

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.272.6

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РАЗВИТИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ДЕФОРМАЦИОННО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В УГОЛЬНЫХ ОБРАЗЦАХ РАЗЛИЧНОЙ СТАДИИ МЕТАМОРФИЗМА ПРИ ИХ НАГРУЖЕНИИ ДО РАЗРУШЕНИЯ В ИЗМЕНЯЮЩЕМСЯ ПОЛЕ ТЕМПЕРАТУР

**В. Н. Опарин^{1,2}, Т. А. Киряева¹, О. М. Усольцева¹,
П. А. Цой¹, В. Н. Семенов¹**

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

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

В развитие феноменологических основ теории взаимодействия между геомеханическими, тепловыми и физико-химическими процессами в метаноносных угольных пластах Кузбасса при их отработке выполнен комплекс лабораторных исследований на специальном стенде по испытанию угольных образцов различной стадии метаморфизма на одноосное жесткое нагружение до разрушения со скоростью $\sim 3.3 \cdot 10^{-6}$ м/с. Представлены зависимости от давления изменения температуры образцов угля и охватывающих их гранитных прослоек с использованием высокоточного сканирующего компьютерного тепловизора. Показана связь изменений температуры образцов угля при их нагружении до разрушения с выходом летучих веществ и предельной внутренней энергией релаксации метаноносности угольных пластов месторождений Кузбасса. Совместное с тепловизионным использование лазерного измерительного комплекса ALMEC-tv по высокоточному и детальному контролю спекл-методом деформационно-волновой картины на сканируемых образцах угля в процессе их нагружения позволило впервые доказать гипотезу о возможности возникновения нелинейных — “маятникового типа” — движений структурных элементов в угольных образцах с изменяющимся полем температур, что имеет принципиальное значение для осуществления не учитываемых ранее массо-газообменных процессов в напряженных угольных пластах различного марочного состава при их отработке.

Связи, температурное поле, деформационно-волновые процессы, стадии метаморфизма, образцы, угольные месторождения Кузбасса, напряженно-деформированное состояние, выход летучих, предельная внутренняя энергия, релаксация метаноносности

ВВЕДЕНИЕ

Мировое освоение недр Земли ведется по многим направлениям с привлечением различных методов научного познания. Горные породы — это вещественно неоднородные образования как по структуре, текстуре, составу, так и по физико-механическим свойствам.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-05-00673а), партнерского интеграционного проекта СО РАН № 100 и проекта ОНЗ РАН-3.1 с использованием оборудования ЦКП ГГИ СО РАН.

Для изучения “тонкой” структуры углей обычно широко применяются методы, основанные на их деструкции до растворимых продуктов, которые можно идентифицировать при помощи различных химических и физических методов анализа [1]. Применение “прямых” методов изучения структуры углей часто ограничивалось нерастворимостью органической массы. Их необходимость значительно возросла в связи с успешным применением новых физических методов анализа: рентгеноструктурного, ИК-спектроскопии, ЯМР-спектроскопии и др. Но применение этих методов для угольных образцов имеет одну важную особенность, которую следует учитывать: во время пробоподготовки теряется некоторая часть “газовой составляющей” угольного образца.

В последние десятилетия российскими учеными активно развиваются представления о свойствах углеметанового пласта как твердого углегазового раствора [2]. Процесс распада углеметана на уголь и метан протекает с выделением упругой энергии, приводящей не только к динамическому разрушению собственно угля, но и к выносу его значительного объема в горную выработку потоком выделяющегося газа. Таким образом, динамика развития геомеханических процессов в многофазных органо-минеральных геосредах определяется не только свойствами твердых компонентов полезных ископаемых, но и соотношениями между внутренней упругой энергией содержащихся в них жидкости и газа и внешней упругой энергией, связанной с изменяющимися глобальным геодинамическим и “локальным” геомеханическим полями (напряженно-деформированным состоянием породных массивов за счет ведения горных работ) [3, 4].

В современных условиях все явственнее становится осознание необходимости развития основ теории взаимодействия между геомеханическими, тепловыми и физико-химическими процессами в метаносных угольных пластах различной стадии метаморфизма при отработке угольных месторождений, в том числе и для условий, когда продуктивные толщи содержат в значительных объемах газовые гидраты метана в пористом пространстве угольной матрицы [5–8].

Для обеспечения безопасной отработки угольных пластов, обоснованного выбора порядка и режима ведения горных работ, принятия адекватных мер по профилактике катастрофических газодинамических явлений в горных выработках, а также для совершенствования технологий предварительной дегазации угольных месторождений в современных условиях необходимо также иметь обоснованные представления о влиянии фазовых превращений в системе “вода–метан” на формирование газодинамических процессов в угольных пластах при нарушении их исходных напряженно-деформированного состояния и температурного режима [6, 7].

Отмеченные проблемы, в силу их фундаментальности, в настоящее время могут решаться с учетом наличия уже весьма обширного натурального экспериментального материала, а также на базе современных и развития новых методов комплексного анализа взаимодействия определяющих факторов органо-минерального геовещества в сложных массообменных процессах, связанных с извлечением полезных ископаемых из напряженных, вообще говоря, многофазных массивов горных пород в изменяющемся поле температур [9]. Поэтому разработка методов комплексного анализа геомеханического состояния углегазовых образцов, в которых роль газа (метана) является одной из основных, как полагают авторы, способна значительно расширить теоретические возможности для принятия и технологических решений по угледобыче.

В ИГД СО РАН проводятся активные исследования в этом направлении [8–10]. В частности, впервые проведена серия экспериментов с использованием лазерного измерительного оптико-телевизионного комплекса ALMEC-tv по высокоточному и детальному контролю спекл-методом деформационно-волновой картины на песчанике, мраморе и сильвините при различ-

ных режимах жесткого одноосного их нагружения до разрушения на прессовой установке “Instron-8802”. По сути, впервые удалось зафиксировать теоретически предсказанный в рамках теории волн маятникового типа процесс “геомеханического кипения” структурных неоднородностей испытываемых образцов геоматериалов перед их разрушением [4, 11–13]. Так, при возрастании уровня напряжений, когда деформации геоматериалов выходят за пределы упругости, внутри нагружаемого твердого тела начинают развиваться нелинейные механические процессы, при которых вариации температуры и соответственно интенсивности ИК-излучения становятся значительными. Это дает основу для разработки физическо-механических моделей, которые позволили бы в том числе и по изменениям ИК-излучения оценивать параметры возникающих нелинейных деформационно-волновых процессов [9, 14].

В ИУ СО РАН в лаборатории газодинамики и геомеханики угольных месторождений [15] было высказано предположение, что повышение температуры угольного пласта может быть связано с распадом углеметанового вещества. Распад протекает с выделением “внутренней” энергии. Авторами отмечается, что это ведет к теплообмену между расширяющимся газом и твердыми частицами угля. Поскольку частицы угля обладают большой теплоемкостью, но малой теплопроводностью, то при распаде твердый раствор способен выделять упругую энергию.

В ИГД СО РАН и ИПКОН РАН в разное время проводились исследования по определению изменения температуры в процессе отработки угольных пластов [16, 17]. В этих работах говорится об установлении достаточно высоких температур в зонах, опасных по выбросам угля и газа. Отмечено, что в зонах повышенного горного давления происходит изменение температуры в сторону возрастания.

В работе [9] определены геомеханико-термохимические условия инициирования влаго- и газообменных процессов в угольных массивах, приводящих к возникновению очагов самовозгорания угля. Высказано предположение о том, что высвобождение определенных объемов влаги из угля может сопровождаться возникновением зон декомпрессии внутри контролируемых объемов, некомпенсируемых действием горного давления и внутренним давлением остаточного газового компонента в высвобождаемом от жидкости порово-трещинном пространстве. В результате это должно приводить к встречному процессу всасывания воздуха из атмосферы выработок или разломно-трещинного пространства внутрь углепородного массива, а интенсивность процесса образования и размеров “зон декомпрессии” в контролируемых объемах будет существенно зависеть от структуры, физико-химических и механических свойств углей (марок, стадий метаморфизма) и вмещающих их массивов, господствующего температурного фона и изменений напряженно-деформированного состояния пород.

В силу принципиальной значимости отмеченной гипотезы В. Н. Опарина [9] в осуществлении массо-газообменных процессов в напряженных угольных пластах различной стадии метаморфизма, основной целью настоящей работы является проверка базового результата [8–10] о возможности возникновения нелинейных — “маятникового типа” — движений структурных элементов и в угольных образцах при их нагружении до разрушения в изменяющемся поле температур.

Используемые в экспериментах образцы угля представляют собой основной марочный ряд для угольных месторождений Кузбасса. Существенное внимание при этом уделялось анализу влияния стадий метаморфизма и, следовательно, структурного строения на характер изменения температуры при нагружении угольных образцов. Это позволяет дать ответ на ряд важных вопросов, связанных с газодинамическими процессами при отработке угольных пластов, вплоть до внезапных выбросов угля и газа.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

В ИГД СО РАН создан экспериментально-измерительный стенд [9, 14], оснащенный комплексной измерительной системой дистанционного контроля изменений температуры и напряженно-деформированного состояния угольных образцов в процессе их нагружения до разрушения (рис. 1).

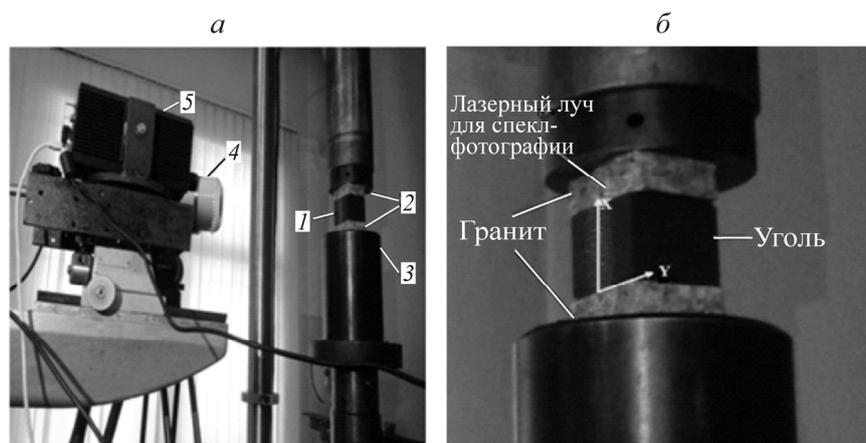


Рис. 1. Экспериментально-измерительная установка (а): 1 — угольный образец; 2 — гранитные пластинки; 3 — подвижная траверса; 4 — тепловизор; 5 — комплекс ALMEC-tv; образец угля (б) марки К Березово-Бирюлинского месторождения (Кузбасс) размером 40×40×40 мм

Испытания образцов угля проводились на сервогидравлическом прессе Instron 8802, программа нагружения задавалась по перемещению траверсы, скорость которой составляла 0.2 мм/мин ($\sim 3.3 \cdot 10^{-6}$ м/с). В эксперименте непрерывно регистрировались и записывались в компьютерный файл величина перемещения траверсы и усилие, создаваемое прессом.

Для регистрации микродеформаций на рабочей поверхности призматических образцов применялась автоматизированная система анализа цифровых спекл-фотографий ALMEC-tv. Регистрация температурного поля осуществлялась компьютерным тепловизором ТКВр-ИФП “СВИТ” [18], разработанным и изготовленным в Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (температурная чувствительность NETD = 0.03° С, спектральный диапазон инфракрасного излучения прибора 2.6–3.5 мкм). Соответствующие исследования для угля проведены впервые, при этом с точностью до 0.001° С. Ранее реализация этой идеи была затруднена тем, что, например, для угля теоретически ориентировочные значения чувствительности составляли $\Delta T = 0.004^\circ \text{C}$. Обеспечить требуемую точность измерений до отмеченной разработки было достаточно сложно. Тем не менее бесконтактная техника измерений, основанная на зависимости мощности инфракрасного излучения с поверхности контролируемого тела от его температуры, ранее позволила получить результаты [19], которые открывали возможность использования бесконтактной ИК-радиометрии для лабораторных измерений.

Достоинства этого метода при использовании в мониторинговых системах заключаются в следующем:

- он является “бесконтактным” — не требующим наклейки на изучаемую поверхность специальных термодатчиков;
- возможно получение информации, осредненной по некоторой конечной площадке, а не с “точечного” участка поверхности деформируемого тела;
- сканирование может проводиться по всей поверхности деформируемого тела.

С другой стороны, существуют ограничения возможностей этого метода. Одно из них — измерения проводятся только на поверхности образца; второе — условие адиабатичности. *Деформирование будет адиабатическим*, если скорость изменений деформаций, а значит, и температуры значительно превышает скорость теплообмена. В работе [19] 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 [20], при наблюдениях, например в забое скважины в массиве, предположение об адиабатичности процесса деформирования окрестных пород может приниматься с достаточной обоснованностью.

На стенде проведены испытания 18 угольных образцов 6 месторождений Кузбасса (таблица) с различными физико-химическими свойствами (выход летучих веществ $V^{daf} = 14 - 40$ %, газоносность $X = 13 - 26$ м³/т) и глубиной залегания угольных пластов $H = 240 - 620$ м, которые имели размеры от 20×20×20 до 40×40×40 мм.

Физико-химические свойства угольных образцов Кузнецкого бассейна

Номер образца	Месторождение	Пласт	Марка угля	V^{daf} , %	X , м ³ /т	H , м
1	Ленинское	Болдыревский	Г, Ж	35.1	15	340
2	»	Байкаимский	Д	39.7	15	360
3	Березово-Бирюлинское	XXVII	К	21.0	20	350
4	»	27	К	21.9	12.5	359
5	»	XXVII	К	20.0	20	350
6	»	24	К	22.4	20	440
7	Чертинское	5	Ж, СС	36.3	30	593
8	»	5	Г	16.6	13	240
9	»	5	Г	15.9	13	240
10	»	5	Ж	30.3	13	240
11	»	5	Ж	32.6	13	240
12	»	5	Ж	37.0	30	620
13	Ольжерасское	Угольный разрез	К	18.6	—	—
14	Алардинское	6	ОС	18.4	25.7	620
15	Киселевское	Мощный	К	17.4	20	600
16	»	»	ОС	14.8	20	600
17	»	»	ОС	15.8	20	600
18	»	»	ОС	15.6	20	600

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ОБРАЗЦАХ УГЛЯ ПРИ ИХ ОДНООСНОМ НАГРУЖЕНИИ ДО РАЗРУШЕНИЯ

Измерения температуры со временем нагружения проводились по всей поверхности угольных образцов, которые сверху и снизу были изолированы от металлической траверсы пресса пластинами из гранита. Учитывая высокие прочностные характеристики гранита и его силикатную основу, эти “прокладки” можно, в известной мере, рассматривать как “модельные элементы”, способные учитывать механическое и температурное взаимодействие между угольным пластом и вмещающими его труднообрушаемыми пластами прочного песчаника (слои почвы и кровли выработки). Коэффициенты теплопроводностей гранита и угля соизмеримы, а у металла он больше в сотни раз [21]. Размеры гранитных прослоек 80×80×20 мм.

На рис. 2 приведены тепловое изображение поверхности образца угля марки К Березово-Бирюлинского месторождения Кузбасса и соответствующие термограммы, полученные с использованием программы тепловизора для усредненного значения поведения температуры от времени нагружения в различных точках по вертикальной оси образца, размеры которого составляли $40 \times 40 \times 40$ мм. Видно, что увеличение температуры происходит в направлении от границ испытываемого образца к его центру (см. светлое пятно вокруг точки Е перед видимым разрушением образца в момент времени 240 с). В данном случае высота образца угля в 2 раза превышает толщину гранитной прослойки.

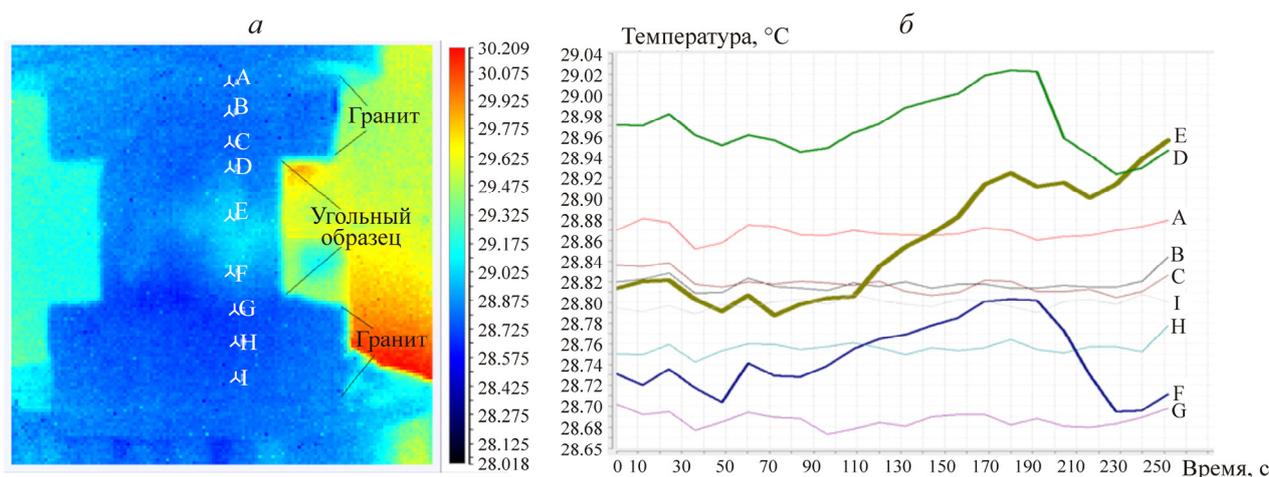


Рис. 2. Тепловое изображение сканируемой поверхности в момент времени 240 с (12 МПа) (а) и термограммы (б) по времени нагружения до разрушения угольного образца (D, E, F) высотой 4 см, а также гранитных прослоек (A, B, C, I, H, G) высотой 2 см

Как следует из рис. 2б, приращение температуры в центральной части сканируемой поверхности угольного образца со временем нагружения (в точке E) составило около 0.17°C , что примерно в 2 раза больше, чем по краям (0.08°C в точках D и F). В то же время изменений температуры в гранитных прослойках (точки A, B, C, I, H, G) в процессе нагружения образца практически не наблюдалось.

Аналогичное распределение приращения температуры в угле (и “неизменность” в граните) отмечалось при условии, что толщина образца угля равнялась толщине гранитной прослойки. При этом вблизи границы угольного образца также наблюдался устойчивый градиент повышения температуры вплоть до стадии разрушения. В центре сканируемых поверхностей всех испытанных угольных образцов градиент повышения температуры в период нагружения в среднем превышал в 4 раза температурный градиент в краевых зонах.

На рис. 3 представлены трехмерные диаграммы распределения температуры в угле и граните в начале нагружения ($t = 40$ с, $\sigma = 1$ МПа) и перед видимым разрушением испытываемого угольного образца ($t = 240$ с, $\sigma = 12$ МПа), а также распределения микродеформаций ε_x по сканируемой поверхности угольного образца при задаваемых прессом напряжениях $\sigma = 12$ МПа — непосредственно перед его разрушением. Распределение температуры в образце угля ($x = 2 - 6$ см) и в гранитных пластинах (по краям) весьма неоднородно, при этом прослеживается подобие картин распределения температуры и микродеформации ε_x по сканируемой поверхности угольного образца перед разрушением. Наблюдаемое подобие “осциллирующих” распределений для полей температур и деформаций, очевидно, связано с внутренним строением испытываемых образцов угля различных стадий метаморфизма (линейными размерами “механических” неоднородностей).

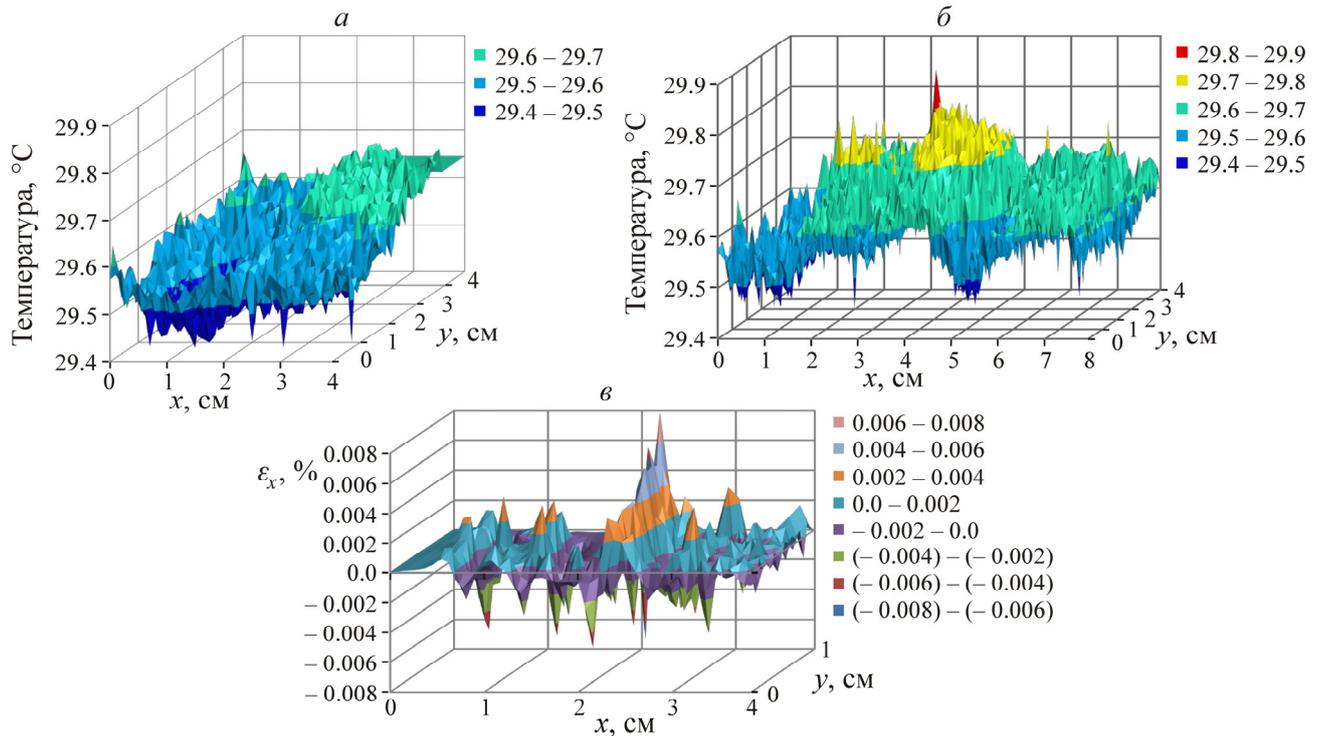


Рис. 3. Трехмерные диаграммы распределения: *а* — температуры угля с гранитными прослойками по краям в начале нагружения; *б* — то же перед разрушением испытуемого угольного образца; *в* — микродеформаций ε_x по сканируемой поверхности угольного образца перед разрушением

Существенный интерес представляет вопрос о том, имеется ли какая-либо зависимость между временными интервалами жесткого нагружения до разрушения, стадией метаморфизма угольных образцов и их объемом.

Для случая одноосного нагружения испытанных образцов (при скорости $\sim 3.3 \cdot 10^{-6}$ м/с) углей Кузбасса по диаграмме рис. 4 соответствующая информация приведена на рис. 5. Штриховыми линиями на графиках авторами выделена (по локальным “экстремумам”) “пилообразная” кривая, на основании которой следовало, как будто бы, заключить об отсутствии статистически значимой связи между отмеченными параметрами. С другой стороны, если построить отношения объемов образцов с локальными экстремумами (max, min) пилообразной кривой по временному фактору, а значит, прочности образцов, то в результате получается числовой ряд со значениями, близкими к каноническому ряду отношений диаметров структурных блоков [22]:

$$\Delta_i / \Delta_j = (\sqrt{2})^{i-j}, \quad (1)$$

где целочисленные индексы i, j ($i > j$) в данном случае относятся к последовательной нумерации сравниваемых объемов образцов с локальными экстремумами (рис. 4) для временных интервалов разрушения образцов угля.

Приведенная на рис. 5 “зависимость” с учетом (1) позволяет сделать заключение о том, что для установления реальной зависимости между объемами испытуемых образцов углей и их прочностными характеристиками (посредством временных интервалов жесткого нагружения до разрушения, как на данном рисунке), следует предварительно расклассифицировать представленные выборки образцов угля по стадиям их метаморфизма (или марочному составу).



Рис. 4. Диаграмма изменения напряжений на траверсе прессы с течением времени жесткого одноосного нагружения угольного образца № 17 до его разрушения (см. таблицу)



Рис. 5. Изменения временных интервалов до момента разрушения образцов угля от их объемов при скорости одноосного жесткого нагружения $\sim 3.3 \cdot 10^{-6}$ м/с. Цифры около экспериментальных “точек” показывают значения выхода летучих веществ, %

Для этого по сравнительно небольшой выборке образцов угля проведена классификация испытанных угольных образцов по выходу летучих веществ и периоду времени до их разрушения от начала жесткого одноосного нагружения со скоростью $\sim 3.3 \cdot 10^{-6}$ м/с:

время до разрушения, с	9	70	110	165	170	200	219	220	225	247	273	275	346	398
выход летучих веществ, %	28	22.4	18.1	16.1	16.1	19.6	16.1	16.9	16.1	16.3	21.5	22.2	22.3	28.8

В соответствии с приведенными данными, угли с выходом летучих веществ около **16 % (марки Т-ОС)** полностью разрушались во временных интервалах жесткого нагружения от 160 до 240 с, в то время как угли меньшей стадии метаморфизма с $V^{daf} = 18 - 28$ % могли разрушаться как за 9 с, так и за 400 с. Вероятно, это зависит от “неустоявшейся” по геологическому времени образования внутренней структуры углей этих марок или их элементного состава. Об этом может свидетельствовать соотношение (1), отражающее каноническое влияние структурного фактора, например через такой прочностной показатель, как абразивность [23].

О том же свидетельствует и достаточно большая дисперсия экспериментальных данных для используемой линейной аппроксимации связи между приращением температуры в угольных образцах и значениями интервалов времени жесткого нагружения угольных образцов различных стадий метаморфизма до момента их разрушения (рис. 6).

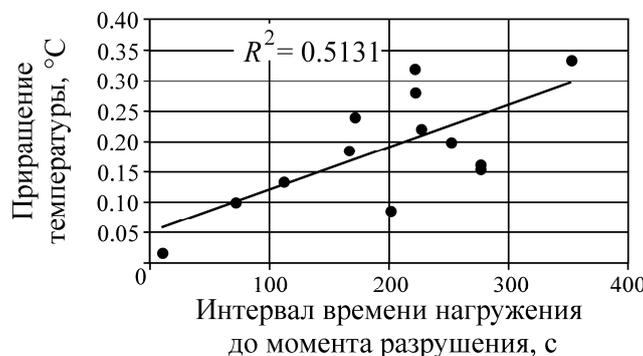


Рис. 6. Зависимость приращения температуры образцов угля от интервала времени до момента их разрушения при скорости жесткого нагружения $\sim 3.3 \cdot 10^{-6}$ м/с

Корреляционный параметр между сравниваемыми характеристиками (R^2) здесь сравнительно невелик (~ 0.51). И тем не менее наблюдается трендово положительный градиент роста температуры в зависимости от роста прочностных характеристик образцов угля, пропорциональных интервалам жесткого нагружения с принятой скоростью ($\sim 3.3 \cdot 10^{-6}$ м/с) до момента их разрушения. В известной мере, обсуждаемая зависимость на рис. 6 (с учетом температурного поведения гранитных прослоек) свидетельствует об “адиабатичности” условий нагружения угольных образцов различных марок до их разрушения.

Таким образом, при возрастании уровня нагружения (по режиму, согласно рис. 4) на испытываемые образцы угля приращения температуры и интенсивности ИК-излучения соответственно увеличиваются (рис. 7). На рис. 7а приведены в сравнении соответствующие температурные зависимости, наблюдаемые экспериментально (с учетом рис. 4) и теоретически предсказываемые [24] на основании идеальных представлений об однородных твердых телах. Здесь “приращение температуры” — это разность между температурами в данной точке при разрушении угольного образца и в начале нагружения.

Сравнивая расчетные приращения температуры для угля от напряжений на прессе по [9, 24] и их измеренные значения, можно отметить, что в наших экспериментах на углеметановых образцах эти приращения до 4 раз больше. Соответствующие значительные расхождения можно объяснить неучитываемым ранее развитием нелинейных деформационно-волновых процессов на микроструктурном уровне внутри образцов. Деформации, при которых происходит разрушение угольных образцов (“предельные” деформации), и напряжение на угольных образцах, создаваемое прессом, коррелируют с приращениями температуры в центре угольных образцов.

На рис. 7б представлена сводная экспериментальная зависимость значений приращений температуры от предельных деформаций всех испытанных образцов угля.

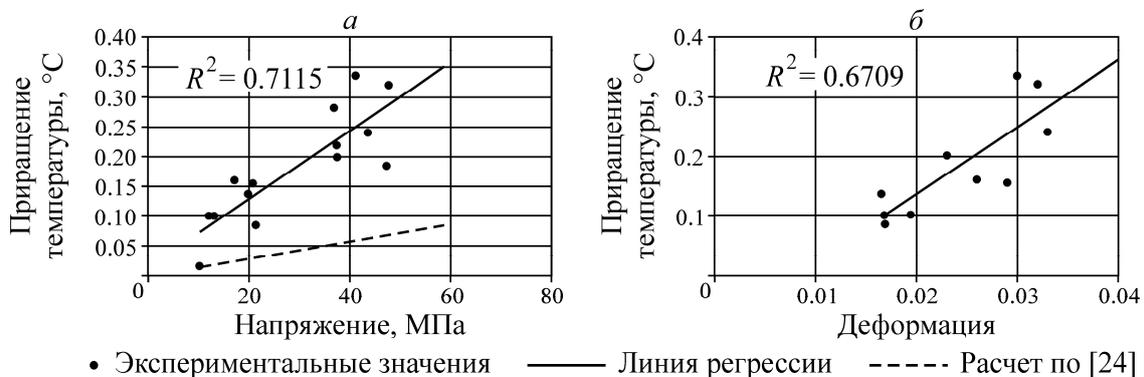


Рис. 7. Приращения температуры для всех испытанных образцов угля при жестком режиме одноосного нагружения со скоростью $\sim 3.3 \cdot 10^{-6}$ м/с: а — в диапазонах их нагружения до разрушения; б — в зависимости от достигнутых предельных деформаций

О СВЯЗЯХ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБРАЗЦОВ УГЛЯ ПРИ ИХ НАГРУЖЕНИИ ДО РАЗРУШЕНИЯ С ВЫХОДОМ ЛЕТАЮЩИХ ВЕЩЕСТВ И ПРЕДЕЛЬНОЙ ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИЕЙ РЕЛАКСАЦИИ МЕТАНОНОСНОСТИ. СРАВНЕНИЕ С НАТУРНЫМИ ДАННЫМИ

Выполненный комплекс лабораторных исследований позволяет перейти к анализу зависимостей температурных изменений испытанных угольных образцов Кузбасса при изменении уровня нагружения до разрушения с позиций их марочного состава и отвечающего им выхода летучих веществ V^{daf} . *Появляется возможность за счет учета классификации испытанных угольных образцов, представляющих марочный состав (тощих — Т, отощенных спе-*

кающихся — ОС, коксовых — К и жирных — Ж), по стадиям их метаморфизма оценить наличие связи между учитываемым в экспериментах температурным фактором и предельной внутренней энергией релаксации их метаноносности в сравнении с имеющимися натурными данными по угольным месторождениям Кузбасса в целом.

На рис. 8 приведена впервые экспериментально полученная температурная зависимость, отражающая влияние физико-химических и структурных свойств угольных пластов Кузбасса. После проведения эксперимента по нагружению на прессе угольных образцов и одновременной записи термограммы и спекл-фотографий для каждого образца все угольные образцы были подвергнуты техническому анализу, одной из важных характеристик которого является выход летучих веществ V^{daf} .

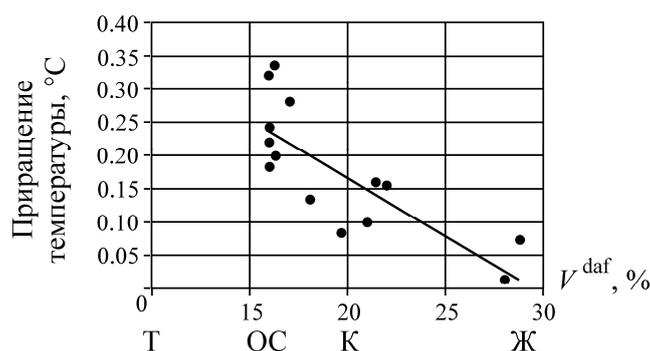


Рис. 8. Изменение приращения температуры с ростом предельного уровня нагружения от выхода летучих веществ V^{daf} образцов угля Кузбасса, представляющих пласты с разным марочным составом

Из сопоставления приращения температуры испытанных образцов от момента нагружения до их разрушения с выходом летучих веществ, в известной мере характеризующих марки углей, следует принципиально важный вывод о том, что углеметановые пласты средней стадии метаморфизма (марки угля ОС-К) при прочих равных геомеханических условиях, связанных с возрастанием уровня горного давления, будут нагреваться значительно быстрее, чем, например, бурые (марки Ж): их температурный градиент по уровню горного давления оказывается до 7 раз больше (!).

Это положение является практически значимым в решении актуальной до ныне проблемы условий самовозгорания угля и последующего возникновения очагов подземных пожаров при отработке угольных месторождений с учетом марочного состава добываемого (и транспортируемого затем до потребителя) угля. С этим же связаны и научно-обоснованные меры по профилактике подобного рода негативных явлений.

Другой важный параметр углей Кузбасса — это предельная внутренняя энергия релаксации их метаноносности, количественно характеризующая состояние системы углеметана при переходе его из одного метастабильного состояния в другое при изменении метаноносности в 2 раза [25].

Эксперименты показали, что при возрастании уровня нагружения образцов угля приращение температуры трендово увеличивается (рис. 7а). Однако при этом происходит и увеличение предельной внутренней энергии релаксации метаноносности, т. е. углеметановая система переходит в термодинамически более возбужденное геомеханическое состояние. Об этом свидетельствует рис. 9, где при увеличении температуры угольного образца на 0.3°C (находившегося в момент эксперимента при температуре 23°C) предельная внутренняя энергия релаксации метаноносности увеличивается в 2 раза.

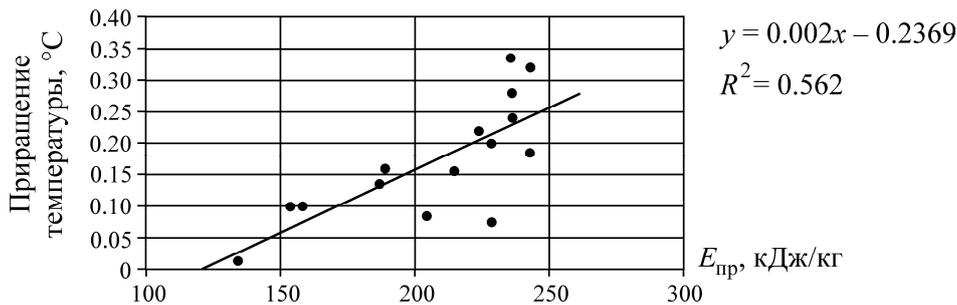


Рис. 9. Зависимость приращения температуры под действием предельных напряжений для образцов угля Кузбасса различной стадии метаморфизма при увеличении предельной внутренней энергии релаксации их метаноносности

В работе [25] установлен эффект бифуркации параметров сорбционной метаноемкости (рис. 10). Эффект заключается в смене по мере роста предельной сорбционной метаноемкости углей a ($7 \leq a \leq 17$ см³/г) градиента устойчивых изменений начальной интенсивности сорбционной метаноемкости G ($8 \leq G \leq 28$ см³/(г·МПа)). Смена градиентов устойчивых изменений с $\psi_1 = 1.5$ 1/МПа на $\psi_2 = 2.0$ 1/МПа происходит в интервале $10 \leq a \leq 12$ см³/г. Интервалу бифуркации соответствуют свойства углей геологических структур, включающих пласты, опасные по внезапным выбросам угля и газа. Наибольшая газодинамическая активность пластов наблюдается при смене градиентов в точке бифуркации. В этих условиях горной практикой установлено снижение выбросоопасной глубины подземных горных работ до 150–200 м. В этой же работе определены значения внутренней энергии релаксации системы “уголь – метан” при смене метастабильных состояний $E_{пр}$ (кДж/кг), как показателя энергии перехода системы из одного метастабильного состояния в другое при изменении метаноносности в два раза.

$$E_{пр} = 0.25 \frac{A}{B}, \quad (2)$$

где A — предельная метаноносность, м³/г; B — коэффициент метаноносности, 1/ МПа. Эти параметры в свою очередь являются функциями выхода летучих веществ, т. е. учитывают марочный состав углей [26].

Максимальные значения энергии (2) получены при выходе летучих веществ 20–25 %, хотя минимальная выбросоопасная глубина составляет 150–200 м (рис. 11). Этому участку на рис. 11 соответствуют наиболее выбросоопасные пласты верхнебалахонской подсерии. Углеметановые пласты кольчугинской серии расположены правее и обладают минимальной энергией.

С учетом изложенных данных и согласно рис. 10 и 11 следует важный вывод о том, что максимальному “энергетическому потенциалу” пластов соответствует крайняя неустойчивость сорбционного потенциала углей. В этих случаях при ведении горных работ углеметановый пласт “генетически” способен сформировать возмущающий импульс от внутренних напряжений, достаточный для развития процесса его саморазрушения. При этом, как показали натурные данные [25], максимальные значения внутренней энергии релаксации и приращение температуры соответствуют интервалу выхода летучих веществ 18–22 % (рис. 8, 11).

Так, внутренняя энергия релаксации на рис. 9 рассчитывалась по (2) для напряжений на прессе, достигающих при разрушении угольных образцов в эксперименте 50 МПа. Это соответствует глубине добычи угля около 2 км. Реальные глубины добычи угля в Кузбассе и соответствующая им внутренняя энергия релаксации приведены на рис. 11.

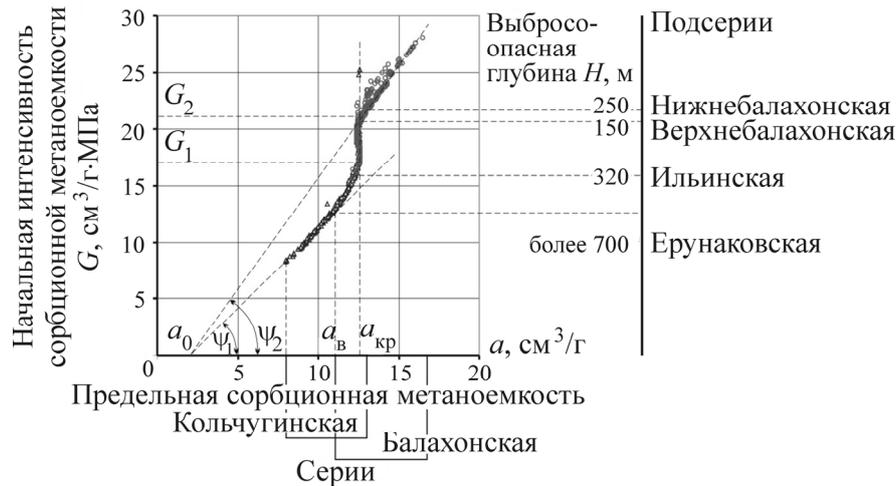


Рис. 10. Изменение показателей сорбционной метаноемкости углей Кузбасса и выбросоопасность пластов при подземной разработке месторождений [25]

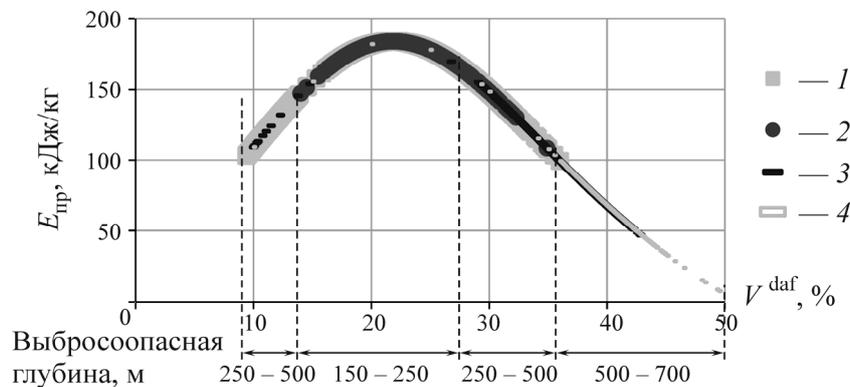


Рис. 11. Изменение предельных значений внутренней энергии релаксации для углей Кузбасса: 1–4 — подсерии: 1 — Верхнебалахонская; 2 — Нижнебалахонская; 3 — Ильинская; 4 — Ерунаковская [25]

ЭВОЛЮЦИЯ ПОЛЕЙ МИКРОДЕФОРМАЦИЙ УГОЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ

Анализ эволюции компонент полей микродеформаций и графики их сканирующих функций. В работах [27, 28] на примере образцов горных пород неорганической природы (песчаник, мрамор, сильвинит), а также из неоднородных искусственных геоматериалов экспериментально доказано, что при определенных уровнях одно- и двухосного их нагружения в жестком режиме возникают низкочастотные процессы внутреннего микродеформирования, генерируемые медленными ($\sim 0.02 - 0.2$ мм/мин) силовыми воздействиями. При этом амплитудно-периодный спектр колебательных движений структурных отдельных частей геоматериалов (по типу связанных между собой физических маятников [29, 30]) существенно зависит от стадии “макродеформирования” породных образцов. Этот результат имеет принципиально важное значение для установления механизма накопления в очаговых зонах разрушения горных пород упругой энергии и установления условий трансформации ее в кинетическую энергию движения структурных элементов массива горных пород [4, 31].

Несомненно, в случае справедливости полученных в [8, 27, 28] результатов и для угольных образцов эффект возникновения осциллирующих движений угольных частиц за счет роста горного давления в продуктивных пластах позволил бы с принципиально иных гео-

механических позиций рассматривать взаимосвязь между пожаро- и выбросоопасностью при отработке угольных месторождений [9, 10]. В таком случае становится практически очевидной механическая роль колебательных движений фракталей и внутренних неоднородностей угольных пластов за счет знакопеременных смещений берегов отделяющих их трещин (!) в иницировании “специфических” газожидкостных массообменных процессов в достаточно больших по объему массивах горных пород с органично насыщенными пластами в результате их отработки и, следовательно, значительного перераспределения взаимодействующих полей напряжений. Отмеченные соображения легли в основу экспериментов на угольных образцах Кузбасса. С подобного рода исследованиями авторы ранее не встречались.

Выделим основные результаты серии экспериментов, осуществленных при одноосном жестком сжатии (до разрушения) призматических образцов угля (см. таблицу). В данных испытаниях образцы угля представляли собой прямоугольные параллелепипеды с размерами сторон 25–40 мм; скорость нагружения составляла 0.2 мм/мин. На рис. 12 приведены диаграммы “напряжение–деформация” для 7 образцов. Пределы прочности принимали значения 17.3–41.2 МПа, предельные деформации составляли $(2.2–5.9) \cdot 10^{-2}$. На рис. 13 представлена зависимость “напряжение–деформация” для угольного образца № 2 (см. таблицу); предел прочности $\sigma^B = 41.2$ МПа, предельная деформация $\varepsilon = 0.026$, время нагружения до разрушения $t_{пр} = 337$ с. Поля микроперемещений и микродеформаций на поверхности образцов записывались с частотой 0.1 с^{-1} .

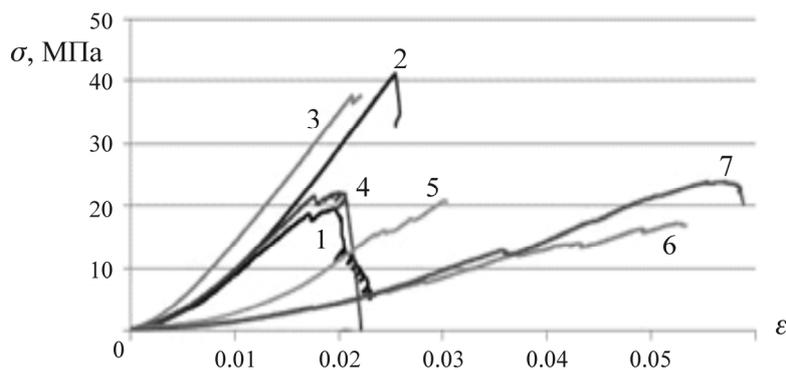


Рис. 12. Примеры диаграмм “напряжение–деформация” для 7 угольных образцов при одноосном сжатии (см. таблицу)

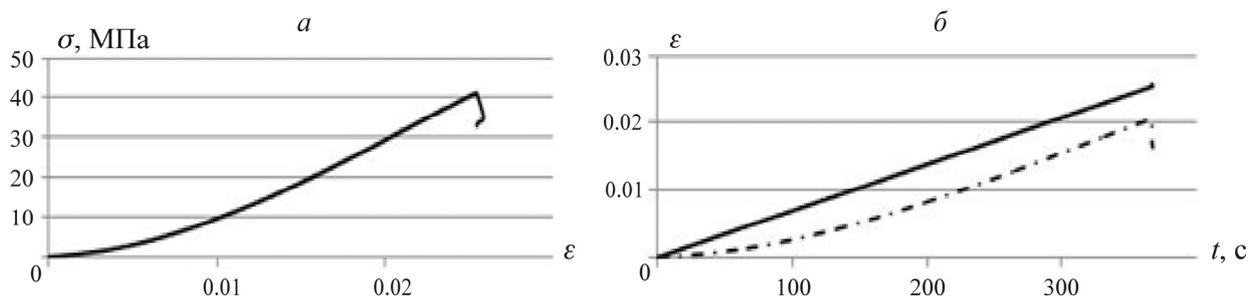


Рис. 13. Диаграммы “напряжение–деформация” (а) и “деформация–время” (б) угольного образца № 2 (см. таблицу). Штрихпунктирной линией показана диаграмма “напряжение–время” в условных координатах $\hat{\sigma} = \sigma / 2000$

Далее на типовом примере (образец № 2) приведем экспериментальные данные и их анализ по эволюции полей микродеформаций на поверхности образца при одноосном жестком сжатии. На рис. 14 показаны снимки деформационного картирования отсканированной поверхности

сти угольного образца № 2 по компоненте деформации в продольном направлении x для значений напряжения $\sigma = 7, 14, 21, 28, 35, 40$ МПа. Отрицательному значению компоненты деформации (уменьшению размера) соответствует цвет, близкий к оттенкам синего. Серо-черный цвет соответствует деформациям $|\varepsilon_x| < 0.001$. Положительным значениям (увеличению размера) соответствует цвет, близкий к оттенкам красного. Белый цвет — деформация ε_x , превышающая 0.01. Анализ сканируемой поверхности показал, что “пластическая” деформация является неоднородной с самого начала нагружения образца геоматериала. Несмотря на то, что заданным видом нагружения угольного образца является одноосное сжатие с постоянной скоростью перемещения траверсы прессы, тем не менее в пространственно-временном поле микродеформаций по сканируемым поверхностям присутствуют области как укорочения, так и удлинения. По мере повышения напряжения они видоизменяются, отражая осциллирующие движения структурных элементов материала в стесненных условиях.

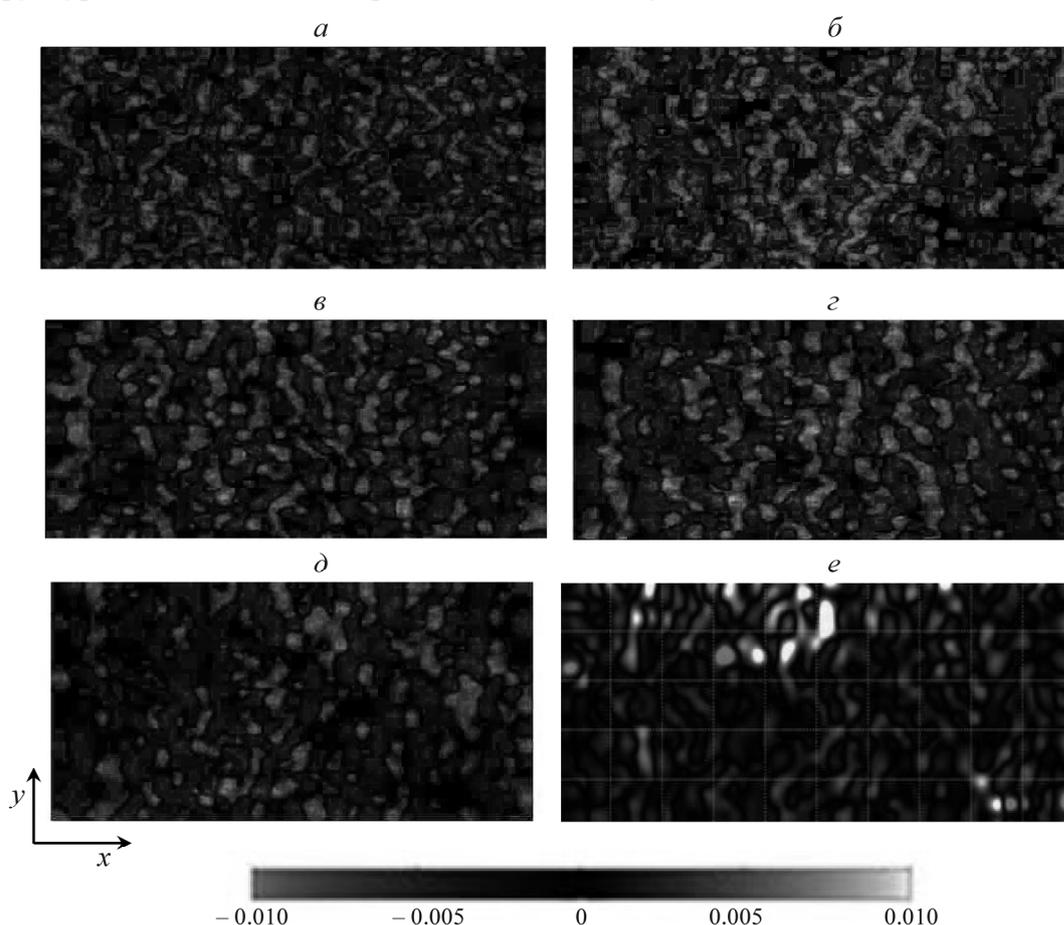


Рис. 14. Снимки картирования сканируемой поверхности по компоненте микродеформации ε_x образца угля в моменты достижения уровней нагружения: $\sigma = 7$ (а), 14 (б), 21 (в), 28 (г), 35 (д), 40 (е) МПа

На рис. 15 представлена сканируемая поверхность образца угля после его разрушения и две смежные области поверхности слева (1) и справа (2) от магистрального разрыва, для которых был проведен сравнительный анализ полей микроперемещений, сканирующих функций [8] и скоростей микродеформаций. На рабочей поверхности образца выделялись две одинаковые по размерам прямоугольные области, для которых рассчитывались суммарные значения компо-

нент микродеформаций в продольном (x), поперечном (y) и сдвиговом (xy) направлениях — ε_x , ε_y и ε_{xy} соответственно. Для оценки деформационно-волнового поведения геоматериала внутри угольных образцов в виде “суммы” вклада элементов сканируемых поверхностей с разнонаправленными (синфазными и антифазными) колебаниями применен энергетический подход. В основе такого подхода лежит сканирующая функция R , которая является аналогом понятия “центра масс” в классической механике и описывает способ определения приведенного центра сейсмоэнерговыведения за заданный период времени в пределах определенного объема массива горных пород согласно [32].

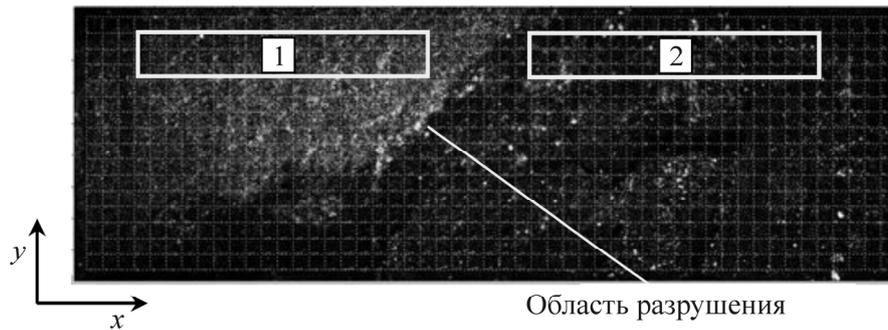


Рис. 15. Сканируемая поверхность образца угля размером 30×10 мм при одноосном сжатии после разрушения (момент времени $t = 337$ с); области поверхности слева (1) и справа (2) от магистрального разрыва

Для данных экспериментов координаты R и соответственно траектория движения приведенного центра деформационного энерговыведения вычисляется по формулам [8]:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N r_i \varepsilon_i}{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i}, \quad (3)$$

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}, \quad (4)$$

где ε_i — деформация в точке $r_i(x_i, y_i)$; x_0, y_0 — начало системы координат (принят геометрический центр рабочей поверхности образца); N — количество измерительных точек на рабочей поверхности образца; суммирование ведется на фиксированный момент времени t_i (кадр i) с известным значением нагрузки от пресса P .

На рис. 16а–в приведены зависимости средних микродеформаций ε_x , ε_y и ε_{xy} : синим цветом — для области (1), красным — для области (2) поверхности образца; черным цветом показана зависимость напряжения от времени в процессе нагружения образца до предела прочности включительно в безразмерных координатах σ / σ^B и $\hat{t} = t / t_{пр}$, где $t / t_{пр} = 1$ отвечает пиковой нагрузке σ^B ($\sigma / \sigma^B = 1$). На рис. 16г–е приведены полученные по формулам (3) и (4) графики сканирующих функций $R_x(t)$, $R_y(t)$ и $R_{xy}(t)$ отдельно по каждой из компонент деформаций ε_x , ε_y , ε_{xy} соответственно в процессе нагружения угольного образца до предела прочности включительно в безразмерных координатах σ / σ^B и $t / t_{пр}$, где $t_{пр}$ — время наступления пиковой нагрузки. В расчетах использовались безразмерные координаты r_i / r_{max} , где $r_{max} = 10$ мм — максимальный размер r_i в продольном направлении образца.

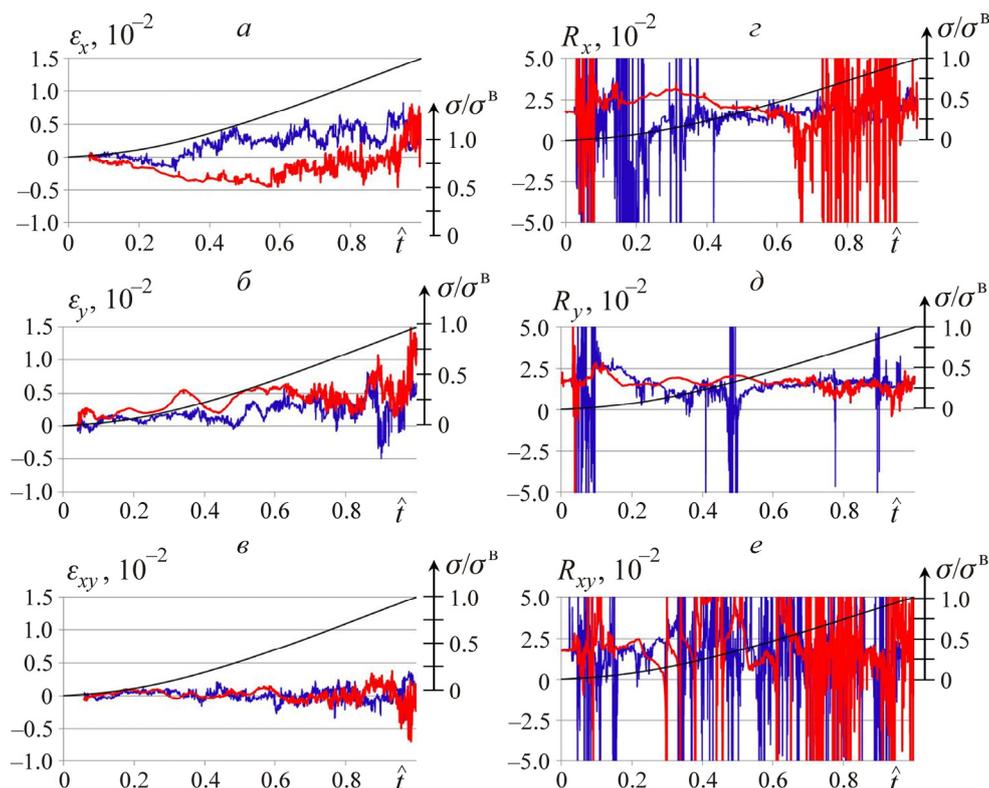


Рис. 16. Зависимости микродеформаций ε_x , ε_y , ε_{xy} и их сканирующих функций $R_x(t)$, $R_y(t)$ и $R_{xy}(t)$ во времени в безразмерных координатах $\hat{t} = t/t_{пр}$, σ/σ^B для эксперимента на одноосное сжатие образца из угля (красный цвет – область 1, синий – область 2)

Отметим следующие особенности поведения ε_x , ε_y , ε_{xy} , $R_x(t)$, $R_y(t)$ и $R_{xy}(t)$:

- микродеформации ε_x в областях 1 и 2 изменяются в противофазе от $\hat{t} = 0.5$ до $\hat{t} = 0.95$, далее их значения становятся практически одинаковыми вплоть до достижения предела прочности;
- микродеформации ε_y в областях 1 и 2 изменяются в противофазе от начала нагружения до $\hat{t} = 0.95$; при $\hat{t} = 0.95 - 1$ они имеют различия более чем в 2 раза, существенно превышая при этом значения микродеформаций ε_x и ε_{xy} ;
- зависимости микродеформаций ε_{xy} в областях 1 и 2 начиная от $\hat{t} = 0.4$ также изменяются в противофазе, однако различие в их абсолютных значениях уменьшается при $\hat{t} = 0.9 - 1$;
- для $\hat{t} = 0.3 - 0.4$ по всем компонентам деформаций возникают высокочастотные колебания, причем компоненты деформации ε_y в сравнении с другими имеют существенно более высокую амплитуду;
- сканирующие функции $R_x(t)$, $R_y(t)$, $R_{xy}(t)$ в областях поверхности 1 и 2 имеют колебательный характер от начала нагружения и до разрушения образца. Однако, если для $R_x(t)$ и $R_{xy}(t)$ наблюдаются довольно резкие знакопеременные изменения, то для $R_y(t)$ амплитуда колебаний как в области 1, так и в области 2 существенно меньше аналогичных для $R_x(t)$ и $R_{xy}(t)$, что свидетельствует о наличии процесса локализации максимальных значений деформации ε_y и сужении размера области, в которой они сосредоточены.

На основании анализа поведения компонент микродеформаций ε_x , ε_y , ε_{xy} , а также их сканирующих функций $R_x(t)$, $R_y(t)$ и $R_{xy}(t)$ можно заключить, что существенное превышение значений микродеформаций ε_y и амплитуды их колебаний в областях 1 и 2 относительно микродеформаций ε_x , ε_{xy} , наряду со стабилизацией сканирующей функции $R_y(t)$, свидетельствует о том, что разрушение должно произойти по преимуществу в направлении y . Причем возможно приблизительно указать (выделить) область локализации будущего макроразрушения.

Анализ скоростей микродеформаций. Для отдельных элементов 1–4 размером 0.5×0.5 мм из анализируемых областей 1 и 2 (рис. 15) построены зависимости компонент микродеформации ε_x , ε_y , ε_{xy} во времени и скоростей их изменения. Элементы 3 и 4 выбраны на границе возникшей трещины разрушения образца; 1 и 2 — на расстоянии приблизительно 10 мм от этой трещины. На рис. 17 приведены “типичные” зависимости изменения одной из компонент микродеформации (ε_y) от нагружения образца в интервале времени от $\hat{t} = 0.75–1$ для 4 элементов поверхности (черный цвет) и их линии тренда (красный цвет). Видно, что для элементов поверхности нарушения сплошности образца значения компонент микродеформации и амплитуд их колебания в несколько раз превышают аналогичные в неразрушенной области.

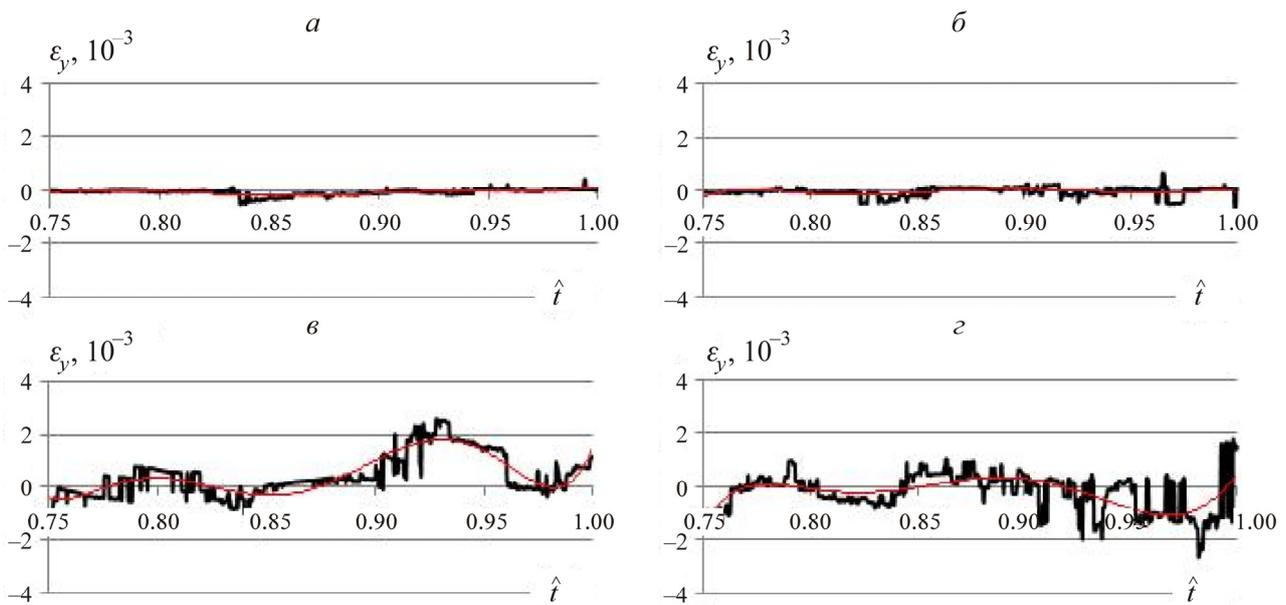


Рис. 17. Типовые зависимости компоненты микродеформации ε_y от времени в безразмерных координатах $\hat{t} = t/t_{np}$ в интервале $\hat{t} = 0.75–1$ для 4 элементов сканируемой поверхности: а — 1, б — 2, в — 3, г — 4; их линии тренда обозначены красным цветом

Для оценки скоростей микродеформаций проведена аппроксимация и сглаживание кривых микродеформации ε_x , ε_y , ε_{xy} в интервале времени жесткого нагружения $\hat{t} = 0.75–1$. Линии тренда кривых для компонент микродеформации ε_x , ε_y , ε_{xy} определялись в виде полиномов 6-й степени. Достоверность аппроксимации составляла 0.85–0.98. Функции изменения скоростей микродеформации $\varepsilon'_x(t)$, $\varepsilon'_y(t)$, $\varepsilon'_{xy}(t)$ от времени определялись как производные от линий тренда изменения деформации от времени $\varepsilon'_y(t)$ (рис. 18).

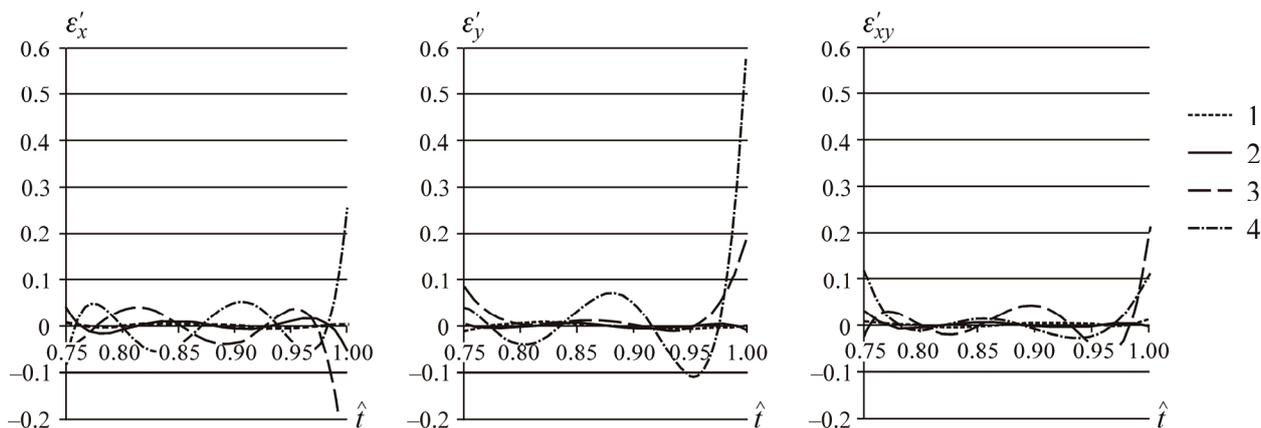


Рис. 18. Зависимости скоростей компонент микродеформации ε'_x , ε'_y , ε'_{xy} для 4 элементов размером 0.5×0.5 мм от безразмерного времени нагружения угольного образца для областей 1 и 2 в интервале $\hat{t} = 0.75 - 1$

Из рис. 18 следует, что в контролируемых элементах 3 и 4 поверхности угольного образца, находящихся в окрестности области будущего “магистрального” разрушения, амплитуды скоростей микродеформации ε'_x , ε'_y , ε'_{xy} превышают аналогичные для элементов 1 и 2 в несколько раз. Для элементов 3 и 4 имеет место тенденция значительного роста скорости всех трех компонент микродеформации ε'_x , ε'_y , ε'_{xy} с увеличением нагрузки, при этом значения скорости микродеформации ε'_y в несколько раз превышают значения ε'_x , ε'_{xy} .

Анализ амплитудно-частотных характеристик микродеформационных волновых процессов. Диаграмма “напряжение–деформация” при одноосном нагружении образца № 2 (рис. 19) состоит из трех условно выделенных участков до предела его прочности. За пределом прочности происходит хрупкое разрушение геоматериала. Диаграмма “напряжение–деформация” условно разделена на 3 стадии нагружения (рис. 19): на 1-й стадии напряжение изменялось от 0 до $\sigma = 1/3\sigma^B$; на 2-й — в интервале $\sigma = (1/3 \div 2/3)\sigma^B$; на 3-й — $\sigma = (2/3 \div 1)\sigma^B$. Для каждого участка — “стадии нагружения” — и для отдельных элементов рабочей поверхности испытуемого образца углем размером 0.5×0.5 мм были построены деформационно-волновые пакеты по осредненным компонентам микродеформаций ε_x , ε_y и ε_{xy} .

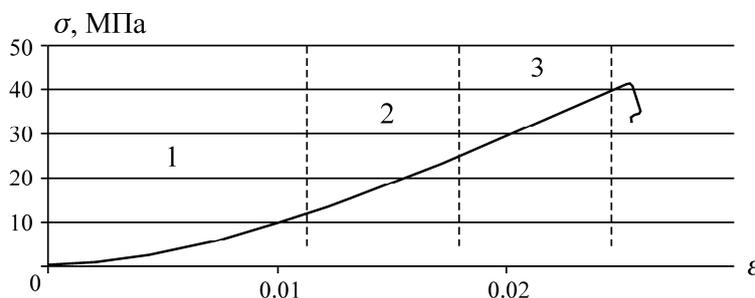


Рис. 19. Условно выделенные стадии деформирования на осредненной диаграмме “напряжение–деформация” для серии опытов на угольных образцах при одноосном сжатии

С помощью быстрого преобразования Фурье определены соответствующие им амплитудно-частотные характеристики. На рис. 20 приведены характерные зависимости изменения во времени амплитудно-частотных характеристик компонент деформации ε_x , ε_y и ε_{xy} для от-

дельных элементов рабочей поверхности образца размером 0.5×0.5 мм по стадиям деформирования. Как следует из рис. 20, на 1-й стадии деформирования при значениях нагрузки, не превышающих $\sigma = 1/3\sigma^B$, колебания компонент микродеформаций не превышают значений 0.008; на 2-й стадии деформирования при значениях напряжений $\sigma = (1/3 \div 2/3)\sigma^B$ амплитуды колебаний возрастают до значений 0.012–0.014; а на 3-й стадии они приобретают существенно более высокие значения — до 0.022–0.03.

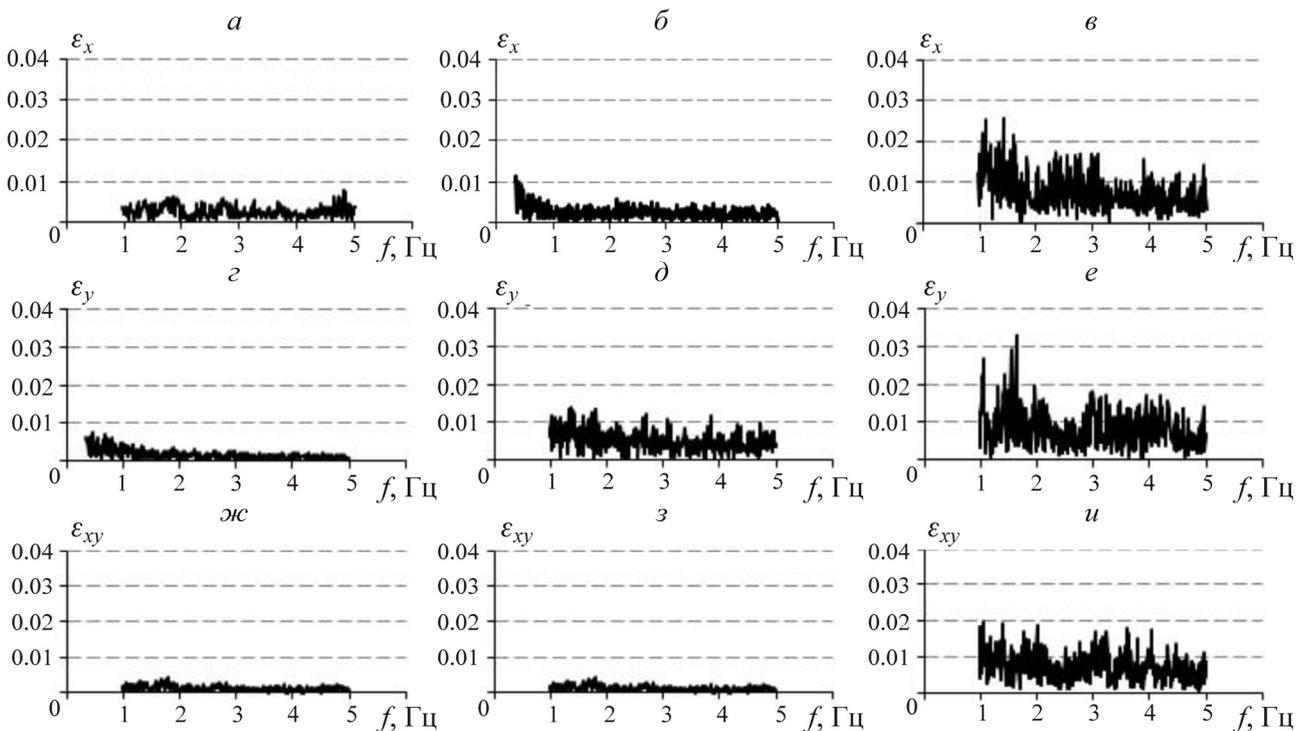


Рис. 20. Амплитудно-частотные характеристики для компонент микродеформаций ε_x , ε_y и ε_{xy} для отдельных выделенных элементов рабочей поверхности образца угля размером 0.5×0.5 мм по трем стадиям деформирования: а, г, ж — стадия 1; б, д, з — стадия 2; в, е, и — стадия 3

Таким образом, исследование эволюции полей микродеформаций, проведенное спекл-методом на угольных образцах при одноосном сжатии, подтверждает основные выводы, сделанные ранее [8, 27, 28] на примере испытания неорганических образцов горных пород и искусственных геоматериалов, обладающих структурной неоднородностью:

— при одноосном нагружении призматических угольных образцов (на прессовой установке Instron 8802 в режиме жесткого нагружения со скоростью перемещения подвижного захвата 0.2 мм/мин) практически от самого начала нагружения возникают низкочастотные процессы внутреннего микродеформирования, генерируемые медленными (квазистатическими) силовыми воздействиями;

— амплитуда таких деформационно-волновых процессов возрастает с увеличением уровня напряжений;

— в элементах сканируемой поверхности угольных образцов, покрывающих область с будущей трещиной, амплитуды скоростей микродеформации ε'_x , ε'_y , ε'_{xy} превышают аналогичные для областей поверхности неразрушаемого геоматериала до 100 раз. В ряде случаев наблюдается тенденция значительного роста скорости деформирования с увеличением нагрузки;

— для оценки деформационно-волнового поведения геоматериалов внутри угольных образцов как “суммы” вклада элементов сканируемых поверхностей с разнонаправленными (синфазными и антифазными) колебаниями применен энергетический подход; определены особенности поведения компонент микродеформаций ε_x , ε_y , ε_{xy} и соответствующих им сканирующих функций $R_x(t)$, $R_y(t)$ и $R_{xy}(t)$ (в продольном, поперечном и сдвиговом направлениях соответственно). Их можно использовать как прогностические параметры для определения времени, места расположения и вида участка формирующейся основной (“магистральной”) трещины макроразрушения.

ВЫВОДЫ

Проведенный комплекс экспериментальных исследований по анализу связей между тепловыми и деформационно-волновыми процессами, возникающими в угольных образцах разного марочного состава (месторождения Кузбасса) при одноосном жестком нагружении до разрушения позволил установить:

— практически с самого начала нагружения со скоростью $\sim 3.3 \cdot 10^{-6}$ м/с в угольных образцах возникают низкочастотные процессы внутреннего микродеформирования, обусловленные движениями структурных элементов по типу колебания связанных между собою “физических маятников”. При этом амплитуда таких колебаний возрастает с увеличением уровня напряжений;

— отмечается статистически значимая связь между возрастанием температуры угольных образцов и их прочностными свойствами, выходом летучих веществ и внутренней энергией релаксации метаноносности соответствующих угольных пластов;

— из зависимости между приращениями температуры угольных образцов от начала их нагружения и до разрушения следует, что углеметановые пласты средней стадии метаморфизма (марки угля ОС-К) при прочих “равных” геомеханических условиях, связанных с возрастанием уровня горного давления, будут нагреваться значительно быстрее, чем, например, бурые угли (марки Ж) за счет различия в их температурных градиентах по уровню горного давления, достигающего семикратного значения;

— распределение индуцируемого температурного поля в нагружаемых образцах угля весьма неоднородно. При этом имеется подобие картин распределения температуры и микродеформаций, обусловленное внутренним строением испытанных образцов угля различных стадий метаморфизма (линейными размерами “механических” неоднородностей).

Установленные закономерности позволяют особо отметить, что при отработке угольных месторождений углеметановые пласты “генетически” способны при определенных геомеханических и термофизических условиях сформировать газодинамический возмущающий импульс от внутренних напряжений, достаточный для развития процессов их саморазрушения с сопутствующими выбросами угля и газа.

Поскольку понятие “температуры” — энергетическое в своей основе, а обсуждаемые зависимости приращений температуры для образцов угля различных марок (стадий метаморфизма) при их нагружении до разрушения получены при комнатной температуре, то в перспективных исследованиях, безусловно, следовало бы акцентировать внимание на поиске связей между относительными приращениями температуры Кельвина: связи между $\Delta T/T$ и обсуждаемыми в настоящей статье физико-химическими и геомеханическими параметрами угля различной стадии метаморфизма (марочного состава) — при различных значениях абсолютной температуры в градусах Кельвина.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Авгушевич И. А., Броневец Т. М., Еремин И. В. и др.** Аналитическая химия и технический анализ угля. — М.: Недра, 1987.
2. **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.
3. **Деструкция** земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия / В. Н. Опарин, А. Д. Сашурин, А. В. Леонтьев и др. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012.
4. **Адушкин В. В., Опарин В. Н.** От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. III // ФТПРПИ. — 2014. — № 4.
5. **Дырдин В. В., Смирнов В. Г., Шепелева С. А.** Параметры состояния метана при фазовых переходах в краевой зоне выбросоопасного угольного пласта // ФТПРПИ. — 2013. — № 6.
6. **Смирнов В. Г.** Оценка возможности трещинообразования внутри объема угля при возникновении выбросоопасного состояния пласта // ГИАБ. — 2013. — № 5.
7. **Смирнов В. Г., Манакон А. Ю., Дырдин В. В.** Энергия активации процесса разложения и образования гидратов метана в порах природного угля // Вестн. КузГТУ. — 2014. — № 3.
8. **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.
9. **Опарин В. Н., Киряева Т. А., Гаврилов В. Ю., Шутилов Р. А., Ковчавцев А. П., Танайно А. С., Ефимов В. П., Астраханцев И. Е., Гренев И. В.** О некоторых особенностях взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами в угольных пластах Кузбасса // ФТПРПИ. — 2014. — № 2.
10. **Опарин В. Н., Киряева Т. А.** Генетические причины выбросо- и пожароопасности угольных пластов Кузбасса // ГИАБ. — 2015. — № 3.
11. **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.
12. **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.
13. **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.
14. **Усольцева О. М., Назарова Л. А., Цой П. А., Назаров Л. А., Семенов В. Н.** Исследование генезиса и эволюции нарушений сплошности в геоматериалах: Теория и лабораторный эксперимент // ФТПРПИ. — 2013. — № 1.
15. **Полевщиков Г. Я., Киряева Т. А.** Газодинамическая устойчивость углеметана // ГИАБ. — 2009. Отд. выпуск 7. Кузбасс-1.
16. **Скрицкий В. А.** Эндогенные пожары в угольных шахтах, природа их возникновения, способы предотвращения и тушения. — Кемерово: Кузбассвуиздат, 2006.
17. **Малинникова О. Н.** Связь выбросоопасности с температурой пласта // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: материалы XVI Междунар. науч. шк. им. академика С. А. Христиановича. — Симферополь, 2006.
18. **Ковчавцев А. П.** Тепловизор: лучше один раз увидеть // Наука из первых рук. — 2012. — № 5.

19. Шейнин В. И. и др. Диагностика быстрых периодических изменений напряжений в горных породах по данным инфракрасной радиометрии // Физика Земли. — 2001. — № 4.
20. Лыков А. В. Теория теплопроводности. — М.: Высш. шк., 1967.
21. Дортман Н. Б. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. — М.: Недра, 1984.
22. Опарин В. Н., Танайно А. С. Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении. — Новосибирск: Наука, 2011.
23. Oparin V. N., Tanaino A. S. A new method to test rock abrasiveness based on physico-mechanical and structural properties of rocks, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.12.004>.
24. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. — М.: ГИФМЛ, 1965.
25. 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.
26. Киряева Т. А. Оценка ресурсов метана в Кузбассе с учетом новых представлений о его состоянии в угольном пласте // ФТПРПИ. — 2012. — № 5.
27. Опарин В. Н., Усольцева О. М., Семенов В. Н., Цой П. А. Эволюция напряженно-деформированного состояния образцов из искусственных геоматериалов при их одно- и двухосном нагружении // Вестн. Инженерной школы ДВФУ. — 2014. — № 3(20).
28. Oparin V. N., Usoltseva O. M., Tsoi P. A., and Semenov V. N. Evolution of stress-strain state in the structural heterogeneities geomaterials under uniaxial and biaxial loading, Journal of Applied Mathematics and Physics (ISSN: 2327 – 4352), 2014.
29. Курленя М. В., Опарин В. Н. О явлении знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия // ФТПРПИ. — 1990. — № 4.
30. 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.
31. Опарин В. Н. Энергетический критерий объемного разрушения горных пород // Труды науч. семинара “Неделя горняка-2009”. — М.: Изд-во МГГУ, 2009.
32. Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Востриков В. И. и др. О возможных причинах увеличения сейсмической активности шахтных полей рудников “Октябрьский” и “Таймырский” Норильского месторождения в 2003 г. // ФТПРПИ. — ч. I: Сейсмический режим, 2004. — № 4; ч. II: рудник “Октябрьский”, 2004. — № 5; ч. III: рудник “Таймырский”, 2004. — № 6; ч. IV: Влияние площадей подработки налегающих породных массивов, 2005. — № 1.

Поступила в редакцию 2/VI 2015