

УДК 622.02:539.2

В.И. Шейнин, Д.И. Блохин

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАДИЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ОБРАЗЦОВ КАМЕННОЙ СОЛИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ
РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ ПО ДАННЫМ
АКУСТОЭМИССИОННОЙ И ТЕРМОРАДИАЦИОННОЙ
ДИАГНОСТИКИ***

Описаны испытания образцов каменной соли при различных видах нагружения в условиях одноосного сжатия, в которых производилась синхронная регистрация изменений акустоэмиссионных, терморadiационных и тензометрических параметров. Цель работы - обоснование эффективности разрабатываемой методики комплексной диагностики процессов деформирования геоматериалов применительно к рассматриваемому типу геоматериалов. Результаты экспериментов указывают на возможность использования методики в системах мониторинга реальных геомеханических событий.

Ключевые слова: каменная соль, напряжение, деформация, акустическая эмиссия, инфракрасное излучение.

Процессы деформирования и разрушения твердых тел, включая и геоматериалы, сопровождаются излучениями различной природы (акустическая эмиссия [1 — 4], радиоволновые импульсы [5 — 8], излучения в инфракрасной области [9 — 13], люминесцентные вспышки [14 и др.] и др. В связи с тем, что современные высокочувствительные детекторы акустических и электромагнитных излучений позволяют с достаточной точностью измерять вариации их параметров, в настоящее время предложен целый ряд методик, основанных на использовании указанных эффектов и позволяющих получать информацию об изменениях напряженно-деформированного состояния твердых тел. Однако, однозначная идентификация изменений механиче-

ского состояния геоматериалов на основе таких измерений наталкивается на значительные трудности. Эти трудности связаны, в основном, со следующими факторами: сложность построения адекватных теоретических моделей, описывающих зависимости измеряемых физических параметров от изменений напряжений и деформаций и необходимость решения «обратных» задач, недостаточная разрешающая способность доступной экспериментальной аппаратуры, наличие фоновых, шумовых составляющих в регистрируемых сигналах.

Для эффективного оценивания параметров деформационных процессов, происходящих на разных стадиях изменения напряженного состояния геоматериалов, необходим комплексный подход, в котором рас-

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 10-05-00687-а).

смаатриваемые процессы исследуются одновременно различными методами, что дает возможность наиболее эффективного использования потенциальных возможностей каждого из них на различных стадиях процесса деформирования и при различных режимах нагружения.

Ранее в работах НИИОСП им. Н.М. Герсевича [11 — 13] было показано, что для идентификации «быстропротекающих» процессов изменений упругих напряжений в геоматериалах перспективным подходом является использование данных бесконтактных терморadiационных измерений. В методике [11 — 13] используются два известных термодинамических эффекта: изменение температуры твердого тела при адиабатическом изменении первого инварианта тензора напряжений [15] и зависимость интенсивности инфракрасного излучения с поверхности тела от температуры [16].

В ходе инициированных этими работами исследований были поставлены более общие методические задачи использования различных эмиссионных эффектов для диагностики процессов деформирования геоматериалов.

В частности, рассматривалась возможность расширения диапазона использования ИК — диагностики при «неадиабатических» условиях деформирования и при значениях нагрузок, приближающихся к «предразрушающим» и разрушающим величинам [13].

Для диагностики различных стадий процессов деформирования материалов наиболее распространенным подходом является использование акустоэмиссионных измерений, по параметрам которых возможно следить за накоплением числа трещин и оцени-

вать их размеры [17]. Этот подход апробирован и на различных типах геоматериалов. С другой стороны, в работе [18] было показано, что концентрация и размер трещин в образце геоматериала в значительной степени определяют также и динамику вариаций интенсивности ИК — излучения, сопровождающего изменение его напряженного состояния. Поскольку при приближении к стадии разрушения деформирование геоматериалов сопровождается процессами активного трещинообразования, а именно эти процессы в твердых телах являются основным источником интенсификации тепловыделения, то эффективность ИК — диагностики изменений механического состояния геоматериалов может быть повышена за счет комплексирования с данными синхронных измерений параметров АЭ. Цель настоящей работы — проведение экспериментов, направленных на установление комплекса взаимосвязанных параметров акустоэмиссионных (АЭ) и терморadiационных (ИК —) сигналов, достоверно передающих информацию о протекании и стадийности процессов деформирования геоматериалов.

Исследования проводились на экспериментальном стенде, позволяющем вести автоматизированную синхронную регистрацию механических, терморadiационных и акустоэмиссионных параметров при различных схемах и режимах нагружения. Принципиальная схема экспериментального стенда показана на рис. 1.

В качестве первичного приемника ИК — излучения используется бесконтактный детектор изменений интенсивности оптического излучения в инфракрасном диапазоне длин волн РТН —31. Детектор 1 ус-

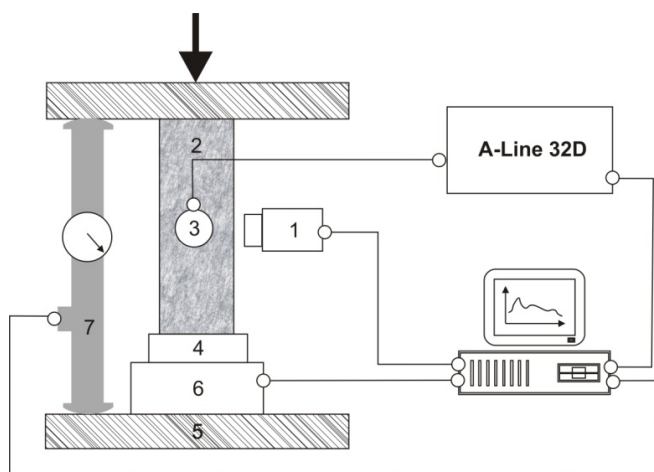


Рис. 1. Схема экспериментального стенда и расположения датчиков

танавливается примерно в середине высоты образца 2 на расстоянии 0,5..1 см от его поверхности. Между пластинкой 4, на которую опирается образец, и плитой 5 устанавливается тензометрический элемент 6 для измерения изменений приложенного к образцу усилия.

Кроме того, в состав измерительной установки включен индикатор продольной деформации 7, находящийся между плитой 5 и подвижной траверсой пресса.

Регистрация активности акустической эмиссии dN/dt (число импульсов в секунду), являющейся одним из часто используемых в лабораторных и натурных геомеханических исследованиях акустоэмиссионных параметров [1—4], велась пьезопреобразователем 3 посредством измерительного комплекса A-Line 32D в полосе частот от 30 до 500 кГц. Преобразователь акустических сигналов размещается на свободной поверхности образца на одной высоте с датчиком ИК — излучения.

Испытания проводились на цилиндрических образцах (диаметром

36...38 мм и высотой 66...72 мм) каменной соли, которая может быть отнесена к категории «слабых горных пород». Для испытаний были подготовлены две группы образцов из двух разных месторождений. Одноосное сжатие осуществлялось в двух различных режимах: при постоянной скорости нагружения ($d\sigma_1/dt = const$) (образцы первой группы) и при постоянной скорости продольной деформации ($d\varepsilon_1/dt = const$) (образцы второй группы).

Одним из методических вопросов, решавшихся в ходе описываемых экспериментов, — выявление диапазонов скоростей нагружения, при которых удается достаточно четко идентифицировать процессы деформирования и их различные стадии по изменениям регистрируемых эмиссионных параметров. Сложность такого выбора состоит в том, что, если для АЭ — измерений их информативность повышается при уменьшении скорости нагружения, то для ИК — измерений — наоборот.

Диапазоны скоростей изменения напряжений для различных геоматериалов, при которых АЭ — измерения являются эффективными, указываются в ряде публикаций, например [2, 3 и др.]. Для ИК — измерений соответствующие оценки [11—13 и др.] основываются на необходимости соблюдения условий «квазиadiaбатического» деформирования при проведении измерений.

Условие адиабатичности процесса деформирования в буквальном смысле означает, что должен отсутствовать

теплообмен между деформирующимся твердым телом и окружающей средой [15]. Очевидно, что в реальных лабораторных, а тем более в натуральных условиях это требование может быть выполнено лишь приближенно. Однако степень такого приближения вполне достаточна, если скорость изменения температуры образца за счет термомеханических процессов будет значительно больше, чем скорость соответствующих изменений за счет теплообмена. Минимальные пороги скорости изменения напряженного состояния, при которых, в фиксированных условиях проведения эксперимента, выполняется требуемое соотношение скоростей изменений температуры, в лабораторных условиях могут быть оценены путем выполнения серий испытаний с различными скоростями изменения нагрузки [11]. Следует отметить, что в появившихся в последнее время работах [19, 20], интересных в техническом отношении, не уделено внимания указанным необходимым условиям проведения эффективных терморadiационных измерений, вследствие чего зависимости параметров ИК — излучения от времени, представленные в этих сообщениях, во многом теряют свою представительность. На самом деле, экспериментальная оценка влияния скорости нагружения на особенности изменения параметров теплового излучения, т.е. соблюдение условий квази-диабатичности, является необходимым этапом методического обеспечения ИК — диагностики изменений напряженного состояния геоматериалов.

С учетом рекомендаций [2, 11], при проведении описываемых экспериментов в режиме с постоянной скоростью нагружения образцов $d\sigma_1/dt = \text{const}$ величины $d\sigma_1/dt$ в отдельных опытах

принимались равными от 0,05 МПа/с до 0,5 МПа/с. В опытах, в которых $d\varepsilon_1/dt = \text{const}$ значения скоростей изменения продольной деформации $d\varepsilon_1/dt$ варьировались в пределах от 0,005 до 0,02 мм/с.

На рис. 2 представлены графики изменения во времени осевого напряжения $\sigma_1(t)$ 1, интенсивности ИК — излучения $V_w(t)$ 2 и активности АЭ $dN(t)/dt$ 3 при деформировании образца каменной соли с постоянной скоростью возрастания нагрузки $d\sigma_1/dt = \text{const} = 0,35$ МПа/с.

Анализируя зависимость $V_w(t)$ (рис. 2, график 2) можно сделать вывод, что ее возрастание приобретает нелинейный характер в достаточно явно фиксируемой точке $\sigma_1 \approx 10$ МПа (рис. 2, график 1). Указанное значение σ_1 , как видно из соответствующей диаграммы « $\sigma_1 - \varepsilon_1$ » (рис. 3), соответствует пределу упругости σ_e материала образца. Предел прочности образца σ_c фиксируется еще более четко по точке, в которой графики достигают максимумов, и перестает выполняться режим $d\sigma_1/dt = \text{const}$. Аналогичные результаты получены при испытаниях образцов при различных $d\sigma_1/dt$, принимавшихся в диапазоне от 0,3 МПа/с до 0,5 МПа/с. Следовательно, в указанном диапазоне $d\sigma_1/dt$ с помощью терморadiационных измерений момент начала неупругого деформирования каменной соли идентифицируется вполне достоверно.

Результаты акустикоэмиссионных измерений (см. график 3 на рис. 2) при таких условиях эксперимента оказались менее информативными, т.е. не позволяют четко зафиксировать моменты перехода между стадиями деформирования испытывае-

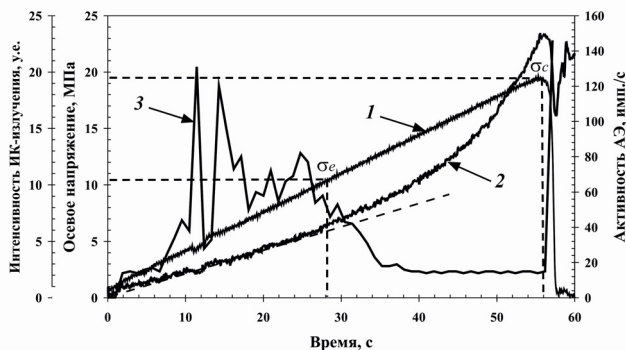


Рис. 2. Зависимости от времени осевого напряжения (1), интенсивности ИК — излучения (2) и активности акустической эмиссии (3) при $d\sigma_1/dt = \text{const} = 0,35 \text{ МПа/с}$

мого образца. В то же время, при «малых» скоростях $d\sigma_1/dt \leq 0,3 \text{ МПа/с}$ полученные записи зависимостей активности АЭ от времени (рис. 4) позволяют осуществлять «привязку» участков с различным поведением значений $dN(t)/dt$ к различным стадиям деформирования образца. На рис. 4 и 5 для одного из опытов представлены полученная зависимость $dN(t)/dt$ и соответствующая диаграмма « σ_1 - ε_1 » при $d\sigma_1/dt = \text{const} = 0,2 \text{ МПа/с}$.

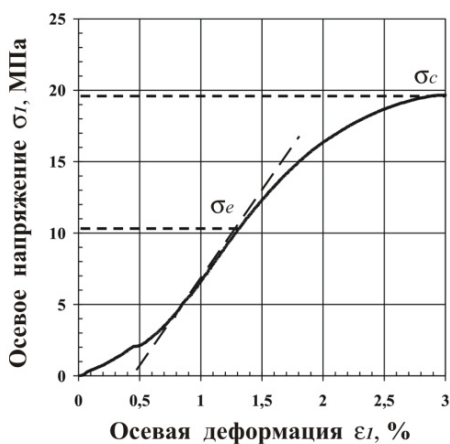


Рис. 3. Диаграмма « σ_1 - ε_1 » при $d\sigma_1/dt = \text{const} = 0,35 \text{ МПа/с}$

Рассмотрим зависимость $dN(t)/dt$ (график 1, рис. 4) при монотонном возрастании нагрузки во времени, показанном на том же рисунке (график 3). После характерного всплеска активности АЭ при начальных нагрузках («пригрузке») значения $dN(t)/dt$ остаются незначительными до момента времени, когда напряжения σ_1 в образце становятся более $(0,4 \dots 0,6) \times \sigma_c$. Далее начинается второй участок возрастания активности АЭ, в пределах которого $dN(t)/dt$ достигает максимальных значений в конце зоны линейно — упругого деформирования (см. рис. 4, 5). Следующее за этим участком постепенное убывание значений $dN(t)/dt$ заканчивается кратковременным «затишьем», которое предшествует «ураганному» росту активности АЭ после достижения осевым напряжением в образце предела прочности σ_c .

Диагностика процессов упругого деформирования образцов каменной соли по изменениям сопутствующего теплового излучения при скоростях нагружения $d\sigma_1/dt \leq 0,3 \text{ МПа/с}$ малоинформативна, поскольку при таких скоростях нагружения требование адиабатичности процесса уже не выполняется. Так, на рис. 6 на графиках зависимостей интенсивности ИК — излучения от нагрузки, полученных при испытаниях со скоростями нагружения $0,2 \text{ МПа/с}$ и $0,1 \text{ МПа/с}$, появляется «горизонтальный» участок в зоне упругих деформаций, соответствующий интервалу нагрузки, при котором теплообмен с окружающей средой «зашумляет»

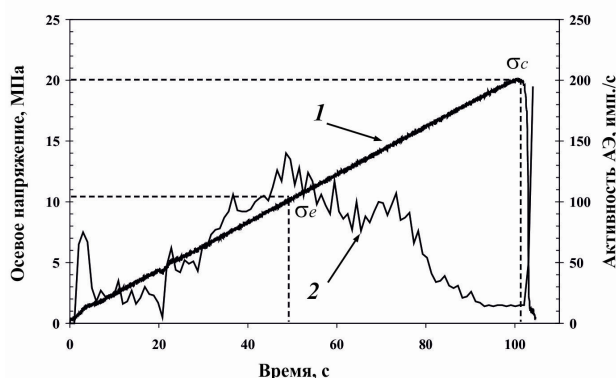


Рис. 4. Зависимости от времени осевого напряжения (1) и активности акустической эмиссии (2) при $d\sigma_1/dt=0,2$ МПа/с

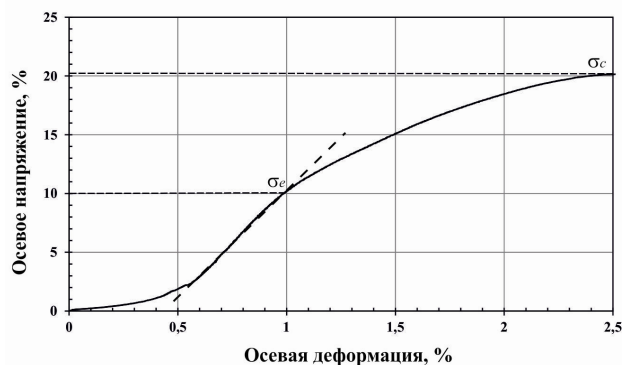


Рис. 5. Диаграмма « σ_1 - ε_1 » при $d\sigma_1/dt=const=0,2$ МПа/с

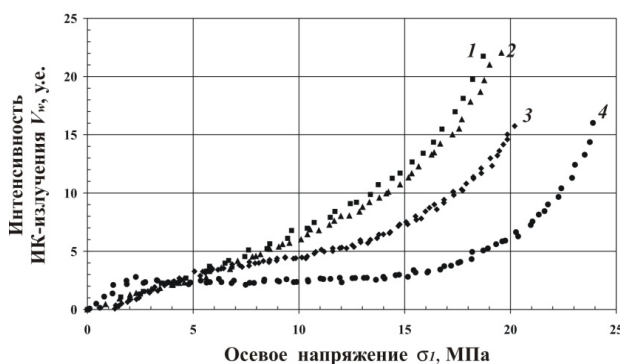


Рис. 6. Зависимости интенсивности ИК — излучения от осевого напряжения при различных скоростях нагружения: 1 — $d\sigma_1/dt=const=0,5$ МПа/с; 2 — $d\sigma_1/dt=const=0,35$ МПа/с; 3 — $d\sigma_1/dt=const=0,2$ МПа/с; 4 — $d\sigma_1/dt=const=0,1$ МПа/с

изменения температуры образца за счет термомеханических процессов.

В таких условиях эксперимента по данным терморadiационных измерений не удастся достаточно четко зафиксировать точку перехода σ_e образца в зону неупругих деформаций. Оценка значения σ_e может быть получена при таких значениях $d\sigma_1/dt$ по результатам соответствующих акустоэмиссионных и (или) тензометрических измерений.

Рассмотрим обозначение стадий деформирования по результатам испытаний образцов каменной соли в режиме постоянной скорости деформирования $d\varepsilon_1/dt=const$. При этих испытаниях зависимости изменения от времени или от нагрузки параметров эмиссионных проявлений имеют несколько иной характер по сравнению с соответствующими зависимостями, полученными при $d\sigma_1/dt=const$.

На рис. 7 приведены графики изменения осевого напряжения $\sigma_1(t)$ (1), интенсивности ИК — излучения $V_w(t)$ (2) и активности АЭ $dN(t)/dt$ (3) при «высокой» скорости деформирования $d\varepsilon_1/dt=const=0,01$ мм/с.

При таких условиях нагружения график $V_w(t)$ «подобен» зависимости $\sigma_1(t)$ на протяжении всей стадии «допредельного» деформирования, а не только при $\sigma_1(t)<\sigma_e$. Предел прочности

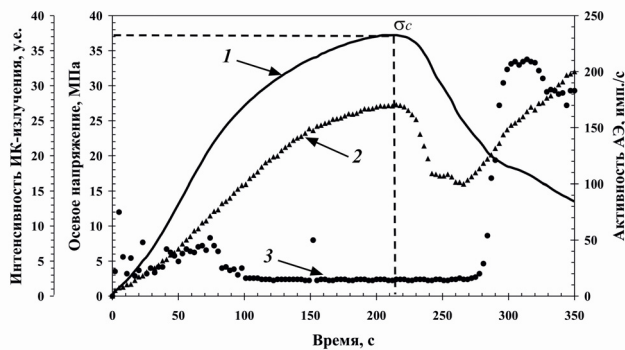


Рис. 7. Зависимости от времени осевого напряжения (1), интенсивности ИК — излучения (2) и активности акустической эмиссии (3) при $d\varepsilon_1/dt = \text{const} = 0,01$ мм/с

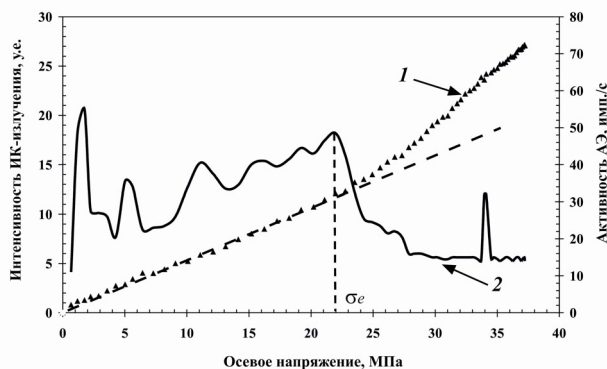


Рис. 8. Зависимости интенсивности ИК — излучения (1) и активности акустической эмиссии (2) от осевого напряжения при $d\varepsilon_1/dt = \text{const} = 0,01$ мм/с

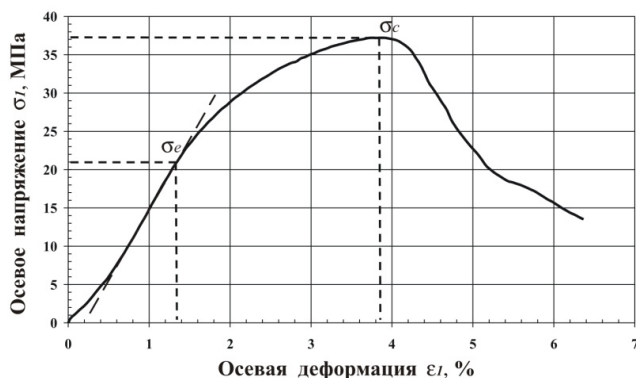


Рис. 9. Диаграмма « σ_1 - ε_1 » при $d\varepsilon_1/dt = \text{const} = 0,01$ мм/с

σ_c материала испытываемого образца достоверно фиксируется по характерным и совпадающим во времени точкам перегиба графиков $\sigma_1(t)$ и $V_w(t)$. Кроме того, зависимости $\sigma_1(t)$, $V_w(t)$ и $dN(t)/dt$ прослеживаются и на «запредельной» стадии.

Для надежной фиксации предела упругости σ_e при испытаниях в режиме при $d\varepsilon_1/dt = \text{const}$ следует рассмотреть поведение интенсивности ИК — излучения и активности АЭ в зависимости от осевого напряжения. Графики зависимостей $V_w(\sigma_1)$ и $dN(\sigma_1)/dt$ в области допредельного деформирования представлены на рис. 8, а соответствующая диаграмма « σ_1 - ε_1 » - на рис. 9.

При таком рассмотрении зависимости $V_w(\sigma_1)$ имеют вид, аналогичный зависимостям $V_w(\sigma_1)$, полученным в режиме испытаний при $d\sigma_1/dt = \text{const}$, для которых также выполняется условие «квазиadiaбатичности» (см. графики 1, 2 на рис. 6). Следовательно, точку «перегиба» на графике $V_w(\sigma_1)$ при $\sigma_1 \approx 22$ МПа можно принять за предел упругости данного образца, что подтверждается анализом диаграмма « σ_1 - ε_1 » на рис. 9. То же значение σ_1 соответствует и максимуму, предшествующему ниспадающей

ветви графика изменения активности акустической эмиссии $dN(\sigma_1)/dt$.

При уменьшении значений $d\varepsilon_1/dt = \text{const}$, как и в случае уменьшения $d\sigma_1/dt$, наблюдается нарушение условий «квазиабатичности», проявляющееся в возникновении характерного «горизонтального» участка на графиках $V_w(\sigma_1)$. Наличие этого участка, определяемого теплообменом между образцом и окружающей средой, приводит к невозможности идентификации процессов деформирования в упругой области и к снижению достоверности определения границ перехода между стадиями упругого и неупругого деформирования.

Совместный анализ синхронно регистрируемых экспериментальных зависимостей механических (напряжение и осевая деформация образца в условиях одноосного сжатия) и физических параметров (интенсивность ИК-излучения и активность АЭ) от времени, а также физических параметров — от механических, позволил установить, что характер вариаций параметров эмиссионных процессов при монотонном нагружении образцов геоматериалов, существенно зависит от скорости возрастания нагрузки. Подтвержден ранее полученный вывод о том, что эф-

фективность использования терморадационных (ИК-) измерений, как для идентификации процессов упругого деформирования, так и для фиксации границ между стадиями процесса изменения напряженного состояния, повышается при увеличении скорости нагружения образца. С другой стороны, показано, что, в отличие, от снижения информативности ИК-измерений, при «медленном» нагружении имеет место повышение информативности акустоэмиссионных измерений, в частности, при фиксации граничных точек между стадиями деформирования.

Проведенные эксперименты показывают эффективность эмиссионных «неразрушающих» измерений как информативной основы комплексной диагностики процессов изменения напряженно-деформированного состояния каменной соли, включая определение значений напряжений на границах стадий упругого и неупругого деформирования и разрушения. Разрабатываемую методику предполагается использовать при определении механических параметров геоматериалов, необходимых при расчетах прочности и устойчивости геотехнических сооружений в породных массивах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lockner D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* – 1993. – Vol. 30. – P. 883 – 899.
2. Filimonov Y., Lavrov A., Shkuratnik V. Acoustic emission in rock salt: effect of loading rate // *Strain*. – 2002. – Vol. 38. – P. 157 – 159.
3. Шкуратник В.Л., Филимонов Ю.Л., Кучурин С.В. Экспериментальные исследования акустической эмиссии в образцах угля при одноосном нагружении // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2004. – № 5. – С. 42 – 49.
4. Куксенко В.С., Томилин Н.Г., Махмудов Х.Ф., Бенин А.В. Прогнозирование потери устойчивости нагруженных элементов конструкций методом акустической эмиссии // *ПЖТФ*. — 2007. — Т. 33. — № 2. — С. 31 — 35.
5. Ogawa T., Oike K., Miura T., Electromagnetic radiations from rocks // *Journal of Geophysical Research*. – 1985. – Vol. 90. – P. 6245 – 6249.

6. Cress G. O., Brady B. T. and Rowell G. A., Sources of electromagnetic radiation from fracture of rock samples in the laboratory // *Geophysical Research Letter*. – 1987. – Vol. 14. – P. 331 – 334.
7. Абрамова К. Б., Шербаков И. П., Русаков А. И., Семенов А. А. Эмиссионные процессы, сопровождающие деформирование и разрушение металлов // *ФТТ*. – 1999. – Т. 41. – № 5. – С. 841 – 843.
8. Курленя М. В., Вострецов А. Г., Кулаков Г. И., Яковицкая Г. Е. Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения горных пород. – Новосибирск: Издательство СО РАН. – 2000.
9. Оливер Д. Анализ полей напряжений с использованием теплового излучения // *Экспериментальная механика*. Кн. 2. Пер. с англ. / Под ред. А. Кобаяси. – М.: Мир. – 1990. – С. 113 – 123.
10. Dulieu-Barton J.M., Stanley P. Development and applications of thermoelastic stress analysis // *Journal of Strain Analysis*. – 1998. – Vol. 33. – P. 93 – 104.
11. Шейнин В.И., Мотовилов Э.А., Филиппова С.В. Оценка изменения напряженного состояния грунтов и горных пород по изменению интенсивности потока инфракрасного излучения с их поверхности // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 1994. – № 3. – С. 14 – 22.
12. Шейнин В.И., Левин Б.В., Мотовилов Э.А., Морозов А.А., Фаворов А.В. Диагностика периодических изменений напряженного состояния геоматериалов по данным инфракрасной радиометрии // *Известия РАН. Физика Земли*. – 2001. – № 4. – С. 24 – 30.
13. Левин Б.В., Шейнин В.И., Блохин Д.И., Фаворов А.В. Инфракрасная диагностика отклика геоматериалов на импульсные и ударные нагрузки // *Доклады Академии наук*. – 2004. – Т. 395. – № 6. – С. 822 – 824.
14. Егоров П. В., Денисов А. С., Минаев С. М. Триболюминесцентный способ оценки напряженного состояния горного массива / *Геофизические способы контроля напряжений и деформаций*. – Новосибирск: Издательство ИГД СО АН СССР. – 1985. – С. 35 – 40.
15. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. Т. 2. – М.: Мир. – 1969.
16. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Сов. радио. – 1978.
17. Frolov D. I., Kil'keev R. Sh., Kuskensko V. S. Study of the dynamics of microcrack fusion by the acoustic-emission method // *Mechanics of Composite Materials*. – 1981. – Vol. 17. – P. 104 – 107.
18. Балуева М.А., Блохин Д.И., Саваторова В.Л., Талонов А.В., Шейнин В.И. Моделирование влияния микротрещин в геоматериалах на изменения их температуры при деформировании // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2009. – № 6. – С. 69 – 74.
19. Wu L., Liu S., Wu Y., Wang C., Precursors for fracturing and failure – Part II: IRR T-Curve abnormalities // *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* – 2006. – Vol. 43. – P. 483 – 493.
20. Yixin Z., Yaodong J., Acoustic emission and thermal infrared precursors associated with bump-prone coal failure // *Int. Journal of Coal Geology* – 2010. – Vol. 83. – P. 11 – 20. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Шейнин Владимир Исаакович – профессор, доктор технических наук, заведующий лабораторией НИИОСП им. Н.М. Герсевича ОАО «НИЦ «Строительство», geo-mech@yandex.ru, Блохин Дмитрий Иванович – кандидат технических наук, доцент, Московский государственный горный университет, dblokhin@yandex.ru.

