ископаемых (твердой “матрицей”), но и в значительной мере балансовыми соотношениями между внутренней упругой энергией содержащихся в них жидкости и газа, а также внешней упругой энергии, связанной с изменяющимися глобальным геодинамическим и локальным геомеханическим (напряженно-деформированным) состоянием геосреды за счет ведения горных работ.

Совокупность новых знаний позволяет более подробно рассматривать реакцию газового компонента обрабатываемого пласта на изменение геомеханической обстановки в массиве горных пород для повышения надежности технологических решений. Так, при планировании комплекса фундаментальных исследований в натуральных условиях по особенностям протекания термогазодинамических процессов в угольных пластах по мере их отработки необходимо учитывать определяющую роль и более общих геомеханических процессов, включающих специфическое поведение вмещающих их массивов. Как показано в работах Г. Я. Полевщикова с соавт. [18, 19], обобщающих долговременный цикл экспериментальных и теоретических исследований по угольным месторождениям Кузбасса, здесь большая роль принадлежит масштабным зонально-дезинтеграционным процессам в наблюдаемой динамике метанообильности выемочных участков.

В исследованиях, представленных в данной работе, основное внимание уделяется влиянию совокупности факторов, при наличии которых создаются реальные условия для возникновения выбросов угля и газа. Наиболее существенными из них рассматриваются, в частности, блочно-иерархическое строение горных пород, неоднородность их физико-механических свойств, изменения температуры, влажности, глубины обрабатываемых горизонтов угольных месторождений Кузбасса.

Без адекватного физического моделирования термодинамических и физико-химических процессов в углеметановых пластах по мере роста температуры и горного давления с увеличением глубины освоения угольных месторождений в современных условиях практически невозможно рассчитывать на создание надежных мониторинговых систем диагностики и прогнозирования катастрофических событий при отработке угольных пластов на больших глубинах, не говоря уже о формулировании эффективных мер по их профилактике.

Направление настоящих исследований ориентировано на моделирование и изучение геомеханических и газодинамических особенностей протекания сложных процессов в углеметановой среде с учетом новых знаний о свойствах многокомпонентных геоматериалов.

Большое внимание уделено разработке комплексного метода оценки газодинамической активности углеметановых пластов. В качестве базовых рассматривались, в первую очередь, горно-геологические условия Кузнецкого угольного бассейна, горнотехнологические особенности освоения которого достаточно многообразны и широко известны [20].

О СВЯЗИ МЕЖДУ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ УГОЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ И ТЕМПЕРАТУРОЙ: ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальными исследованиями свойств углеметановых пластов в [13, 14] установлено, что фазовое состояние метана определяется тем, что значительная его часть заключена в составе твердого раствора с углем, другая часть связана с ним силами сорбции, а небольшое количество представлено свободным газом. Процесс распада углеметана на уголь и метан про-

текает с выделением упругой энергии, приводящей не только к динамическому разрушению угля, но и к выносу его значительной части в горную выработку потоком выделяющегося газа. Поэтому разработка модели геомеханического состояния угленосного массива, в которой роль метана является одной из основных, способна значительно расширить возможности принятия технологических решений по угледобыче с обеспечением предварительной дегазации обрабатываемых месторождений. Такая модель геомеханического состояния является, по существу, новой. Но для ее применения необходимо установить особенности разрушения газоносного массива при динамически развивающемся опорном давлении с учетом условий развития геомеханических и газодинамических процессов до критического состояния, вызывающего горные удары, а также внезапные выбросы угля и метана.

Решение этой задачи требует создания соответствующего методического, алгоритмического и программного обеспечения, реализующего эту модель и осуществляющего необходимый комплекс экспериментальных исследований.

В этом отношении открытие волн маятникового типа и введение понятия «геомеханическая температура» [17] имеют принципиальное значение для теоретического описания и физического моделирования газодинамических процессов в многофазных фрагментированных геосредах, каковыми являются угольные и нефтегазовые пласты. В отличие от классического понятия температуры, определяемой кинетической энергией движения атомов и молекул, «геомеханическая температура» связывается с кинетической энергией движения структурных элементов (фракталов или блоков) массивов горных пород в приближении абсолютно твердых тел по всей их иерархии. Отличительная особенность волн маятникового типа в сравнении с известными видами упругих волн заключается в том, что их вещественными носителями являются конкретные по размеру структурные элементы породных массивов и геоматериалов за счет трансляционного и вращательного осциллирующих движений [17].

Колебательные движения структурных элементов в данном случае вводят в работу своеобразный «поршневой эффект» знакопеременных относительных движений берегов трещин между этими структурными элементами (фракталами), заполненных полностью или частично жидкостью, газом, газогидратами или мелкими твердыми фракциями геоматериалов. Как известно из работы [21], существует статистически устойчивое соотношение для средних расстояний между берегами трещин δ_i и диаметрами определяемых ими геоблоков Δ_i на различных масштабных уровнях (i) их иерархии (геомеханический инвариант $\mu_{\Delta}(\delta)$):

$$\mu_{\Delta}(\delta) = \delta_i / \Delta_i \in \theta \cdot 10^{-2} \quad \forall_i; \quad \theta \in 0.5 - 2. \quad (1)$$

Возникающий в этой связи класс задач для описания динамического поведения фрагментированных многофазных сред с иерархическим строением, безусловно, весьма сложен для механико-математического анализа. Для эффективного их решения также нужна «априорная» информация об особенностях развития нелинейных «поршневых» процессов, но уже в многофазных фрагментированных геосредах, обусловленных возникновением волн маятникового типа.

При возрастании уровня напряжений, когда деформации геоматериалов выходят за пределы упругости, внутри деформируемого тела начинают развиваться нелинейные процессы, при которых вариации температуры и соответственно интенсивности ИК-излучения становятся значительными. Это дает основу для разработки физических моделей, которые позволили бы по изменениям ИК-излучения оценивать параметры соответствующих нелинейных механических процессов.

Перспективными моделями для описания разрушения угля в ходе газовыделения могут оказаться подходы, основанные на идеях фрактальности углеродных материалов [22]. Фрактальный подход позволяет интерпретировать эффект изменения прочности в горных породах, причина которого связана с механизмом разрушения, структурно-масштабными характеристиками материала и геометрией дефектных множеств. Изменение фрактальной размерности можно оценить из параметров пористой структуры углей.

В угленосных отложениях метан находится в физико-химической связи с углем, образуя преимущественно твердый углегазовый раствор. Эмиссия метана возможна только при нарушении термодинамического состояния системы и распаде указанного раствора. Процесс распада твердого углеметанового раствора протекает с выделением энергии, реализуемой в том числе и на деструкцию твердого компонента пласта с образованием дополнительной внутренней поверхности. Чем выше газоносность угольного пласта, тем интенсивнее газодинамическая деструкция — вплоть до его саморазрушения в форме внезапного выброса угля и газа. При равной газоносности наиболее склонны к саморазрушению угли средней стадии метаморфизма. Чем выше энергия распада, тем больше степень измельчения отторгаемого угля. Возникают условия для развития микротрещин за счет энергии газа. Таким образом, разрушение твердого вещества угля связано с образованием новой внутренней удельной поверхности. Это раскрывает один из возможных подходов к оценке свойств многокомпонентных геоматериалов на основе измерения удельной поверхности проб углей, отобранных применительно к решаемой задаче при различных значениях потенциальной энергии газового компонента твердого углегазового раствора (ТУГР).

В проведенных нами экспериментах впервые в качестве одного из элементов метода реализации указанного подхода использовались приборы DigiSorb 2600 (“Micromeritics”, США), AutoPycnometer-1320 (“Micromeritics”, США), NETZSCH STA 449C Jupiter (“NETZSCH”, Германия), СОРБИ-М (“МЕТА”, Россия) для измерения внутренней удельной поверхности и объема микропор, полного объема пор, получения полной изотермы адсорбции/десорбции при изучении физико-химических свойств угля и газокинетических характеристик углеметановых геоматериалов. Исследование параметров пористой структуры природных углей Кузбасса осуществлялось с использованием адсорбционных методов. При необходимости в дальнейших экспериментах будут привлечены другие экспериментальные методы, например ртутная порометрия и электронная микроскопия.

Важной характеристикой свойств углеродных материалов, определяемой их химическим составом, является истинная плотность. Контроль этой величины осуществлялся прибором AutoPycnometer-1320 по наиболее инертному флюиду — гелию.

Исследование возможно существующих микропор, т. е. пор молекулярного размера, в прокаленных (для удаления летучих компонентов) природных углях проводилось с применением сорбции газообразного молекулярного водорода при температуре 77 К, т. е. при $T > T_{кр}$. В этих температурных условиях не происходит спонтанное объемное заполнение микропор жидкоподобным сорбатом, а характер изменения плотности сорбата по мере роста давления в основном определяется размерами микропор. Данная особенность адсорбционного процесса позволяет проанализировать текстурные характеристики микропористой структуры, в том числе рассчитать распределение объемов микропор по их размерам.

Инфракрасная термография, основанная на зависимости мощности инфракрасного излучения с поверхности контролируемого тела от его температуры, открывает новые возможности для исследования особенностей изменения температурных полей наблюдаемых физических

объектов [23]. Современные компьютеризированные тепловизоры позволяют хранить и обрабатывать большие массивы данных после проведения записи меняющихся во времени температурных полей объектов для их оперативного анализа с помощью сложных и более точных математических моделей.

Согласно [24], при адиабатическом деформировании заданного элемента упругого тела приращение ($\Delta\Pi$) первого инварианта тензора напряжений вызывает приращение его температуры (ΔT):

$$\Delta T = A_m T_0 \Delta\Pi, \quad (2)$$

где $A_m = \alpha / (\rho C)$, α — коэффициент линейного расширения, C — удельная теплоемкость при постоянном давлении, ρ — плотность материала; T_0 — начальная температура.

Следовательно, измеряя ΔT , можно определять $\Delta\Pi$ — получать информацию об изменении напряженного состояния контролируемого элемента твердого тела во времени [15].

При возрастании уровня напряжений, когда деформации геоматериалов выходят за пределы упругости, внутри деформируемого тела начинают развиваться нелинейные процессы, в условиях которых вариации температуры и интенсивности ИК-излучения становятся значительными, в том числе и за счет внутреннего трения между отдельностями. Это дает основу для разработки физических моделей, которые позволили бы по изменениям ИК-излучения оценивать параметры соответствующих нелинейных механических процессов.

Однако реализация этой идеи в идеальных условиях затруднена тем, что, например, для угля имеем следующие ориентировочные значения контролируемых параметров: $\alpha = 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, $\rho = 1400 \text{ кг/м}^3$, $C = 1.5 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, $\Delta T = 0.003 \text{ К}$. Для такого малого изменения температуры обеспечить требуемую точность измерений достаточно сложно. Тем не менее, как показали результаты, полученные методом бесконтактной ИК-радиометрии [25], имеются реальные возможности ее использования при контроле изменений температуры при лабораторных измерениях, поэтому она может применяться как одна из составляющих оперативного дистанционного геомониторинга.

К достоинствам ИК-метода можно отнести следующие его возможности [25, 26]:

- фиксация изменения температуры с точностью от нескольких тысячных до нескольких сотых долей градуса;
- получение информации в реальном масштабе времени со всего поля кадра или выбранной области поверхности деформируемого тела;
- анализ выделенных участков на термограммах (усреднение, выбор максимальных и минимальных температур выделенных областей на термограммах, построение графиков температур вдоль выделенных линий на термограммах и т. д.);
- длительность записи термографического фильма без потери информации о температуре в любой точке термограммы.

С другой стороны, существуют ограничения возможностей этого метода. Одно из них — измерения проводятся только на поверхности образца, второе — необходимость выполнения условия адиабатичности при использовании формулы (2). Деформирование твердого тела, как известно, будет адиабатическим, если скорость изменения его деформаций, а значит и температуры, существенно превышает скорость его теплообмена с внешней средой. В работе [25] показано, что для периодических изменений напряженного состояния во времени с частотами порядка 1 Гц и пространственного масштаба деформаций, сравнимого с размерами образца, условие

адиабатичности выполняется даже при свободном теплообмене с окружающей средой. Поскольку при увеличении характерного размера области деформации скорость теплообмена падает [27], то при наблюдениях, например, в забое скважины в массиве условие адиабатичности процесса деформирования окрестных пород может приниматься с достаточной обоснованностью.

В лабораторных экспериментах использовался компьютерный тепловизор ТКВр — ИФП “СВИТ”, разработанный и изготовленный в Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН [28], который предназначен для исследований в реальном масштабе времени (рис. 1) с предельной температурной чувствительностью 0.007 К и частотой кадров 100 Гц, а также диапазоном измерения температуры 10–42° С, оптическим полем зрения 128×128 пикселей, диапазоном фокусировки от 250 мм до “бесконечности”. Для его использования в рабочем помещении необходимо исключить блики отраженного света.

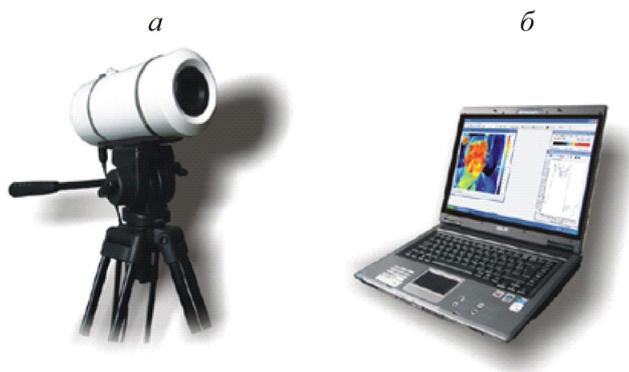


Рис. 1. Тепловизионная камера (а) и портативный компьютер с программным обеспечением (б)

Испытания механических свойств образцов угольного керна проводились в ЦКП ИГД СО РАН на сервогидравлическом прессе INSTRON 8802 с предельной нагрузкой 350 кН и жесткостью 200 МН/м в жестком режиме нагружения (программа нагружения задается по перемещению захватов) с автоматической записью в память компьютера результатов эксперимента и построением диаграмм деформирования в координатах “нагрузка–продольная деформация”. Оборудование, соответствующее требованиям международных стандартов, позволяет получать прочностные и деформационные характеристики на всех стадиях нагружения породных образцов вплоть до их разрушения. Использовались угольные образцы высотой около 5 см и сечением 25 см². В экспериментах осуществлялись непрерывное измерение и запись осевой нагрузки, продольных деформаций по высоте образца с помощью лазерного оптико-телевизионного автоматизированного комплекса ALMEC-tv, который позволяет проводить измерение с частотой до 27 кадр/с при пространственном разрешении по смещениям не хуже 1 мкм.

В экспериментах использовалась специально созданная металлическая камера, расположенная на высоте 1.5 м над уровнем пола, с регулируемым от пресса давлением, в которой находилась экспериментально-измерительная установка (рис. 2). Камера является оптически прозрачной со стороны дистанционно сканируемых поверхностей испытываемых образцов, в дальнейшем планируется оснастить ее измерительными средствами оперативного анализа химического состава газовой атмосферы и температуры. На расстоянии 25 см напротив образца 1 на одной и той же высоте располагались тепловизор и комплекс ALMEC-tv.

В выполненных экспериментах измерены термограммы для 9 образцов трех шахтопластов Кузбасса с различными физико-химическими свойствами (газоносность 13–20 м³/т, выход летучих веществ 20–36 %, глубина залегания пластов 200–600 м).

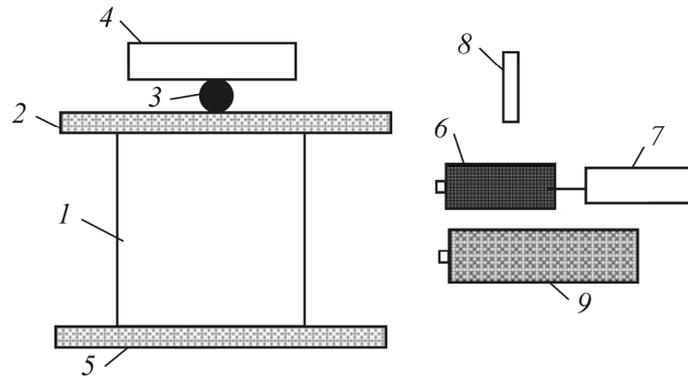


Рис. 2. Схема экспериментально-измерительной установки: 1 — угольный образец; 2, 5 — стальные пластинки; 3 — шариковая опора; 4 — подвижная траверса; 6 — тепловизор; 7 — компьютер; 8 — комнатный термометр; 9 — комплекс ALMEC-tv

На рис. 3 показано типичное распределение температуры в образце угля и окружающем пространстве перед его разрушением. Температура окружающей среды по данным тепловизора составляла 23.87°C . На термограмме также указаны температурные метки в трех точках по вертикальной оси образца: на верхней границе, в центре и на нижней границе.

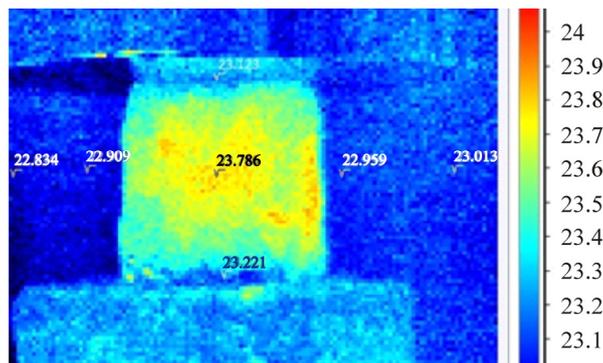


Рис. 3. Тепловое изображение образца угля с метками температуры на поверхности перед его разрушением

Измерения температуры со временем нагружения проводились по всей поверхности образца. Для демонстрации возможностей метода на рис. 4 приведен типичный график термограммы для усредненного значения температуры от времени нагружения в центральной области поверхности угольного образца в квадрате $1 \times 1 \text{ см}^2$.

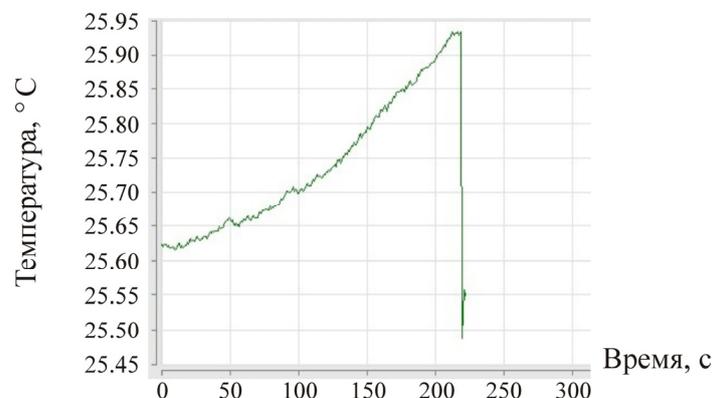


Рис. 4. Зависимость температуры от времени нагружения в центре одного из образцов угля

Как следует из формулы (2), функция ΔT должна описывать изменения напряжений по вариациям ИК-измерений в предположениях об адиабатичности деформирования и отсутствии значительных шумов [29]. Получены зависимости температуры угольного образца от уровня задаваемого напряжения на его границах, в центре, а также по горизонтальной оси (рис. 5, 6).

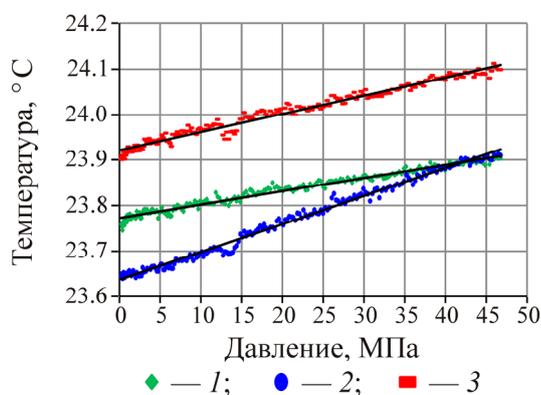


Рис. 5. Зависимость температуры образца от напряжения до разрушения: 1 — на нижней границе образца; 2 — в центре; 3 — на верхней границе

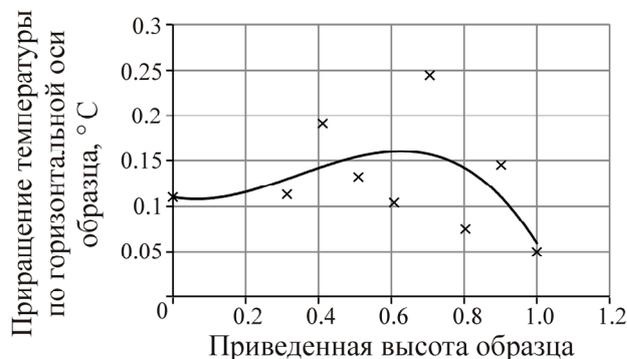


Рис. 6. Распределение приращения температуры по горизонтальной оси образца угля при его нагружении перед разрушением

Как видно из приведенных графиков, при возрастании уровня напряжений образцов вариации температуры и интенсивности ИК-излучения увеличиваются. Полученные результаты экспериментально подтверждают выводы работы [24] о том, что приращение тензора напряжений прямо пропорционально приращению температуры для образцов угля с различными физико-химическими свойствами. Выше было показано, что при $\Delta P = 40$ МПа в “идеально упругом” образце угля приращения температуры составляют $\Delta T = 0.003$ К. В наших экспериментах на углеметановых образцах это приращение на два порядка больше (около 0.3 К), что можно объяснить развитием нелинейных деформационно-волновых процессов на микроструктурном уровне внутри образцов, ранее не учитываемых.

Таким образом, по изменению температуры образца угля можно количественно оценивать изменение его напряженно-деформированного состояния. Более того, как оказывается, при нагружении образца в процессе его деформирования происходит выделение добавочной кинетической энергии, что согласуется с введением в [14] понятия “геомеханическая температура”.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И МИКРОСТРУКТУРЫ УГОЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА В ЭНЕРГО-МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССАХ: ИЗМЕНЕНИЕ МАССЫ, ВЫХОДА ЛЕТУЧИХ, УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЦ УГЛЯ, ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ РЕЛАКСАЦИИ МЕТАНОНОСНОСТИ И ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ

Важной характеристикой газодинамической активности угольных пластов является пористая структура ископаемых углей, обладающих запасенной внутренней энергией релаксации системы (E) при ее переходе из одного метастабильного состояния в другое.

Такие представления о свойствах ископаемых углей базируются на многообразии процессов их формирования в природных условиях (степени метаморфизма) с образованием углеродных систем определенной пористой структуры, а также с изменяющимися термомеханическими и физико-химическими свойствами [30].

При нарушении исходных геомеханического и термодинамического равновесных состояний угольных пластов в результате ведения горных работ начнет активно проявлять себя трещиновато-пористая структура угольного вещества в инициируемых энергомассообменных

процессах как между продуктивными пластами и вмещающими породами, так и внутри слагающих их геоматериалов. Уровень такой “активности” будет зависеть от реальных значений “напряжений – деформаций» и температур, испытываемых геовеществом углепородных массивов, а также от их пространственных градиентных свойств. Последние в значительной степени определяются как макро-, так и микроструктурными свойствами — блочно-иерархическим строением многофазных углепородных массивов.

В настоящей работе сделана попытка оценить роль микроструктурного фактора угольного вещества различной степени метаморфизма в подобного рода энергомассообменных процессах в лабораторных условиях. Испытанию и анализу подвергались природные угли Кузбасса (ряд образцов) методами термогравиметрии (ТГ), газовой пикнометрии, а также адсорбционными методами с использованием аргона и азота.

Термический анализ (ТА) угольных образцов проводили на приборе NETZSCH STA 449C Jupiter (“NETZSCH”, Германия) в инертной среде (He) и области температур 30–1000°С со скоростью нагрева 10 град/мин. Навеска мелко размолотого образца угля составляла 20 мг.

Удельную поверхность углей S (м²/г) измеряли для фракций в диапазоне 0.5–1 мм (S_1) и для измельченной фракции ~ 0.05 мм (S_2) методом термодесорбции аргона при температуре 77 К по четырем точкам сорбционного равновесия на приборе СОРБИ-М (“МЕТА”, Россия). Образцы предварительно тренировали в инертной среде при температуре 150°С. Расчет удельной поверхности проводили по классической процедуре БЭТ [31].

Исследование пористой структуры образцов осуществляли методом низкотемпературной (77 К) сорбции азота на установке DigiSorb 2600 (“Micromeritics”, США). Перед началом сорбционных экспериментов образцы выдерживали в вакууме 10–4 мм рт. ст. при температуре 150°С в течение 5 ч. Истинную плотность ρ (по ГОСТу 22524 измеряется в г/см³) углей измеряли волюмометрическим методом по гелию на приборе AutoPycnometer-1320 (“Micromeritics”, США).

По всем исследованным образцам природных углей проведен термогравиметрический анализ (ТГ) для определения оставшейся массы образца при его нагревании (первоначальная масса взята за 100 %). Как видно из рис. 7, все образцы теряют в массе при нагреве, но с разной интенсивностью в явно выделяющихся интервалах температур: 40–50°С, 400–500°С и более. Таким образом, все экспериментальные данные распадаются на типовые для трех серий образцов. На рис. 8 приведена полная совокупность данных ТГ, ДТГ-производной ТГ по времени (синий цвет) и ДТА (дифференциальный термический анализ) для всех исследованных угольных образцов (красный цвет).

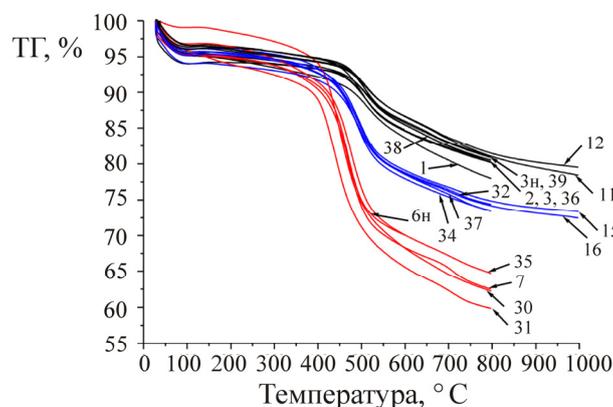
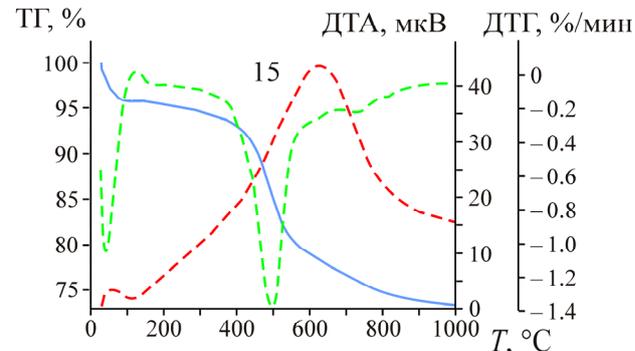
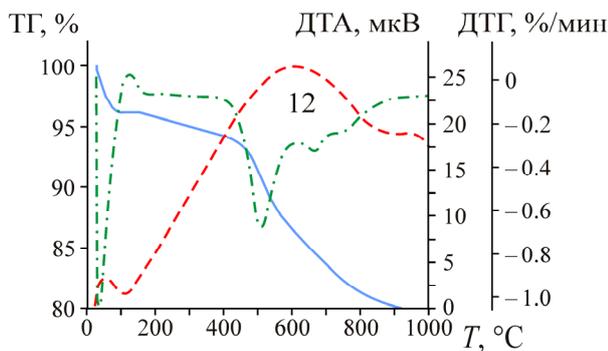
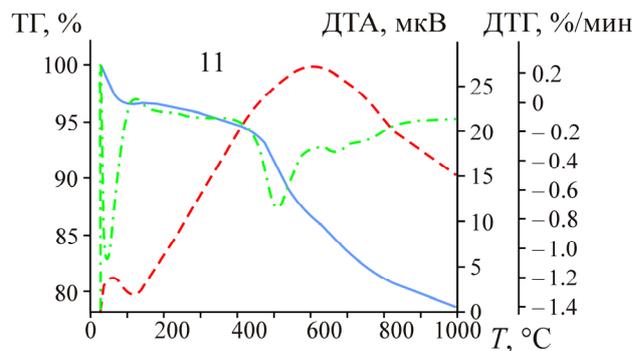
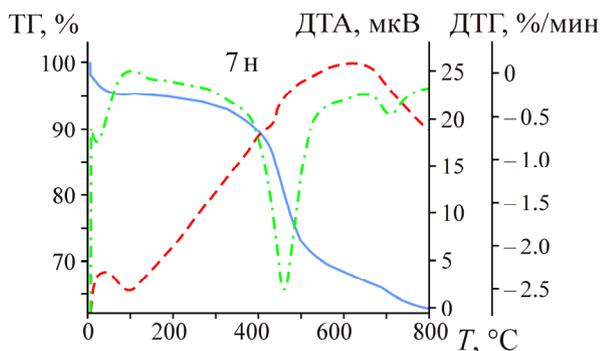
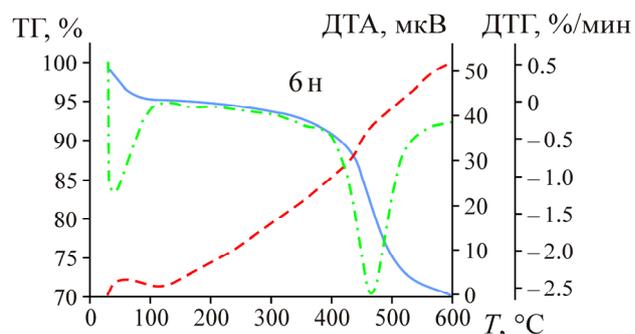
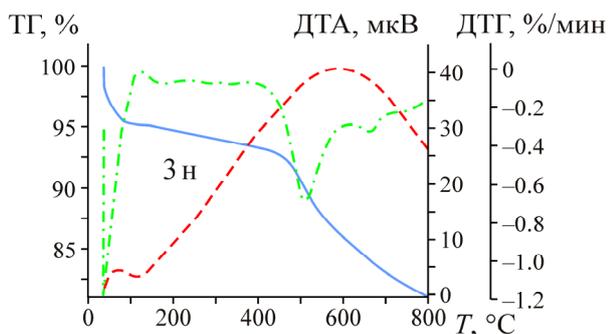
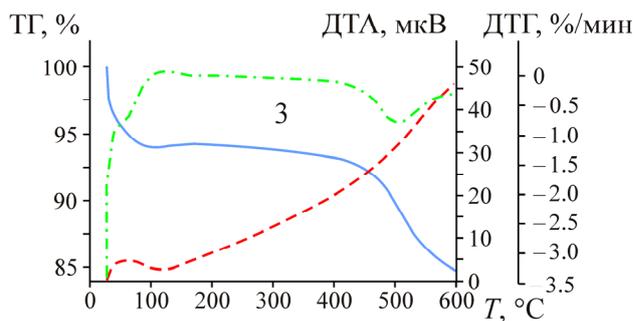
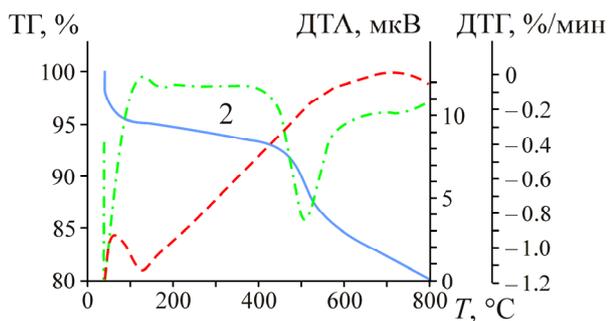
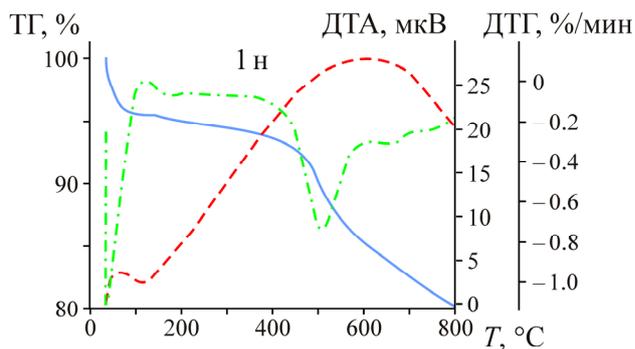
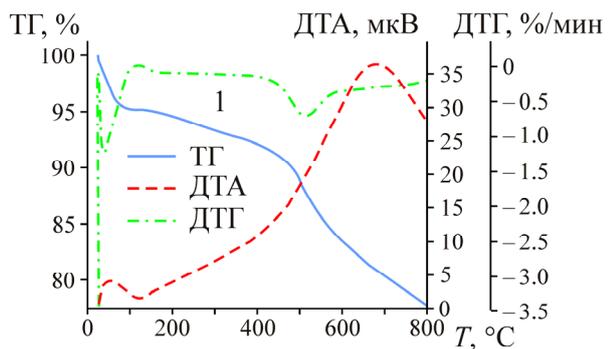


Рис. 7. Процентное изменение массы ТГ для всех исследованных образцов природных углей с ростом температуры. Цифры у кривых — номера образцов



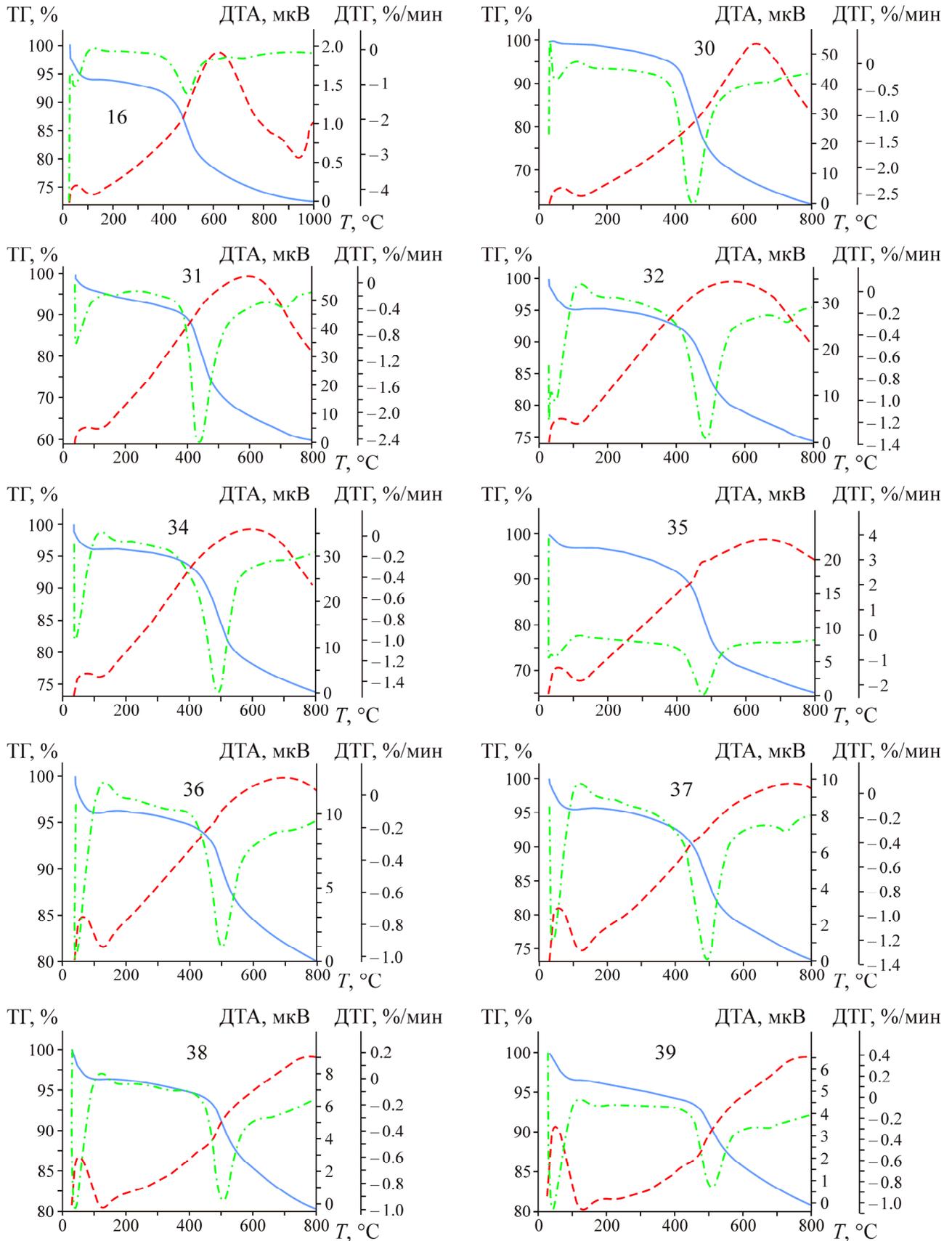


Рис. 8. Данные ТГ, ДТГ и ДТА потери массы для исследованных образцов углей. Цифрами обозначены номера образцов

Исследования показали, что потеря массы Δm (в % от первоначальной) для большинства угольных образцов происходит преимущественно в двух температурных интервалах: Δm_1 при 40–50°С (T_1) и Δm_2 при 440–510°С (T_2). Совокупность данных по ТГ и ДТГ приведена в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Изменение массы для всех образцов Δm при температуре T по данным ДТГ

Образец	$T_1, ^\circ\text{C}$	$\Delta m_1, \%$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$\Delta m_2, \%$	Образец	$T_1, ^\circ\text{C}$	$\Delta m_1, \%$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$\Delta m_2, \%$
1	42	4.4	513	8.2	16	47	6.0	493	13.3
2	38	4.9	506	10.6	30	49	0.7	450	31.1
3	47	6.0	506	8.7	31	39	4.6	436	28.8
1н	38	4.0	510	8.9	32	47	4.8	487	18.2
3н	38	4.8	508	7.8	34	39	3.9	488	19.3
6н	39	4.8	466	21.6	35	48	3.5	476	21.5
7н	47	4.7	469	24.5	36	40	3.9	500	10.3
11	45	3.4	509	8.2	37	43	4.5	493	16
12	40	3.9	509	8.0	38	41	3.5	505	9.9
15	41	4.3	494	14.4	39	43	3.7	507	9.1

Как видно из приведенных данных, изменение массы Δm_2 при T_2 носит более сложный характер, чем массы Δm_1 при T_1 , достигая в среднем 15 %.

На рис. 9 приведены корреляционные зависимости изменения Δm_2 от температуры T_2 и выхода летучих веществ V^{daf} . Исследуемые образцы углей содержат разные формы летучих компонентов, которые можно условно разделить на сильно- и слабосвязанные со структурой или зависящие от собственных физико-химических свойств. Свойства этих летучих форм проявляются и характеризуются температурой удаления. Следовательно, для одних образцов (30, 31) преобладают слабосвязанные формы, а для других (1, 1н, 3, 11, 12) — относительно прочные.

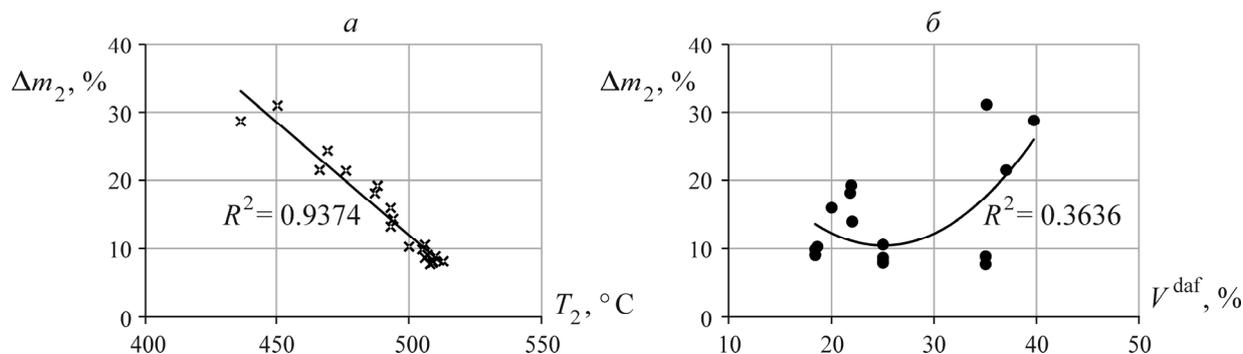


Рис. 9. Зависимости изменения массы Δm_2 для проб исследованной серии углей Кузбасса: а — от температуры; б — от выхода летучих веществ

Зависимость Δm_2 от выхода летучих веществ показывает, что относительно прочные связи характерны для углей с V^{daf} от 18 до 25 %. Примечательно, что по данным ДТА (рис. 8), удаление летучих форм для некоторых образцов сопровождается эндозффектами при температуре, несколько превышающей T_2 . Это может являться следствием десорбции летучих компонентов. Кроме того, отсутствие экзоэффектов ДТА свидетельствует об отсутствии окисления углеродсодержащих соединений в ходе термического анализа. Пик ДТА в области 40–50°С связан с особенностями проведения эксперимента и не имеет физико-химического значения для исследуемых геоматериалов.

Удельную поверхность образцов (S , м²/г) измеряли по адсорбции аргона при температуре 77 К (рис. 10), а расчет проводили по методу БЭТ (рис. 11). При некотором измельчении исходной фракции угля (образцы 3 и 12) происходило значительное возрастание сорбции аргона, что является следствием роста доступной поверхности.

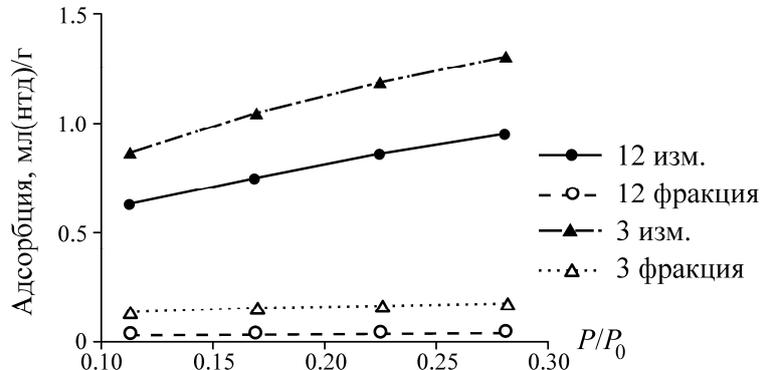


Рис. 10. Изотермы адсорбции Аг при температуре 77 К для образцов 3 и 12 углей Кузбасса: фракции 3 и 12 — исходные, 3 изм. и 12 изм. — измельченные

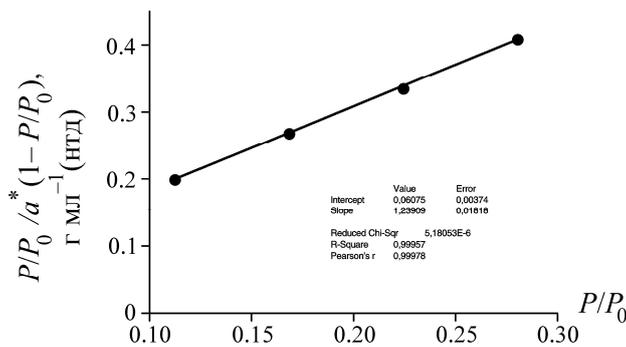


Рис. 11. Пример обработки изотермы адсорбции Аг на образце 12 изм. по процедуре БЭТ

В табл. 2 приведены значения удельной поверхности природных углей. Из таблицы следует, что образцы с фракцией 0.5–1 мм (S_1) достаточно грубодисперсные; расчеты среднего размера частиц, обеспечивающих данное значение поверхности, показывают, что он составляет около 10 мкм. Поверхность измельченных углей (S_2) значительно больше.

ТАБЛИЦА 2. Значения удельной поверхности образцов углей

Образец	S , м ² /г		Образец	S , м ² /г	
	S_1	S_2		S_1	S_2
1	0.5	5.4	16	0.14	4.2
1н	0.34	4.2	30	0.15	—
2	0.8	4	31	0.29	—
3	0.6	4.9	32	—	3.2
3н	0.8	5	34	—	2.9
6н	0.3	3.5	35	—	0.7
7н	—	3.5	36	—	3.5
11	0.4	3.7	37	—	2.8
12	0.15	5.7	38	—	4.2
15	0.17	3.3	39	—	2.4

Рост удельной поверхности при измельчении не может быть связан с ростом дисперсности первичных частиц угля при измельчении образцов в ступке и обусловлен наличием в образцах углей «закрытой» пористости, которая становится доступной лишь при измельчении.

В угленосных отложениях метан находится в физико-химической связи с углем, образуя преимущественно твердый углегазовый раствор. Эмиссия метана возможна только при нарушении термодинамического состояния системы и распаде этого раствора. Процесс распада твердого углеметанового раствора протекает с выделением энергии, реализуемой в том числе и на деструкцию твердого компонента угольного пласта с образованием дополнительной внутренней поверхности. Чем выше газоносность угольного пласта, тем интенсивнее происходит газодинамическая деструкция — вплоть до его саморазрушения в форме внезапного выброса угля и газа. При равной газоносности наиболее склонны к саморазрушению угли средней стадии метаморфизма. Чем выше энергия распада, тем больше степень измельчения отторгаемого угля. Возникают условия для развития микротрещин за счет упругой энергии газа. Таким образом, разрушение твердого вещества угля связано с образованием новой внутренней удельной поверхности.

Исследованы пробы углей с выходом летучих веществ от 18 до 43 % для пяти шахтопластов Кузбасса. Это позволило эмпирически установить зависимости роста внутренней удельной поверхности частиц отбитого угля $S_{уд}$ для разных по коэффициенту f крепости угля (по Протождяконову), а также силы F внезапных выбросов угля и газа (рис. 12) от внутренней энергии углеметана E .

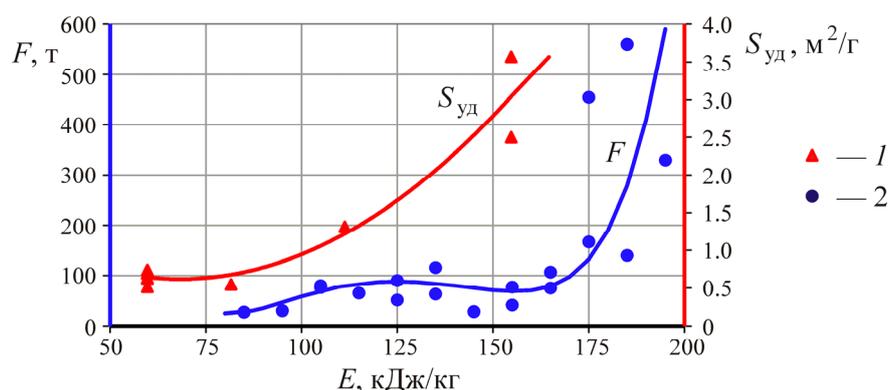


Рис. 12. Зависимость удельной поверхности угля $S_{уд}$ и силы внезапных выбросов F от внутренней энергии углеметана E : 1 — экспериментальные значения удельной поверхности угля; 2 — усредненные статистические данные силы выброса

Близкая к отмеченной связь с внутренней энергией углеметана установлена и по отношению к силе внезапных выбросов угля и газа (ВВУГ). Для этого были собраны и обработаны статистические данные шахт Карагандинского, Кузнецкого и Печерского бассейнов о зарегистрированных в период с 1943 г. по настоящее время 197 случаях внезапных выбросов. Из данной выборки исключены выбросы силой менее 20 т, так как эти газопроявления по их механизму принято относить к слабым газодинамическим явлениям. Оставшиеся 114 случаев распределены по группам с градацией по внутренней энергии углеметана через 10 кДж/кг. В каждой группе определена средняя сила выброса (см. рис. 12 синие точки).

Таким образом, изменение внутренней удельной поверхности частиц угля (деструкция) и интенсивность саморазрушения пласта имеют близкий физический механизм, связанный с реализацией упругой энергии газового компонента геоматериала.

Оперативное решение задач обеспечения газовой безопасности шахт требует применения экспресс-методов. Следовательно, одним из таких методов диагностики геомеханического состояния пластов угля должен являться метод заблаговременного определения удельной поверхности проб углей, отобранных в том числе и в действующих забоях.

Исследование параметров пористой структуры (размер и объем пор) углей с использованием адсорбции азота при температуре 77 К показало, что образцы угля имеют преобладающие размеры в области типичных макропор ($d > 100$ нм) и не могут достоверно изучаться методами капиллярной конденсации. В ходе дальнейших исследований планируется использовать более подходящий для этих целей метод ртутной порометрии. В табл. 3 приведены измеренные значения истинной плотности углей Кузбасса (ρ_1 — плотность образца после хранения; ρ_2 — плотность “свежего” образца).

ТАБЛИЦА 3. Значения истинной плотности углей Кузбасса

Образец	ρ , г/см ³		Образец	ρ , г/см ³	
	ρ_1	ρ_2		ρ_1	ρ_2
1	1.447	1.370	30	2.066	1.308
1изм.*	1.334	—	31	2.779	1.366
3	1.418	1.364	31изм.	1.996	—
11	1.457	1.395	32	—	1.381
12	1.544	1.380	34	—	1.369
15	1.456	1.306	35	—	1.397
15(изм.)	1.420	—	36	2.081	1.489
16(изм.)	1.355	1.348	37	—	1.373
12	1.389	—	39	2.106	1.471

* изм. — измельченная фракция

Установлено, что со временем хранения угля после забора проб в шахте ослабевают связи углеметановом веществе, в том числе и связь метана с веществом угля. В частности, изучено изменение плотности угольных образцов при их измельчении, а для ряда образцов — в ходе хранения (рис. 13, 14).

Значение плотности ρ_2 соответствует типичной плотности для каменных углей (1.3–1.4 г/см³) различной стадии метаморфизма.

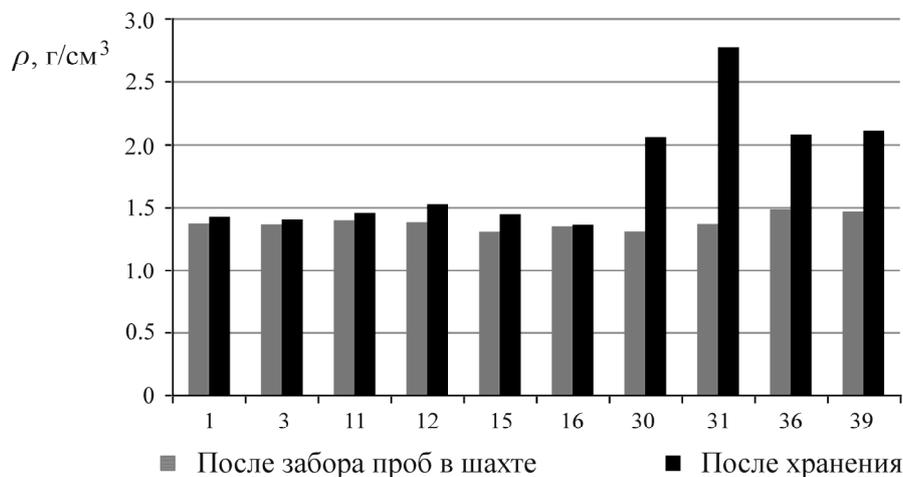


Рис. 13. Изменение истинной плотности образцов углей при хранении

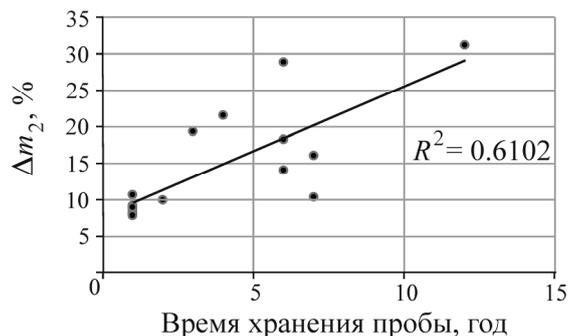


Рис. 14. Зависимость потери массы проб углей при 500 °С от времени их хранения

Исследования показали, что со временем хранения угля ослабевают связи в углеметановом веществе, в том числе и связь метана с веществом угля. У проб углей при сроке хранения 12 лет потери массы при нагревании до 500° С почти в 3 раза больше, чем при их хранении в течение года. Это подтверждает и зависимость внутренней энергии E релаксации метаноносности от изменения массы угля. На рис. 15 приведена корреляционная зависимость внутренней энергии релаксации метаноносности и изменения массы угольных образцов при T_2 (см. табл. 1).

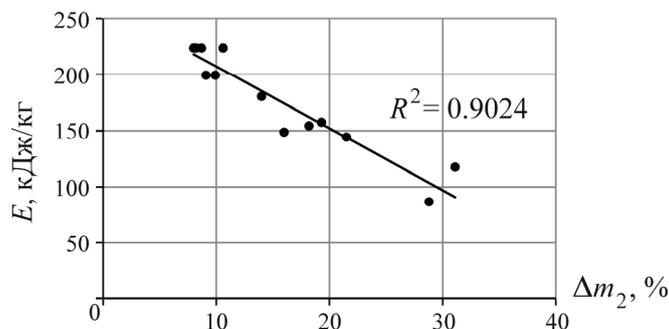


Рис. 15. Зависимость внутренней энергии релаксации метаноносности от массы угольных образцов Кузбасса

Видно, что наличие в образцах трудноудаляемых (сильносвязанных) форм летучих компонентов (пробы 1, 3, 38, 39) приводит к росту энергии релаксации метаноносности, и наоборот, легкоудаляемые формы (пробы 30, 31) обладают меньшими значениями E .

В настоящее время можно лишь предположить, что это обусловлено различной способностью метана растворяться в этих формах “жидкоподобных” компонентов каменных углей, что требует дополнительных исследований. С другой стороны, как показано в [30], внутренняя энергия углеметана максимальна для углей средней стадии метаморфизма. Образцы с прочными видами связи имеют выход летучих от 18 до 25 % и относятся к средней стадии метаморфизма угля, которая является наиболее выбросоопасной.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В СРАВНЕНИИ С ДАННЫМИ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

На рис. 7 и 8 первый температурный интервал (40–50° С) условно можно идентифицировать как “геомеханический”. В работе [32] показано, что при отработке угольных месторождений этот температурный диапазон нередко достижим в зонах опорного давления. Следовательно, вокруг вновь образуемых обнажений угольных пластов в таких термодинамических условиях необходимо учитывать индуцирование горными работами в массиве энергомассообменных процессов вокруг выработок, где изменение общей массы Δm_1 может составлять около

4 % (см. табл. 1), что весьма значительно. Указанный температурный диапазон можно рассматривать как опасный по “самопроизвольному” газовыделению слабосвязанных углеметана и жидкой фазы при ведении горных работ на соответствующих данному интервалу температур глубинах (одно из условий выбороопасности пластов).

Так, в работе [32] приведены важные для обсуждаемых массообменных процессов данные (рис. 16), касающиеся изменения температуры образцов угля во времени в зависимости от влагосодержания воздушной “атмосферы”.

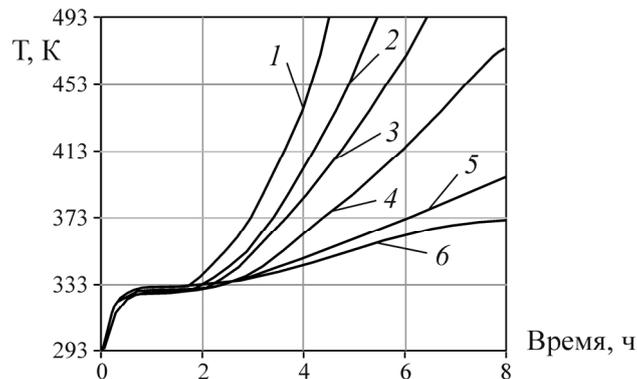


Рис. 16. Зависимость температуры угля при окислении от влагосодержания воздуха, кг/кг: 1 — $11.5 \cdot 10^{-3}$; 2 — $15.0 \cdot 10^{-3}$; 3 — $20.0 \cdot 10^{-3}$; 4 — $29.0 \cdot 10^{-3}$; 5 — $48.8 \cdot 10^{-3}$; 6 — $62.5 \cdot 10^{-3}$ [32]

Приведенные зависимости практически единообразны (вплоть до их “слияния”) на начальном временном интервале (0–2 ч) с выходом (интервал 1–2 ч) на “плато” при установившихся температурах окисления угля в диапазоне 50–60° С. Далее (после 2 ч) следует временной период при ярко выраженной “бифуркации” процессов окисления образцов угля с общей тенденцией быстрого нарастания температуры разогрева и большого влияния влагосодержания окружающего воздуха (в данном случае от $11.5 \cdot 10^{-3}$ до $62.5 \cdot 10^{-3}$ кг/кг) на снижение скорости роста температуры.

В то же время отмечено существенное изменение собственной влажности образцов угля в процессе их окисления на момент окончания стадии выпаривания (от “исходной” 5.2 % до “конечной” 1.7 %) при достижении температуры угля 90° С. Стадия интенсивного химического окисления угля наступает в данном случае лишь после снижения исходной собственной влажности примерно на 70 %. Указанным обстоятельством — “стадия интенсивного окисления с последующим переходом в стадию самовозгорания быстрее перейдет уголь с меньшей исходной влажностью” — В. А. Скрицкий объясняет высокую эндогенную пожароопасность шахт Прокопьевско-Киселевского района Кузбасса, где разрабатываемые крутые пласты угля обладают пластовой влажностью, обычно не превышающей 3.0–3.5 %. “Крутые пласты” в данном случае свидетельствуют также о приуроченности угольных шахт этого района к тектонически активному обрамлению Алтае-Саянского складчатого пояса по фактору геодинамического влияния (в частности, наличия разноуровневых разрывных нарушений).

В этой связи обратим внимание на то, что в приведенных выше данных наблюдается различие примерно на 10° С между температурой выпаривания влаги угольных образцов (~ 90° С) и температурой кипения воды (100° С). Подобного рода “температурные лаги”, по-видимому, можно рассматривать для углей разных марок (или стадий метаморфизма) как значимые геомеханико-термохимические условия инициирования влаго- и газообменных процессов в угольных массивах, приводящих к возникновению очагов самовозгорания угля.

Действительно, эту температурную зону ($\sim 90 - 100^\circ\text{C}$) логично связать с условием активного выхода естественной влаги из поро-трещинной структуры угля за счет их термохимического разогрева. Однако высвобождение определенных объемов влаги из угля должно одновременно сопровождаться возникновением зон декомпрессий внутри контролируемых объемов, некомпенсируемых действием горного давления и внутренним давлением остаточного газового компонента в высвобождаемом от жидкости поро-трещинном пространстве. В результате это должно приводить к встречному процессу всасывания воздуха из выработок или разломно-трещинного пространства внутри угленосного массива. Естественно, интенсивность процесса образования и размеров зон “декомпрессии” в контролируемых объемах угля будет существенно зависеть от структуры, физико-химических и механических свойств углей (марка, стадии метаморфизма) и их массивов, господствующего температурного фона и изменений напряженно-деформированного состояния пород.

При падении давления газа в порах угля происходит его десорбция и расширение, связанные с поглощением теплоты адсорбции и падением внутренней энергии расширяющегося газа; падение температуры компенсируется притоком тепла от окружающей среды, причем интенсивность этого процесса тем выше, чем больше удельная поверхность угля.

Влага в угле быстрее забирает тепло и передает его метану, следовательно, быстрее понижает температуру угля и не позволяет ему нагреваться [33]. С другой стороны, вода способствует набуханию и растрескиванию угля, что в свою очередь увеличивает скорость распада ТУГР и в конечном счете количество десорбирующегося метана. Процессы расширения приобретают тем большую скорость, чем больше пористость угля. В процессе десорбции потеря тепла при охлаждении метана “мгновенно” компенсируется за счет притока тепла из воды.

Молекулы воды обладают большим сродством к поверхности угля, чем молекулы метана [34], и присутствие воды в угле должно значительно снижать его сорбционную метаноемкость. Результаты подтверждают существование значительной части метана в пласте по типу твердого раствора и известный факт снижения газодинамической активности пласта при его увлажнении (рис. 17).

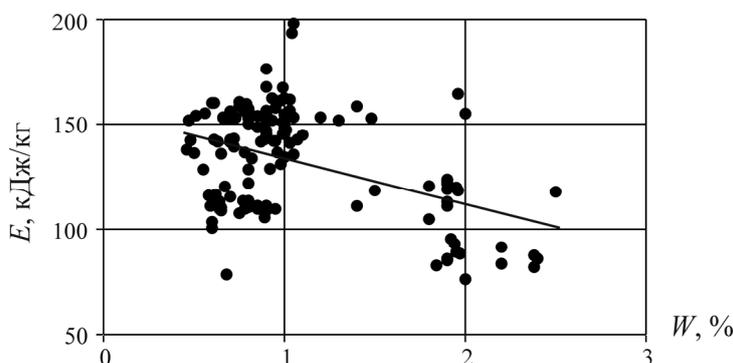


Рис. 17. Снижение энергии газового компонента угольного пласта с ростом его влажности

Поскольку, как показано выше, вклад собственно горного давления в изменение диапазона температур сравнительно невелик, профилактические меры по борьбе с внезапными выбросами угля и газа в подобного рода геомеханико-термодинамических условиях отработки угольных пластов могут быть связаны либо с использованием технологий понижения господствующего температурного фона угольного массива в зонах влияния очистных работ, либо с обеспечением “плавного перехода” температурного фона за пределы зоны температур $40 - 50^\circ\text{C}$ в более высокотемпературную зону. Последнее обстоятельство, на первый взгляд, можно рассматривать как довольно парадоксальное.

Однако оно перестает быть таковым, если обратить внимание на второй (рис. 7, 8) температурный интервал $440-510^{\circ}\text{C}$, для которого потеря исходной массы для Δm_2 достигает в среднем около 15 %. Этот температурный интервал примечателен тем, что с ним связаны процессы самовозгорания и горения угля на подземных горизонтах. Поэтому условно его можно назвать зоной высокотемпературных физико-химических процессов в углепородных массивах.

На первый взгляд, это совершенно разные процессы и отвечающие им температурные зоны. Следовательно, к проблеме выбросоопасности угольных пластов температурный диапазон $440-510^{\circ}\text{C}$ имеет как будто бы слабое касательство. Тем не менее, по-нашему мнению, глубинная связь здесь существует и на нее до сих пор, по-видимому, не обращали внимание. Наличие практически единых зависимостей, представленных на рис. 7, 8, может свидетельствовать о том, что на самом деле пожаро- и выбросоопасность угольных пластов — следствие единого геомеханико-термодинамического и физико-химического процесса, происходящего в угольных пластах при их отработке. В определенном смысле он должен быть квазиобратимым к тем энерго-массообменным процессам, что испытали исходные органогенно-насыщенные осадочные отложения в геологический отрезок времени их формирования по стадиям метаморфизма. ***По представлениям В. Н. Опарина [22], в основе формирования месторождений углеводородного ряда (графит → угли → асфальтены → нефть → газ,...), сопряженного с магматическими месторождениями, лежит единый геомеханико-термодинамический и физико-химический процесс (геокрекинговый механизм), реализовавшийся в известные крупные тектоно-магматические эпохи истории развития Земли. С этих позиций рис. 7, 8 содержат информацию о геомеханико-геодинамических, термодинамических и физико-химических условиях формирования угольных пластов для конкретных угольных районов Земли.***

Таким образом, возникновение и развитие очагов самовозгорания угля в глубине массива должно способствовать понижению уровня выбросоопасности угольных пластов на некоторых удалениях от внешней “границы” (радиуса) очага. Следовательно, плавному переходу температурного фона угольных пластов за пределы опасного по выбросоопасности интервала $40-50^{\circ}\text{C}$ могут способствовать и подземные пожары (!). Если это так, то можно ожидать, что при определенных глубинах отработки угольных пластов рост температурного фона будет приводить к снижению уровня выбросоопасности угольных пластов.

Основания для подобного рода утверждений имеются, учитывая, что обсуждаемые геомеханические и физико-химические массообменные процессы в угольных пластах при их отработке тесно связаны с изменениями по глубине залегания их вещественно-структурных показателей и сорбционной метаноемкости.

В этом аспекте большой интерес представляют данные исследований, опубликованные в [26, 33, 35, 36]. Так, в [33] отмечено, что в зонах повышенного горного давления происходит изменение температуры в сторону возрастания.

Интересен анализ тенденции установленных связей с ростом глубины залегания пласта в точке отбора пробы угля, если принять давление газа равным гидростатическому, а температуру среды постоянной (15°C). С ростом глубины залегания пласта от поверхности в точке отбора пробы угля (рис. 18), когда изменение давления газа близко к гидростатическому закону, а температура неизменна, среднее значение сорбционной метаноемкости углей Кузбасса на глубине $200-400$ м достигает предела, а затем снижается. Введение поправки на рост температуры с глубиной эту особенность делает еще более ярко выраженной [37].

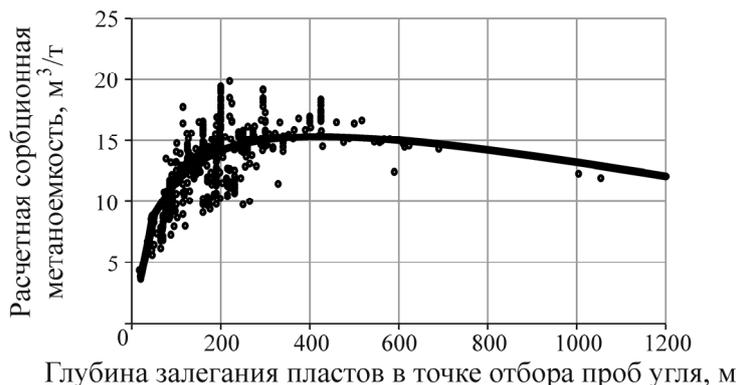


Рис. 18. Зависимость сорбционной метаноемкости углей Кузбасса от глубины залегания пластов в точках отбора проб

Возможное объяснение данной особенности связано с геодинамическими и тектоно-магматическими условиями формирования Кузнецкого угольного бассейна. По исходным экспериментальным данным [20] получены средние глубины отбора проб углей по геологическим сериям: балахонская — 250 м; кольчугинская — 186 м.

Таким образом, рассматриваемая тенденция отражает не только глубину, определяющую литологическое давление и формирование твердых углеметановых растворов [15], но и особенности свойств угленосных залежей, имеющих различные геологические условия возникновения и преобразования.

О немонотонной связи между выходом летучих, предельной внутренней энергии релаксации и диапазонами глубин выбросоопасности углей Кузбасса свидетельствуют данные рис. 19, из работы [30].

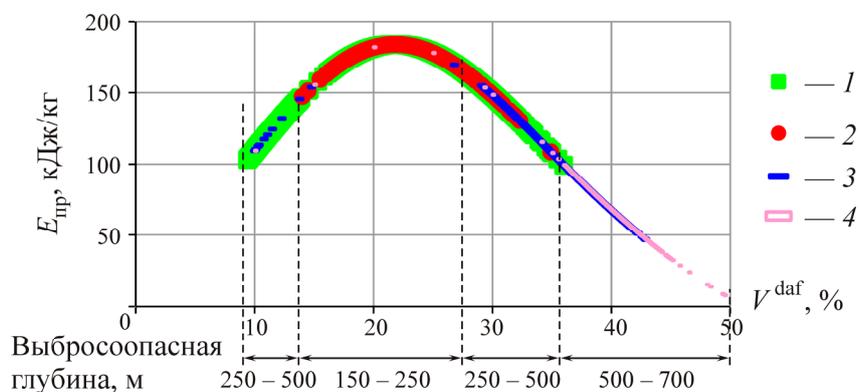


Рис. 19. Изменение предельных значений внутренней энергии релаксации для углей Кузбасса [30]: 1–4 — подсерии: 1 — верхнебалахонская; 2 — нижнебалахонская; 3 — ильинская; 4 — ерунаковская

В заключительном разделе настоящей статьи предпринята попытка количественно описать различные стадии метаморфизма угольных пластов, опираясь на обобщенный комплексный показатель применительно к большому количеству угольных пластов Кузбасса. Как показано выше, вещественный состав и внутренняя микроструктура угля — во многом определяющие факторы для протекания как геомеханических, так и термофизических массообменных процессов не только при отработке угольных пластов, но и при расшифровке механизмов их формирования в истории развития Земли. В частности, одним из следствий наличия “единых” зави-

симостей, приведенных на рис. 7, 8, 16, а также гипотезы В. Н. Опарина о “геокрекинговом” механизме возникновения месторождений углеводородного ряда [22] является важным прогнозом, связанный с поиском и разведкой месторождений данного вида, а также с оценкой их физико-механических и физико-химических свойств. В этих аспектах предлагаемый ниже формализованный подход видится нам как весьма перспективный.

ОБОБЩЕННЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОПИСАНИЯ ПЕТРОГРАФИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕЙ: КЛАССИФИКАЦИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕТРОГРАФИЧЕСКИХ ГРУПП ПЛАСТОВ ПО УГЛЕНОСНЫМ РАЙОНАМ КУЗБАССА

Приведенные результаты свидетельствуют о большой роли структурного фактора в угольном веществе — по существу комплексного и многопараметрического показателя. Совокупная оценка параметров, определяющих такой показатель, затруднена из-за использования различных единиц для их измерения. Поэтому универсальной является безразмерная оценка учитываемых параметров в относительных единицах. В предлагаемом подходе она выполняется не по экспертным баллам, как в многофакторных классификациях, а на основе канонической закономерности “квантования” физико-механических свойств геовещества. Этот подход подробно описан в работе [38] и использован для количественной оценки структурного строения различных типов горных пород, в том числе применительно к их геотехнологическим свойствам.

Указанный подход впервые использован нами применительно к описанию петрографических свойств углей Кузбасса различных стадий метаморфизма. Для этих целей сформирована информационная база данных по следующим угленосным районам Кузнецкого бассейна: Анжерский, Байдаевский, Беловский, Кемеровский, Кондомский, Ленинский, Осинниковский, Прокопьевско-Киселевский, Томь-Усинский, включая Алардинское месторождение. В совокупности изучены результаты анализов по 167 угольным пластам. Данные подготавливались по следующим характеристикам угольного вещества по каждому пласту: показатель стадии метаморфизма, выход летучих, содержание витринита, семивитринита, инертита, липтинита, пористость, влажность, содержание минеральных компонентов (зольность).

Выбор этих характеристик обусловлен тем, что они относятся к числу основных факторов, определяющих метаноносность угольных пластов. Процентное содержание петрографических компонентов обуславливает физико-механические и технологические свойства угольного вещества и угольного пласта в целом. Различное содержание указанных компонентов определяет изменчивость таких характеристик, как пористость, прочность и метаноносность выбросоопасного слоя.

На первом этапе исследований выполнен анализ по установлению корреляционных связей между выбранными характеристиками. Как оказалось, между показателем стадии метаморфизма углей (по показателю отражения витринита) и выходом летучих существует тесная ($R = 0.941$) корреляционная связь (рис. 20). Поэтому для дальнейшего анализа использован показатель “выход летучих” как наиболее достоверно определяемый, а показатель стадии метаморфизма исключен из числа анализируемых.

Обобщенный петрографический показатель по совокупности влияющих факторов введен с учетом разработанного в [38] принципа классификации физико-механических (прочность, зернистость, пористость, влажность и пр.) и горно-технологических (абразивность, буримость) горных пород. Сущность используемого подхода заключается в представлении анализируемых свойств безразмерными показателями в канонических шкалах.

При этом количественное представление любого i -го свойства с безразмерным показателем (Y_i) определяется в виде

$$Y_i = C_i \ln(X_i / X_{0i}) + 1, \quad (3)$$

где X_i — текущее значение i -го свойства в соответствующих единицах измерения; X_{0i} — базовое значение параметра i -го свойства; C_i — параметр, зависящий от характера кластеризации показателей свойств.

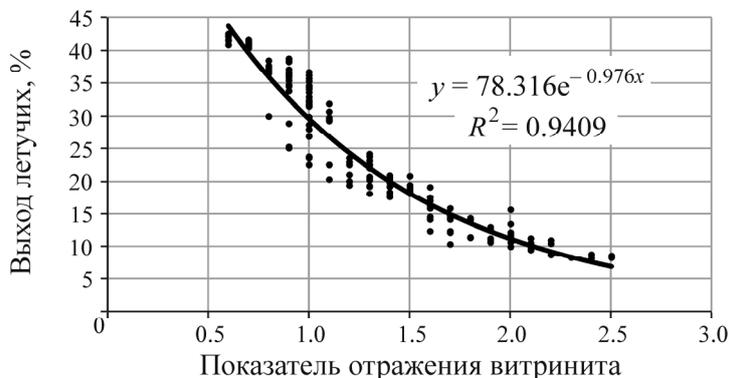


Рис. 20. Связь показателя отражения витринита углей (стадии метаморфизма) с выходом летучих веществ

Для каждого i -го свойства значения параметров C_i и X_{0i} подлежат определению. Обобщенный показатель совокупности свойств есть сумма значений Y_i . Для угольного вещества такой подход применен впервые. После проведенного общего анализа получено следующее выражение для оценки обобщенного показателя петрографических свойств угля:

$$F = C[\text{Ln}(V_t / 25) + \text{Ln}(S_v / 1) + \text{Ln}(I_n / 3) + \text{Ln}(M_s / 5)] + 4, \quad (4)$$

где V_t , S_v , I_n , M_s — содержание витринита, семивитринита, инертита и минеральной компоненты (зольность) соответственно; в знаменателе — базовые значения по соответствующим показателям свойств; $C = 2.8854$ принято исходя из предположения однотипного характера кластеризации анализируемых свойств; 4 — константа, равная числу анализируемых компонентов, что следует из (3).

Как показали расчеты по всему множеству имеющихся данных, диапазон значений обобщенного показателя F для рассматриваемых угленосных районов Кузбасса находится в пределах от 10 до 24. При этом значение показателя стадии метаморфизма углей ($\overset{\circ}{R}$) для угленосных районов Кузбасса имеет пределы от 0.6 до 2.4. Согласно классификации по этому показателю, анализируемые угленосные районы подразделяются на 4 группы. Исходя из этого, шкала для классификации обобщенного показателя определена в следующем виде:

$$J = am\text{Ln}(F_n / 10) + 1, \quad (5)$$

где J — значение классифицируемого показателя в петрографической группе; F_n — значение обобщенного показателя, вычисленного для n -го угольного пласта; $a = 1.44$; $m = 3$ — порядок канонической шкалы иерархических представлений.

Согласно (5), в табл. 4 представлена классификация углей Кузбасса по петрографическому составу. Из данных таблицы следует, что в выделенных группах количественно проявляется вполне естественная закономерность: петрографические группы сформировались в порядке увеличения показателя стадий метаморфизма ($\overset{\circ}{R}$). При этом выход летучих (V^{daf}) снижается (см. также рис. 17), равно как и содержание витринита (V_t). Содержание семивитринита (S_v), инертита (I_n) и минеральных примесей возрастает. Эти закономерности согласуются с извест-

ными положениями, и, следовательно, предложенный подход к количественному описанию и классификации петрографического состава углей правомерен. С использованием предложенного принципа классификации получено распределение петрографических групп по пластам угленосных районов Кузбасса (табл. 5).

ТАБЛИЦА 4. Классификация углей Кузбасса по петрографическому составу

J	$\overset{\circ}{R}$	V^{daf}	V_t	S_v	I_n	M_s
1–2/1.4	(0.6–1)/0.84	(30–42)/35.8	(90–92)/91,3	(1–2)/1.3	(4–7)/5.8	(5.8–9.6)/7.6
2–3/2.5	(0.6–1.1)/0.87	(29–41)/33	(83–92)/87.6	(1–4)/2.6	(7–15)/8.2	(5.3–12.5)/7.7
3–4/3.7	(1–2.1)/1.38	(9.9–42)/30	(38–84)/65	(3–8)/4.3	(9–56)/30	(6.4–14.6)/9.8
4–5/4.3	(1.1–2.5)/1.59	(8.1–28.8)/16.6	(31–62)/47.7	(3–24)/9.10	(25–64)/43	(6.9–29.9)/11.8

Примечание. В числителе — значение “от–до”, в знаменателе — среднее значение.

ТАБЛИЦА 5. Распределение петрографических групп пластов по угленосным районам Кузбасса

Группа	Угленосный район	Пласт	Марка угля
1	Байдаевский	30, 19, 16, 21, 10, 22	Г, ГЖ
	Беловский	9	Ж
	Ленинский	Наддальный	Г
2	Байдаевский	14, 23, 15, 29б, 25, 33, 31, 24, 20, 26а, 36, 32, 27, 18б, 37, 38	ГЖ, Ж, ГЖО, Г
	Осинниковский	Е9а, П2, К2, П3, Е11, П4, Е1, К4, Е4, Е5, К3, К1 (ниж. пач.), Е6, Е7, К5, Е3, Е5	Ж
	Беловский	10, 4, 2, 3, 11, 13, Надбайкаимский	Ж, Д, Г
3	Ленинский	Полысаевский-1, Инской-1, Спутник, Сычевский-1	Д, Г
	Беловский	16	ГЖО
	Томь-Усинский	1, 13, 16, 12	КС, ТС
	Кондомский	1, 8, 18а, 10 (верх. пач.), 5бис, 4	Т
	Прокопьевско-Киселевский	7-й Внутренний, 4-й Внутренний, Подспорный-2, 8-й Внутренний	К, ОС, КО, СС, ТС
	Кемеровский	Надартельный, Викторовский	КЖ, СС,
	Алардинское месторождение	1	КО
4	Кондомский	28, 6, 23, 10(ниж. пач.), 21, 19, 22, 16, 31, 29, 33, 32, 2, 3, 5, 26	Т
	Томь-Усинский	9, 17, 4-5, 6а, 3, 11, 6	КС
	Прокопьевско-Киселевский	Подспорный-1, 5-й Внутренний, 6-й Внутренний, Спорный, 1-й Внутренний, Ударный, Безымянный-1, Двойной, 3-й Внутренний, 2-й Внутренний, Горелый, Безымянный-2, Прокопьевский-1, Мощный, Прокопьевский-3, Прокопьевский-2, Характерный, Лутугинский	СС, ТС, К, КО, ОС, ТС, СС, КС
	Кемеровский	Безымянный, Лутугинский-1, Лыжинский, Верхний, 24, Конгломератовый, 27, Кумпановский, Владимировский, Кемеровский, Артельный, Выклинившийся, Волковский, 26, Проводник, 21, Лутугинский-2	СС, КЖ, КС, К, КО, КЖ
	Анжеро-Судженский	Чилинский, Тонкий, Коксовый, Андреевский, Петровский, Десятый, Одиннадцатый, Двойной, Случайный	КС, ТС, Т
	Алардинское месторождение	24, 17, 21, 6а, 23, 20, 12, 16, 3-3а, 7-7а, 28, 9, 11	Т, ОС, ТС

ВЫВОДЫ

Проведенный комплексный анализ геомеханического и термохимического поведения образцов углей различных стадий метаморфизма по угленосным районам Кузбасса позволяет заключить о существовании генетической связи между выбросо- и пожароопасностью угольных пластов, диктуемой геомеханико-геодинамическими и термохимическими условиями формирования угольных месторождений в минувшие тектоно-магматические эпохи истории развития Земли. Следовательно, в отличие от существующих и доминирующих ныне подходов к моделированию процессов формирования очаговых зон катастрофических событий в массивах горных пород неорганической природы, адекватное решение проблем выбросо- и пожароопасности угольных месторождений должно основываться на учете реально существующей тесной связи между геомеханическими и физико-химическими массообменными процессами в многофазных угольных пластах разной стадии метаморфизма при их отработке на заданных глубинах и температурном фоне.

Экспериментально доказано:

— ИК-радиометрия позволяет дистанционно и оперативно контролировать изменение напряженно-деформированного состояния угольных образцов при их нагружении в реальном масштабе времени;

— отмечен рост внутренней удельной поверхности частиц отбитого угля, связанный с силой внезапных выбросов угля и газа отрабатываемых угольных пластов и соответственно с внутренней энергией релаксации углеметана;

— существует “единая зависимость” потери массы (Δm) угольных образцов при изменении их температуры с выделением преимущественно двух диапазонов: примерно от 40 до 60° С (T_1) и от 480 до 500° С (T_2). Изменение массы образцов угля в диапазоне температур T_2 связано также с внутренней энергией релаксации метаносности продуктивных пластов;

— удаление летучих форм в некоторых образцах угля при равномерном нагревании угольного вещества сопровождается эндоэффектом, т. е. понижением температуры самих образцов. Этот эффект может являться следствием десорбции летучих компонентов. Кроме того, отсутствие экзоэффектов свидетельствует об отсутствии окисления углеродсодержащих соединений в ходе термического анализа;

— со временем хранения образцов угля после их извлечения из продуктивных пластов наблюдается ослабление связи газового компонента в углеметановом веществе (в том числе связь метана с веществом угля).

Экспериментально-теоретически обоснован обобщенный многопараметрический показатель для количественного описания петрографических свойств углей Кузбасса с использованием канонической шкалы структурно-иерархических представлений, что позволило ввести новую количественную классификацию и построить распределение петрографических групп пластов разной стадии метаморфизма по угленосным районам Кузбасса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Деструкция** земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия / отв. ред. Н. Н. Мельников. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012.
2. **Адушкин В. В., Опарин В. Н.** От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. I // ФТПРПИ. — 2012. — № 2.

3. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. II // ФТПРПИ. — 2013. — № 2.
4. 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.
5. Опарин В. Н., Багаев С. Н., Маловичко А. А. и др. Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов: в 2 т. — Новосибирск: Изд-во СО РАН. — 2009. — Т. 1. — 2010. — Т. 2.
6. Пархоменко Э. М. Электрические свойства горных пород. — М.: Наука, 1965.
7. Моисеенко У. И., Соколова Л. С., Истомин В. Е. Электрические и тепловые свойства горных пород. — Новосибирск: Наука, 1970.
8. Резниченко Ю. В., Силаева О. И., Шамина О. Г. и др. Сейсмоакустические методы изучения напряженного состояния горных пород на образцах и в массиве // Борьба с внезапными выбросами угля и газа в шахтах. — М.: Изд-во АН СССР, 1956. — Вып. 34.
9. Курленя М. В., Опарин В. Н. Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород. — Новосибирск: Наука, 1999.
10. Опарин В. Н., Сашурин А. Д., Кулаков Г. И. и др. Современная геодинамика массива горных пород в верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
11. Оливер Д. Анализ полей напряжений с использованием теплового излучения // Экспериментальная механика: кн. 2 / пер. с англ. под ред. А. Кобаяси. — М.: Мир, 1990.
12. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. — М.: Мир, 1969. — Т. 2.
13. Левин Б. В., Шейнин В. И., Блохин Д. И., Фаворов А. В. Инфракрасная диагностика отклика геоматериалов на импульсные и ударные нагрузки // ДАН. — 2004. — Т. 395. — № 6.
14. 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 одноосном нагружении // ФТПРПИ. — 2013. — № 5.
15. Мальшев Ю. Н., Трубецкой К. Н., Айруни А. Т. Фундаментально-прикладные методы решения проблемы угольных пластов. — М.: ИАГН, 2000.
16. Алексеев А. Д., Айруни А. Т., Зверев И. В. и др. Свойства органического вещества угля образовывать с газами метастабильные однофазные системы по типу твердых растворов // Диплом на научное открытие, РАЕН, 1994. — № 9.
17. 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.
18. Полевщиков Г. Я., Киряева Т. А., Плаксин М. С. Газодинамические следствия зональной дезинтеграции углеметановых пластов // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2011. — Т. 1.
19. Полевщиков Г. Я., Плаксин М. С. Газодинамическая активность угольных пластов и зональная дезинтеграция массива горных пород при ведении подготовительных выработок // Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах: тр. 2-й Рос.-Кит. науч. конф. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.
20. Каталог метаноемкости углей Кузбасса. — Кемерово: Изд. ВостНИИ, 1969.
21. Курленя М.В., Опарин В.Н., Еременко А.А. Об отношении линейных размеров блоков к раскрытию трещин в структурной иерархии массивов // ФТПРПИ. — 1993. — № 3.

22. **Опарин В. Н.** Геотехнологии будущего — геотехнологии “реакторного типа”: современные тенденции, научный задел, ключевые проблемы // *Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды*: тр. Всерос. конф. с участие иностр. ученых. Т. 1. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.
23. **Госорг Ж.** Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. — М.: Мир, 1988.
24. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Теория упругости. — М.: ГИФМЛ, 1965.
25. **Шейнин В. И., Левин Б. В., Мотовилов Э. Ф., Морозов А. А., Фаворов А. В.** Диагностика быстрых периодических изменений напряжений в горных породах по данным инфракрасной радиометрии // *Физика Земли*. — 2001. — №4.
26. **Рац М. В.** Неоднородность горных пород и их физических свойств. — М.: Наука, 1968.
27. **Лыков А. В.** Теория теплопроводности. — М.: Высш. школа, 1967.
28. **Ковчавцев А. П.** Тепловизор: лучше один раз увидеть // *Наука из первых рук*. — 2012. — № 5(47).
29. **Опарин В. Н., Киряева Т. А.** К вопросу о возникновении температуры в углеметановых образцах при нагружении и возможных методах их контроля // *Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды*. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.
30. **Киряева Т. А.** Разработка метода газодинамической активности угольных пластов по геолого-разведочным данным на примере Кузбасса. — Saarbrucken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co, 2011.
31. **Грег С., Синг К.** Адсорбция, удельная поверхность, пористость. — М.: Мир, 1984.
32. **Скрицкий В. А.** Механизм возникновения очагов самовозгорания угля в шахтах и способы их предотвращения. — Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 2013.
33. **Киряева Т. А., Родин Р. И.** К вопросу о механизме возникновения высоких температур при разработке угольных пластов // *Уголь*. — 2010. — № 2.
34. **Ходот В.В.** Влияние влажности на газоносность ископаемых углей. — М.: Изд-во АН СССР. ОН, 1952. — № 12.
35. **Полевщиков Г. Я., Киряева Т. А.** Энергия релаксации сорбционной метаноемкости углей // *ГИАБ*. — 2006. — Темат. прил. Метан.
36. **Киряева Т. А.** Особенности устойчивых состояний искусственных и природных углеметановых систем // *Естественные и технические науки*. — М.: Спутник+, 2011. — № 4.
37. **Рудаков В. А., Киряева Т. А.** Особенности сорбционной метаноемкости углей Кузбасса // *Вопросы безопасности труда на горных предприятиях*. — Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2003. — Вып. № 2.
38. **Опарин В. Н., Танайно А. С.** Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении. — Новосибирск: Наука, 2011.

Поступила в редакцию 19/III 2014