

УДК 621.3.08 + 622

**ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА И ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЭВОЛЮЦИИ АКУСТО-ДЕФОРМАЦИОННЫХ И
ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ, ИНДУЦИРУЕМЫХ В ПРОЦЕССАХ
ФЛЮИДОРАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

**В. Н. Опарин^{1,2}, В. И. Востриков¹, О. М. Усольцева¹,
П. А. Цой^{1,3}, В. Н. Семенов¹**

¹*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

²*Новосибирский государственный университет,
ул. Пирогова, 20, 630090, г. Новосибирск, Россия*

³*Новосибирский государственный технический университет,
просп. К. Маркса, 20, 630073, г. Новосибирск, Россия*

Разработаны методика и стендовое оборудование для исследования эволюции физических полей различной природы при моделировании флюидоразрыва в геосредах. Стенд предназначен для синхронной регистрации полей: макро- и микродеформаций, теплового, акустической эмиссии при нагружении физических моделей, имитирующих геосреду, до нарушения сплошности. Отработана методика эксперимента, проведены тестовые испытания. Анализ “синхронизированных” экспериментальных данных позволяет сделать вывод о существовании пространственно-временной взаимосвязи между физическими полями различной природы, сопутствующих процессам разрушения твердых тел.

Физическая модель, лабораторный эксперимент, деформация, флюидоразрыв, акустическая эмиссия, спекл-метод, стенд, эволюция напряженно-деформированного состояния, физические поля, взаимосвязь

ВВЕДЕНИЕ

Нарушение сплошности геосреды под воздействием внешних или внутренних напряжений приводит к различным видам разрушений горной породы, которые генерируют поля различной физической природы: деформационное, теплое, микросейсмической и электромагнитной эмиссии. За последние годы выполнено достаточно много экспериментально-теоретических исследований, посвященных изучению особенностей протекания процесса разрушения горных пород под нагрузками и проявлению изменений, происходящих при этом в деформационном, температурном полях, а также в структуре сопутствующих сигналов микросейсмической и электромагнитной эмиссии.

Так, в работе [1] проведен анализ распределений по энергии сигналов акустической эмиссии на двух масштабных уровнях: при деформировании гранитных образцов и при измерениях, выполняемых на действующем горном предприятии. Показано, что по виду соответствующих

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-05-07566) на оборудовании ЦКП ГГИ СО РАН.

распределений уже на ранних этапах нагружения можно выделять пространственную область образца, в которой в дальнейшем произойдет локализация дефектообразования. В работе [2] приведены лабораторные исследования по регистрации точечной акустической эмиссии при длительном нагружении образцов доломита и мрамора с целью изучения динамики изменения спектров акустических сигналов и установления взаимосвязи с процессом развития механических нарушений на разных стадиях нагружения вплоть до образования магистральной трещины. Работа [3] посвящена экспериментальному исследованию пространственно-временной локализации процессов деформирования и разрушения горных пород при квазистатическом сжатию и растяжению образцов с использованием методов акустической эмиссии и построения полей микродеформаций на поверхности образца спекл-методом.

В [4, 5] представлены результаты экспериментальных исследований особенностей формирования и проявления акустоэмиссионного и деформационного эффектов памяти в образцах антрацита на различных стадиях трехосного циклического деформирования по схеме Кармана в допредельной и запредельной областях. В [6, 7] исследуются механизмы возникновения механических напряжений в горных породах при различных режимах их нагревания. Обосновываются и анализируются теоретические модели акустической эмиссии, возникающей под действием этих напряжений. В [8] экспериментально исследованы и теоретически обоснованы закономерности низкотемпературной термостимулированной акустической эмиссии, возникающей в образцах горных пород различных генотипов и пористости при одноосном механическом нагружении. В [9] рассмотрены возможности применения лазерной ультразвуковой спектроскопии при исследовании горных пород, позволяющей судить о степени трещиноватости геоматериалов, а также прогнозировать и оценивать возможные проявления их нелинейных свойств.

В [10] получены временные последовательности сигналов акустической эмиссии, генерируемых микротрещинами. В [11–13] приведены результаты высокоскоростной регистрации методом акустической эмиссии ударного трещинообразования в образцах материалов, существенно различных по степени однородности (плавленого кварца и гранита), показаны закономерности формирования и развития диссипативных мезотрещинных структур в образцах горных пород и в массивах вокруг подземных выработок, представлены математические модели, приведен и проверен концентрационный критерий разрушения твердых тел в более крупных масштабах, в том числе и для массивов горных пород. Анализ лабораторных экспериментов [14] на одноосное и трехосное сжатие образцов гранита показал, что эволюция трещины разрушения в образцах горной породы полностью характеризуется сигналами акустической эмиссии в сочетании с напряженно-деформированным состоянием. В исследовании [15] представлено сравнение особенностей сигналов акустической эмиссии (АЭ) при двух видах нагружения — квазистатическом и динамическом разрушении гранита.

В [16] впервые систематизированы результаты энергетических оценок при механо-электромагнитных преобразованиях в процессах разрушения образцов горных пород, а в [17] описана трехканальная автоматизированная система для испытания образцов горных пород на одноосное сжатие в режиме совместной регистрации давления, перемещений и сопутствующего электромагнитного излучения.

В последние годы появился ряд работ, посвященных применению спекл-метода для исследования поля микродеформаций при разрушении геоматериалов [18–23]. В [19] обосновано применение спекл-фотографических методов для исследования деформирования и разрушения горных пород. В исследованиях [20] с использованием спекл-метода дан анализ поля микродеформаций геоматериалов в процессе нагружения до разрушения. Показано, что возникающее поле микродеформаций существенно неоднородно. В [21] приведен анализ полей компонент

микрододеформации в продольном, поперечном и сдвиговом направлениях при испытаниях на ползучесть; показано, что при уровне нагрузки около 0.5 от предела прочности появляются зоны локализации микрододеформаций, значительно превышающие средние значения по поверхности образца, которые в дальнейшем формируют зоны разрушения. В [22] рассмотрены результаты испытания физической модели с предварительно ослабленными зонами, которая подвергалась двухосному неравнокомпонентному нагружению. С помощью спекл-метода подробно исследована эволюция поля микрододеформаций, введен новый параметр, характеризующий локализацию микрододеформаций.

В ИГД СО РАН проведено теоретическое и экспериментальное исследование генезиса и нарушений сплошности в геоматериалах [23]: создан стенд для исследования полей смещений и додеформаций на микроуровне при двухосном нагружении; разработан и экспериментально обоснован новый подход, позволяющий построить определяющие уравнения додеформирования нарушений сплошности, образующихся при разрушении породных массивов.

В [24] с помощью спекл-метода на образцах горных пород со структурой (в виде их естественных или искусственных неоднородностей) проведено детальное исследование особенностей распределения и эволюции поля микроперемещений в процессе одноосного и двухосного нагружения до разрушения. Предложен оригинальный метод количественного описания возникновения и развития сложных додеформационно-волновых процессов.

Таким образом, из отмеченных работ, а также с учетом [25] феноменологически и теоретически следует, что между додеформационным и температурным полями, а также сигналами, сопутствующими микросейсмической и электромагнитной эмиссии, должна существовать детерминированная связь. Это следует также из активно разрабатываемых в настоящее время экспериментально-теоретических основ нелинейной геомеханики [26–30].

Тем не менее практически отсутствуют исследования, в которых была бы сделана попытка получить комплексную связь между ними. Последняя могла бы стать надежным критерием при оценке стадийности процесса разрушения, что необходимо при мониторинге тектонической активности и прогноза разрушения горных пород.

Наиболее близка к поставленной в данном исследовании проблеме работа [31], в которой при нагружении образца с отверстием проведены измерения микрододеформаций с помощью спекл-метода, температуры (инфракрасным тепловизором); одновременно регистрировалась и акустическая эмиссия. Здесь рассмотрены особенности развития этих полей на разных стадиях нагружения и показано, что между ними существует пространственно-временная связь.

СТЕНД И КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ МЕЖДУ ФИЗИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ В ПРОЦЕССАХ РАЗРУШЕНИЯ ГЕОМАТЕРИАЛОВ: МАКРО- И МИКРОДОДЕФОРМАЦИЙ, ТЕПЛОВОГО, АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Для исследования параметров полей макро- и микрододеформации, теплового, микросейсмической эмиссии, генерируемых при нарушении сплошности геологической среды от воздействия различных видов нагружения (источников) создан многопараметрический комплекс, функциональная схема которого приведена на рис. 1. Он включает в себя стенд, состоящий из сервогидравлического пресса с камерой для объемного нагружения, систему управления флюидоразрывом, комплекта измерительного оборудования для синхронной регистрации взаимодействия физико-механических полей: микрододеформаций, микросейсмической эмиссии, теплового и систему видеорегистрации процесса додеформирования. Функционирование оборудования осуществляется оригинальной системой синхронизации измерений исследуемых в эксперименте физико-механических полей.

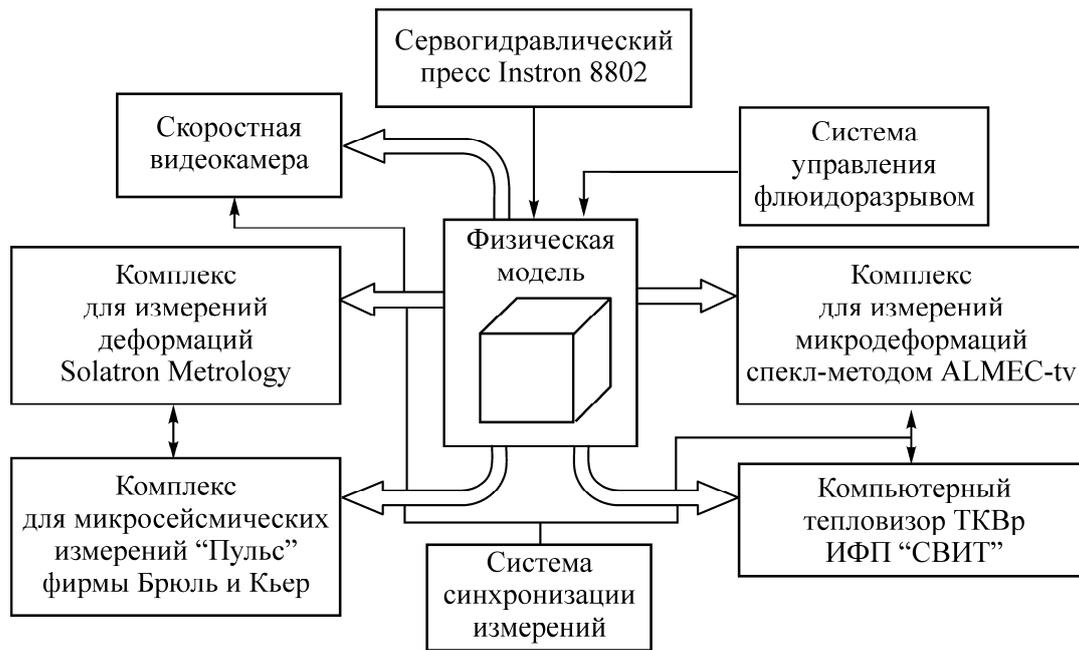


Рис. 1. Функциональная схема многопараметрического комплекса для измерения физико-механических полей и осуществления видеосъемки

Общий вид многопараметрического измерительного комплекса приведен на рис. 2. Испытания проводятся на сервогидравлическом прессе фирмы Instron, позволяющем реализовывать программы нагружения с заданной скоростью по усилиям ($1 \div 1000$ кг/мин) и по перемещениям ($0.001 \div 1$ мм/мин), вести непрерывную запись нагрузок и перемещений. Для регистрации микродеформаций используется автоматизированная система анализа цифровых спекл-фотографий ALMEC-tv [23, 24], которая осуществляет измерение с частотой до 27 кадров в секунду при пространственном разрешении по смещениям не ниже 1 мкм. В процессе нагружения испытуемого образца прибор проводит оптическую обработку спекл-фотографий и после программной обработки выдает координаты и величину смещений точек поверхности исследуемого объекта с временной привязкой для дальнейшего построения и анализа компонент тензора микродеформаций. Для выполнения экспериментов по нарушению сплошности геоматериала с помощью флюидоразрыва по методике [32] разработана специальная система управления флюидоразрывом, которая позволяет непрерывно с постоянной скоростью подавать флюид в полость физической модели для ее разрыва. Устройство может менять скорость подачи флюида.

Пресс укомплектован специально сконструированным блоком, позволяющим испытывать модели геосреды в режиме двухосного сжатия. Дополнительный блок создает сжимающее усилие, ортогональное к задаваемому прессом (рис. 3). В захватах пресса 1 фиксируется специальное устройство 3, имеющее вид рамы, состоящей из двух частей, в которую устанавливается испытываемая модель 2. Нормальное (прижимающее) усилие создается гидравлическим цилиндром 5 и контролируется манометром и электронным датчиком давления. Нормальное перемещение фиксируется с помощью четырех датчиков Solartron DP10S (6), расположенных в плоскости, перпендикулярной нормальному усилию. В процессе испытания непрерывно фиксируются и записываются в компьютерный файл усилие, задаваемое прессом, перемещение траверсы, горизонтальное усилие и соответствующее ему перемещение.

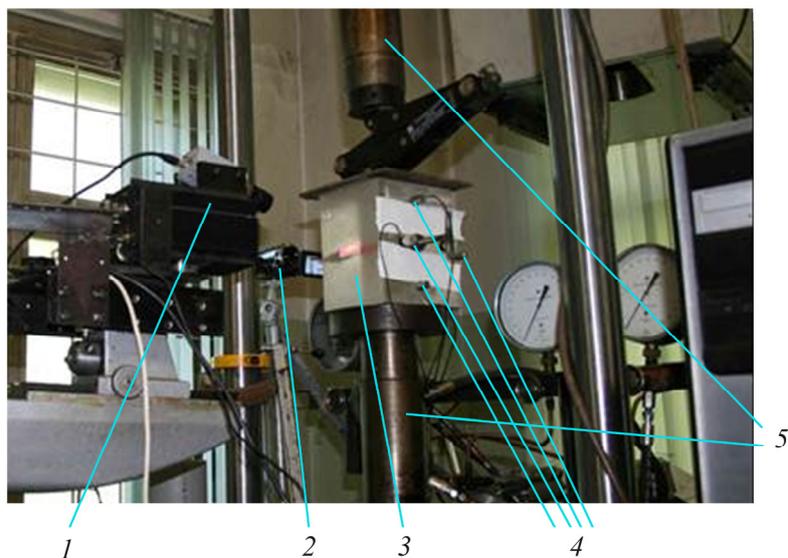


Рис. 2. Общий вид многопараметрического комплекса для измерения физико-механических полей (макро- и микродеформаций, теплового, акустической эмиссии) и осуществления видеосъемки: 1 — прибор для измерения спекл-методом; 2 — видеокамера; 3 — физическая модель геосреды; 4 — акселерометры; 5 — захваты пресса Instron 8802

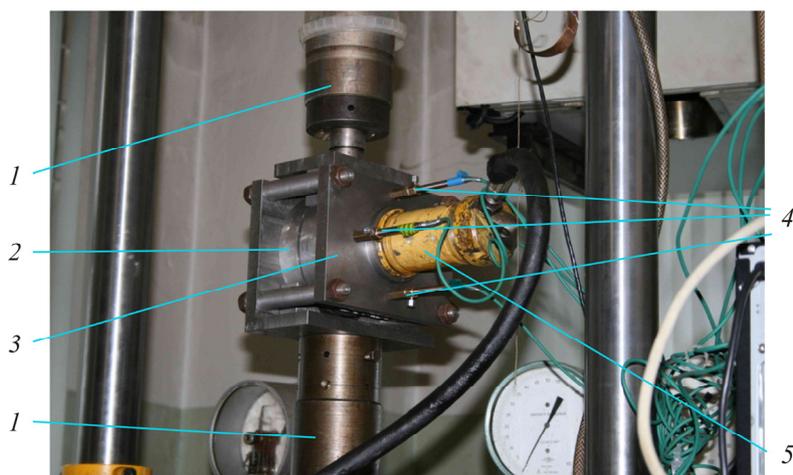


Рис. 3. Устройство для испытаний модели геосреды в режиме двухосного сжатия: 1 — захваты пресса; 2 — модельный образец; 3 — устройство размещения модели геосреды; 4 — четыре датчика для измерения горизонтального перемещения; 5 — гидравлический цилиндр для создания горизонтального перемещения

На рис. 4 показана физическая модель, на которой отрабатывалась методика проведения экспериментов. Модель представляет собой прямоугольный параллелепипед из оргстекла размерами 200×167×145 мм, который имеет полость для создания флюидоразрыва. В процессе эксперимента в полость с постоянной скоростью объемного расхода подавалась вязкая среда (пластилин). Спекл-методом непрерывно измерялись поля микроперемещений на поверхности параллелепипеда. Микросейсмические сигналы регистрировались с помощью акселерометров KD 91 многоканальной системой “Pulse”. Одновременно велась видеосъемка. Для регистрации температурного поля использовался компьютерный тепловизор ТКВр-ИФП “СВИТ”, разработанный и изготовленный в Институте физики полупроводников СО РАН (температурная чувствительность NETD = 0.03 °С, спектральный диапазон инфракрасного излучения прибора 2.6–3.05 мкм).

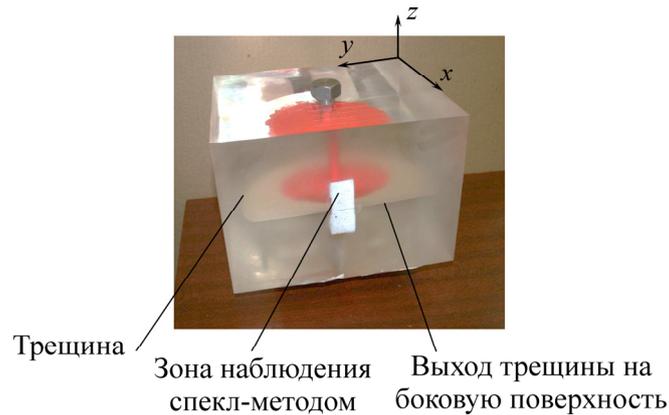


Рис. 4. Физическая модель геосреды после проведения эксперимента с флюидоразрывом

Для исключения погрешности от лазерного излучения, создаваемого прибором ALMEC-tv при измерении инфракрасного поля тепловизором на физической модели, предварительно осуществляли тестовое испытание. На поверхности объекта измеряли тепловое поле, затем поверхность освещали лазером. Повторное измерение теплового поля показало, что лазерное излучение не вносит в него значительных изменений. Этого и следовало ожидать, так как длина волны лазерного излучения составляла 0.632 мкм.

Затем измеряли объем нарушения сплошности, полученного в результате флюидоразрыва. На боковой поверхности модели была нанесена сетка по координатам x и y , в узлах которой фиксировались изменения вертикальной координаты z после проведения эксперимента.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ТЕСТОВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

На модели из оргстекла проведен тестовый эксперимент по исследованию нарушения сплошности с помощью направленного управляемого флюидоразрыва с целью исследования закономерностей физико-механических полей и выявления связей между ними. По окончании эксперимента выполнен анализ полученных результатов с позиций:

- эволюции во времени полей микродеформаций на боковой поверхности параллелепипеда в области выхода трещины флюидоразрыва на его поверхность по мере прорастания трещины;
- изменения во времени сигналов акустической эмиссии;
- расчета объема нарушения сплошности, полученного в результате флюидоразрыва;
- взаимосвязи указанных физических полей с процессом распространения трещины флюидоразрыва на основании видеосъемки.

Результаты анализа эволюции во времени полей микродеформаций на боковой поверхности модели в области наблюдения спекл-методом

Анализ эволюции полей микродеформаций и распространения области флюидоразрыва по видеосъемке показал, что имеется достаточно хорошая корреляция между величиной и знаком микродеформаций ε_z в зависимости от распространения зоны флюидоразрыва (рис. 5).

На рис. 5а, в, д, ж представлены снимки деформационного картирования отсканированной поверхности модели геосреды — область наблюдения спекл-методом (рис. 4). Уменьшению деформации соответствует цвет, близкий к оттенкам синего. Цвет, близкий к черному, соответствует нулевым деформациям. Положительным значениям (увеличению размера) соответствует цвет, близкий к оттенкам красного, белый цвет — деформация, превышающая по модулю значение 0.007. На рис. 5б, г, е, з приведены фотографии объекта геосреды в соответствующие рис. 5а, в, д, ж моменты времени: красным цветом показана зона флюидоразрыва. Зафиксированы моменты эксперимента, когда радиус зоны флюидоразрыва составлял $R = 0.2l; 0.35l; 0.65l; 0.9l$ (l — расстояние от центра полости на грани параллелепипеда).

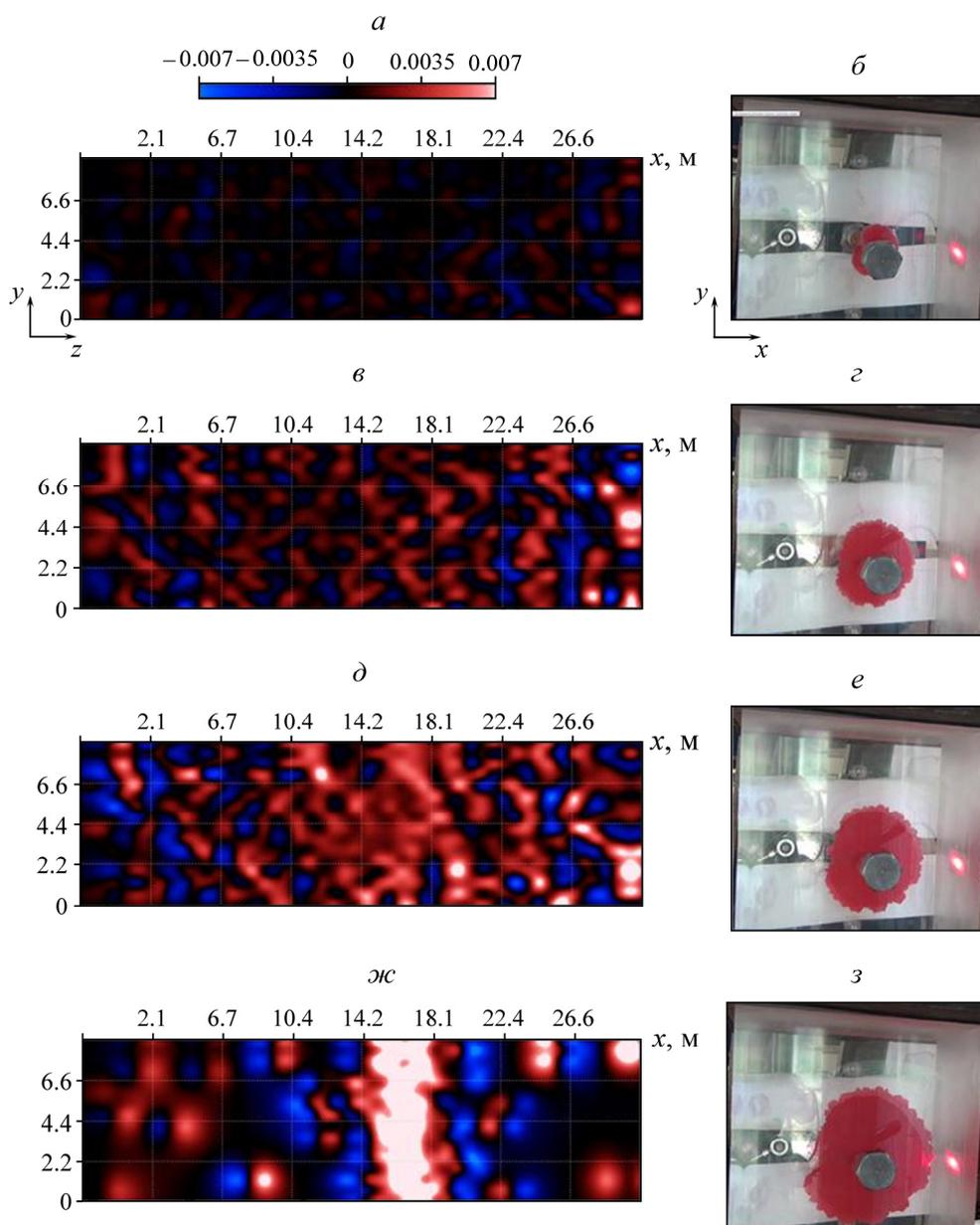


Рис. 5. Снимки деформационного картирования отсканированной поверхности модели геосреды (размер области наблюдения 30×10 мм) по компоненте деформации в продольном z -направлении образца (*a*, *в*, *д*, *жс*) и фотографии объекта геосреды в соответствующие моменты времени: *a*, *б* — $R = 0.2l$; *в*, *з* — $R = 0.35l$; *д*, *е* — $R = 0.65l$; *жс*, *з* — $R = 0.9l$

На рис. 5*a* ($R = 0.2l$) поле микродеформаций ε_z в основном черного цвета, что говорит об их близких к нулю значениях. На рис. 5*в* ($R = 0.35l$) преобладает красный цвет, т. е. возникающие площади областей растяжения превышают области сжатия; при $R = 0.65l$ (рис. 5*д*) вся средняя часть зоны наблюдения спекл-методом красного или белого цвета, в ней отмечаются только микродеформации удлинения; белый цвет свидетельствует о превышении микродеформацией ε_z значений 0.007. На рис. 5*жс* ($R = 0.9l$) белая полоса в центре говорит о появлении зоны локализации микродеформаций, значения которых существенно превышают средние по поверхности; это — будущая область выхода трещины флюидоразрыва на поверхность параллелепипеда.

На поверхности области наблюдения выделены две линии 1 и 2 (рис. 6а), по которым рассчитывались средние значения компонент микродеформаций в продольном z , поперечном y и сдвиговом zy направлениях ε_z , ε_y и ε_{zy} соответственно. На рис. 6б приведены графики средних микродеформаций: синим цветом для линии 1 (слева от трещины), красным для линии 2 (справа от трещины), по оси абсцисс — безразмерное время $\hat{t} = t/t_{пр}$ ($t_{пр}$ — время выхода трещины на боковую поверхность).

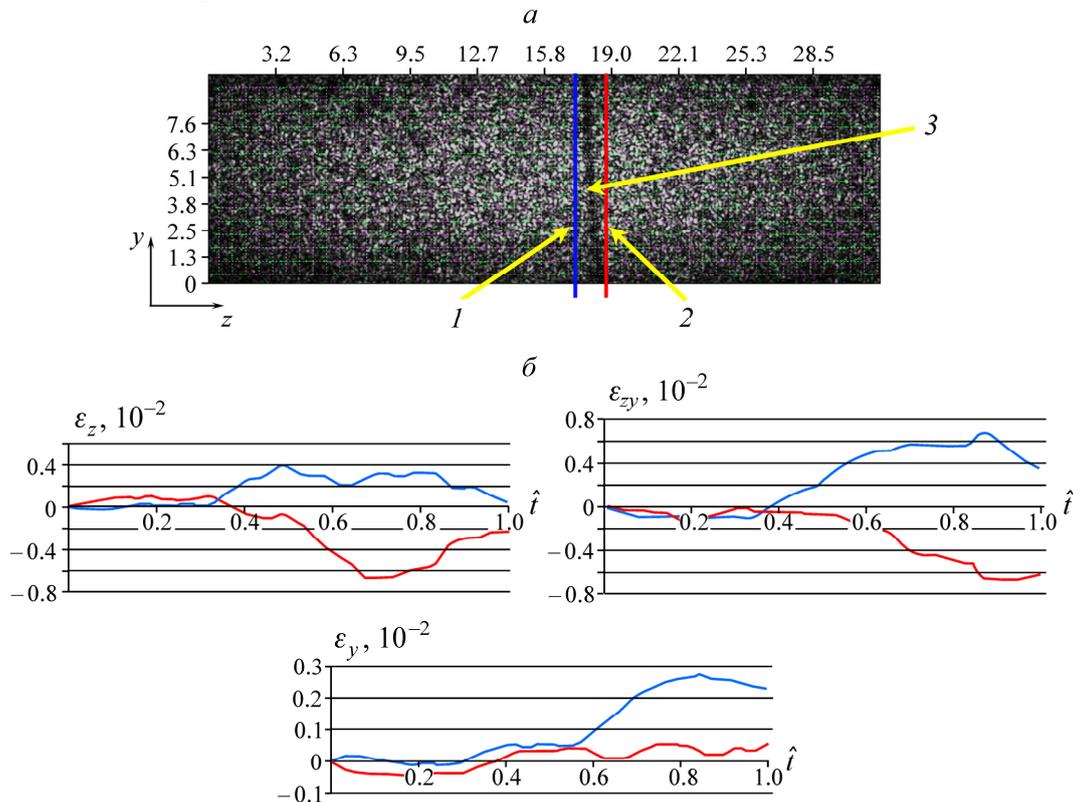


Рис. 6. Область наблюдения: а — сканируемая поверхность модели геосреды после разрушения; 1 и 2 — линии, по которым рассчитывались средние микродеформации; 3 — трещина; б — зависимости средних микродеформаций ε_y , ε_z и ε_{zy} от времени в безразмерных координатах

Из приведенных графиков можно отметить следующие особенности в поведении компонент микродеформаций:

- средние микродеформации ε_z по линиям 1 и 2 изменяются практически в противофазе начиная от значений $\hat{t} = 0.35$, имеют место противоположные знаки и значительно различаются по величине;
- зависимости средних микродеформаций ε_{zy} по линиям 1 и 2 начиная от $\hat{t} = 0.4$ ведут себя аналогичным образом;
- микродеформации ε_y по линиям 1 и 2 практически одинаковы до значений $\hat{t} = 0.6$, далее они различаются в 5–10 раз.

Указанные особенности поведения деформационных микрохарактеристик свидетельствуют о том, что разрушение модели может произойти по компонентам ε_z и ε_{zy} . Действительно, на фотографии сканируемой поверхности образца геоматериала (рис. 6а) видно, что трещина располагается под углом $70–75^\circ$ к оси z .

Таким образом, анализ эволюции во времени компонент микродеформаций на поверхности параллелепипеда в области выхода трещины флюидоразрыва на его поверхность по мере прорастания трещины показал, что поле микродеформаций изменяется определенным образом при приближении границы трещины к этой поверхности. Это означает, что по регистрируемому микродеформационному полю на поверхности можно судить о деструктивных процессах, происходящих внутри наблюдаемого объекта.

Расчет объема нарушения сплошности внутри модели твердого тела в результате флюидоразрыва

На рис. 7 желтыми точками показаны узлы сетки, цифрами — значения по координате z , в нижнем левом углу находится начало координат. Объем полости, полученной в результате флюидоразрыва модели оргстекла, представляет собой объем фигуры, ограниченной по координате z заданной сеточной поверхностью, а в плоскости oxy — прямоугольником с площадью $190 \times 165 \text{ мм}^2$. Искомый объем вычислялся с помощью тройных интегралов. Каждый из 36 прямоугольных элементов сетки разбивался на два прямоугольных треугольника; далее по заданной сетке рассчитывался объем нарушения сплошности, полученный в результате флюидоразрыва.

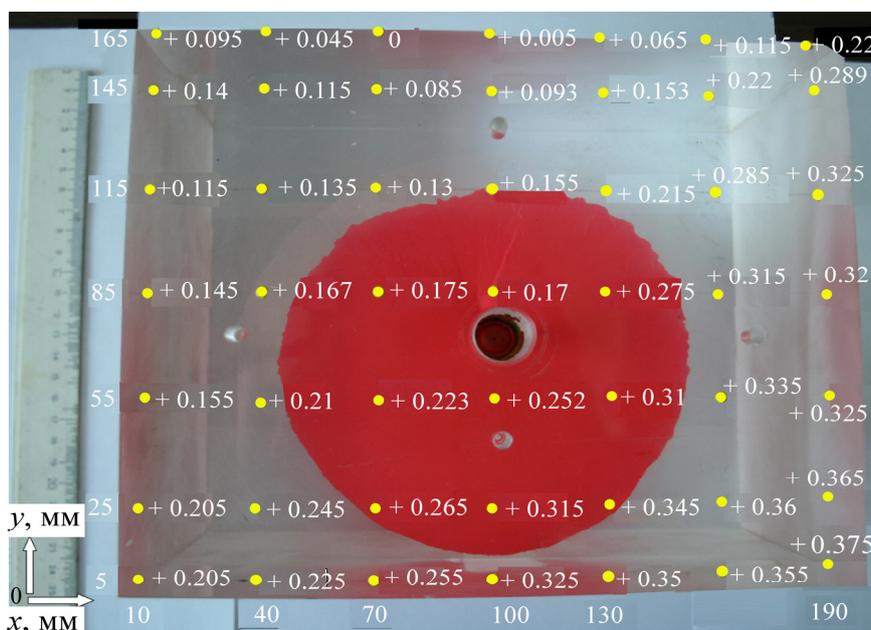


Рис. 7. Поверхность модели геосреды с нанесенной сеткой координат

Таким образом, общий объем разбит на множество, состоящее из 72 элементарных объемов треугольных (правых и левых) призм. Для вычисления объема полости, полученной в результате гидроразрыва, необходимо определить объем каждой из призм, а затем их сложить.

Входными данными для правых и левых призм (рис. 8) послужили соответствующие три точки сетки с координатами (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) и (x_3, y_3, z_3) . Объемы правых призм V_{Π} вычислялись по формуле

$$V_{\Pi} = \iiint_V dx dy dz = \int_{x_1}^{x_2} dx \int_{y_1}^{K_4x+K_5} dy \int_0^{K_1x+K_2y+K_3} dz = \frac{K_6}{3}(x_2^3 - x_1^3) + \frac{K_7}{2}(x_2^2 - x_1^2) + K_8(x_2 - x_1), \quad (1)$$

где

$$K_1 = \frac{(z_2 - z_1)(y_3 - y_1) - (z_3 - z_1)(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)}, \quad K_2 = \frac{(x_2 - x_1)(z_3 - z_1) - (x_3 - x_1)(z_2 - z_1)}{(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)},$$

$$K_3 = z_1 - K_1 x_1 - K_2 y_1, \quad K_4 = \frac{y_3 - y_1}{x_3 - x_1}, \quad K_5 = y_1 - K_4 x_1, \quad K_6 = K_1 K_2 + \frac{K_2 K_4^2}{2},$$

$$K_7 = K_1 K_5 + K_3 K_4 + K_2 K_4 K_5 - K_1 y_1, \quad K_8 = K_3 (K_5 - y_1) + \frac{K_2}{2} (K_5^2 - y_1^2).$$



Рис. 8. Прямоугольный элемент координатной сетки, разбитый на два треугольных элемента

Объемы левых призм $V_{\text{л}}$ вычислялись по формуле

$$V_{\text{л}} = - \iiint_V dx dy dz = - \int_{x_1}^{x_3} dx \int_{y_1}^{K_4 x + K_5} dy \int_0^{K_1 x + K_2 y + K_3} dz = - \frac{K_6}{3} (x_3^3 - x_1^3) - \frac{K_7}{2} (x_3^2 - x_1^2) - K_8 (x_3 - x_1), \quad (2)$$

где $K_1 - K_6$ рассчитывались по формуле (1), а коэффициенты K_7 и K_8 из выражений

$$K_7 = K_1 K_5 + K_3 K_4 + K_2 K_4 K_5 - K_1 y_1, \quad K_8 = K_3 (K_5 - y_1) + \frac{K_2}{2} (K_5^2 - y_1^2).$$

В результате значение объема нарушения сплошности от флюидоразрыва оказалось равным

$$\sum_{i=1}^{72} ((V_{\text{п}})_i + (V_{\text{л}})_i) = 6328.9 \text{ мм}^3.$$

Как показал анализ изменения режима во времени сигналов акустической эмиссии, в момент образования трещины регистрируется наибольший по амплитуде и частотному диапазону микросейсмический сигнал, а прорастание трещины происходит дискретно. При этом генерируются пакеты широкополосных по частоте микросейсмических сигналов. При выходе трещины на поверхность генерируется мощный низкочастотный сигнал.

Подробному анализу эволюции физико-механических полей в процессах флюидоразрушения твердых тел и геоматериалов будут посвящены отдельные публикации.

ВЫВОДЫ

Разработаны и экспериментально испытаны оригинальная измерительная система и стенд для контроля эволюции акусто-деформационных и тепловых полей, индуцируемых в процессах флюидоразрушения твердых тел из горных пород.

Тестовый анализ экспериментальных данных, полученных на новом испытательном стенде с комплексной синхронизированной системой измерения параметров физико-механических полей различной природы, позволил установить пространственно-временную взаимосвязь между полем акустической эмиссии, эволюцией поля микродеформаций и развитием зоны флюидоразрыва, что важно в прогнозных оценках и раннем предупреждении о деструктивных процессах в массивах горных пород и разрушаемых материалах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дамаскинская Е. Е., Кадомцев А. Г.** Отклонение от закона Гутенберга–Рихтера // Письма в ЖТФ. — 2013. — Т. 39. — Вып. 2.
2. **Соболев Г. А., Лементуева Р. А., Лось В. Ф.** Изучение спектров акустических сигналов // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: тез. докл. IX Междунар. школы-семинара. — Иркутск, 2013.
3. **Пантелеев И. А., Плехов О. А., Наймарк О. Б.** Особенности локализации деформаций при одноосном нагружении горных пород // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: тез. докл. IX Междунар. школы-семинара. — Иркутск, 2013.
4. **Шкуратник В. Л., Филимонов Ю. Л., Кучурин С. В.** Особенности эффекта Кайзера в образцах угля на различных стадиях трехосного осесимметричного деформирования // ФТПРПИ. — 2007. — № 1.
5. **Вознесенский А. С., Устинов К. Б., Шкуратник В. Л.** Теоретическая модель акустической эмиссии при механическом нагружении горных пород в области максимального уплотнения // ПМТФ. — 2006. — Т. 47. — № 4.
6. **Винников В. А., Шкуратник В. Л.** О теоретической модели термоэмиссионного эффекта памяти в горных породах // ПМТФ. — 2008. — Т. 49. — № 2.
7. **Винников В. А., Вознесенский А. С., Устинов К. Б., Шкуратник В. Л.** Теоретические модели акустической эмиссии в горных породах при различных режимах их нагревания // ПМТФ. — 2010. — Т. 51. — № 1.
8. **Шкуратник В. Л., Новиков Е. А., Ошкин Р. О.** Экспериментальное исследование термостимулированной акустической эмиссии образцов горных пород различных генотипов при одноосном нагружении // ФТПРПИ. — 2014. — № 2.
9. **Шкуратник В. Л., Черепецкая Е. Б.** Лазерная ультразвуковая спектроскопия как новый перспективный метод геоконтроля // Изв. вузов. Горн. журн. — 2009. — № 1.
10. **Щербаков И. П., Куксенко В. С.** Накопительная стадия сигналов акустической эмиссии при компрессионном и ударном разрушении гранита // ФТПРПИ. — 2012. — № 4.
11. **Щербаков И. П., Куксенко В. С., Чмель А. Е.** Неэкстенсивный статистический анализ данных высокоскоростной регистрации ударного разрушения твердых тел // Письма в ЖЭТФ. — 2011. — Т. 94. — Вып. 5.
12. **Куксенко В. С., Гузев М. А., Макаров В. В., Рассказов И. Ю.** Концепция сильного сжатия горных пород и массивов // Вестн. ДГТУ: электрон. период. издание. — 2011. — № 3/4 (8/9).
13. **Куксенко В. С., Махмудов Х. Ф., Манжиков Б. Ц.** Концентрационная модель разрушения твердых тел и прогнозирование катастрофических ситуаций крупномасштабных объектов // ФТПРПИ. — 2010. — № 4.
14. **Zhao X. G., Caib M., Wanga J., Maa L. K.** Damage stress and acoustic emission characteristics of the Beishan granite, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, Vol. 64.
15. **Chmel A., Shcherbakov I.** A comparative acoustic emission study of compression and impact fracture in granite, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, Vol. 64.
16. **Опарин В. Н., Яковицкая Г. Е., Вострецов А. Г., Серяков В. М., Кривецкий А. В.** О коэффициенте механо-электромагнитных преобразований при разрушении образцов горных пород // ФТПРПИ. — 2013. — № 3.
17. **Опарин В. Н., Вострецов А. Г., Кривецкий А. В., Бизяев А. А., Яковицкая Г. Е.** Измерительная система совместной регистрации давления, перемещений и сопутствующего электромагнитного излучения при одноосном испытании образцов горных пород // ФТПРПИ. — 2011. — № 5.

18. Беспалько А. А., Яворович Л. В., Колесникова С. И. и др. Исследование изменений характеристик электромагнитных сигналов при одноосном сжатии образцов горных пород Таштагольского рудника // Изв. вузов. Физика. — 2011. — № 1/2.
19. Зуев Л. Б., Баранникова С. А., Надежкин М. В., Горбатенко В. В. Локализация деформации и возможность прогнозирования разрушения горных пород // ФТПРПИ. — 2014. — № 1.
20. Shao-Peng Ma, Xiang-Hong Xu, Yong-Hong Zhao. The geo-DSCM system and its application to the deformation measurement of rock materials, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, Vol. 41.
21. Yunliang Tan, Yanchun Yin, and Tongbin Zhao. Investigation of rock failure pattern in creep by digital speckle correlation method, Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2013 (2013), Article ID 916069. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/916069>.
22. Shao-Peng M., Shan-Jun L., Guan-Chang J. An experimental study of the failure process of en-echelon fault structure using digital speckle correlation method, Chinese journal of geophysics, 2005, Vol. 48, No. 6.
23. 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.
24. 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.
25. 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 Н. В. О некоторых особенностях взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами в угольных пластах Кузбасса // ФТПРПИ. — 2014. — № 3.
26. Курленья М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа V_μ // ДАН. — 1993. — Т. 333. — № 4.
27. 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.
28. 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.
29. 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.
30. 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.
31. Yingwei Shi, Qun He, Shanjun Liu, and Lixin Wu. The Time-space relationship between strain, temperature and acoustic emission of loaded rock, Progress in Electromagnetics Research Symposium, Chine, 2010.
32. Кю Н. Г. Особенности разрушения горных пород при флюидоразрыве пластичными веществами // ФТПРПИ. — 2011. — № 4.

Поступила в редакцию 15/III 2015