

УДК 622.02:539.2

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЯВЛЕНИЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ  
ЭФФЕКТОВ НА ЛИНЕЙНОЙ И НЕЛИНЕЙНОЙ СТАДИЯХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ  
ОБРАЗЦОВ КАМЕННОЙ СОЛИ В РЕЖИМЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ**

**В. И. Шейнин<sup>1</sup>, Д. И. Блохин<sup>1,2</sup>, И. Б. Максимович<sup>1</sup>, Е. П. Сарана<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт оснований и подземных сооружений им. Н. М. Герсеванова,

E-mail: geo-mech@yandex.ru, 2-я Институтская, 6, 109428, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС",

E-mail: dblokhin@yandex.ru, Ленинский проспект, 4, 119049, г. Москва, Россия

Исследована возможность получения информации о протекании механических процессов в геоматериалах за пределами упругого деформирования по вариациям интенсивности ИК-излучения. Представлены результаты экспериментов по регистрации теплового излучения с поверхности образцов каменной соли при их многократном циклическом нагружении в условиях одноосного сжатия. Сделан вывод об эффективности использования термомеханических эффектов для фиксации момента начала активизации процесса разрушения периодически нагружаемых геоматериалов.

*Геоматериалы, каменная соль, циклическое нагружение, осевые напряжения, осевые деформации, инфракрасное излучение, геомеханический мониторинг*

В реальных условиях массивы горных пород, вмещающие инженерные сооружения, могут подвергаться многократно повторяющимся циклам "нагружения – разгрузки". Примеры таких сооружений — плотины и напорные тоннели гидроэлектростанций, основания фундаментов турбоагрегатов и подземные хранилища нефти и газа [1 – 3]. Этим определяется актуальность лабораторных и натурных экспериментов, проводимых на геоматериалах различных типов с целью исследования изменений во времени их механического состояния, вызываемых периодически изменяющейся нагрузкой [4 – 11]. Общим для указанных работ является исследование нелинейных деформационных эффектов, сопровождающих циклические (усталостные) процессы нагружения геоматериалов при уровнях изменений действующих напряжений (амплитуд), сравнимых со значениями предела прочности  $\sigma_c$  испытываемых геоматериалов.

Большинство исследований по установлению закономерностей деформирования геоматериалов выполняется на образцах или моделях, имитирующих объемы горных массивов, в лабораторных условиях, в которых можно получать данные об изменениях напряженно-деформируемого состояния геоматериалов с использованием методик, основанных на синхронных измерениях напряжений и деформаций [4 – 12]. Однако возможность реализации и эффективность

---

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по программе повышения конкурентоспособности НИТУ "МИСиС" среди ведущих мировых научно-образовательных центров (№ К1-2015-025).

таких комплексных систем измерений в натуральных условиях ограничены различными технологическими и методическими факторами. Например, информативность оценки изменений напряжений по результатам измерений с помощью скважинных (или закладных) деформометров зависит от качества контакта таких устройств с вмещающим массивом, а также от жесткости материала их измерительных элементов [13, 14]. Последнее оказывает существенное влияние на результаты оценки изменений напряжений по измеренным приращениям деформаций, особенно на нелинейных стадиях деформирования.

В настоящее время в системах мониторинга состояния строительных конструкций и массивов горных пород достаточно эффективно применяются методы, включающие измерения вариаций параметров физических полей различной природы, сопутствующих процессам деформирования и разрушения материалов [15–18]. К одним из активно развиваемых методов геоконтроля относится метод ИК-радиометрии, использующий результаты бесконтактных измерений интенсивности инфракрасного излучения с поверхности геоматериалов при их деформировании [19–24]. Интерпретация результатов терморadiационных ИК-измерений основана на описании известных термодинамических эффектов: изменении температуры твердого тела при ее адиабатическом деформировании (“термоупругий” и “термопластический” эффекты [25]) и зависимости интенсивности инфракрасного излучения с поверхности тела от температуры [26].

В частности, в [19, 20] обоснована возможность использования терморadiационных измерений для идентификации изменений напряжений при упругом периодическом деформировании образцов грунтов и горных пород (“термоупругий эффект”). Эффективность таких измерений для фиксации “термопластического эффекта”, проявляющегося на нелинейной стадии одноосного деформирования геоматериалов при монотонном увеличении нагрузки, показана в [23].

Данное сообщение посвящено описанию исследований, являющихся продолжением публикаций [19–21] по разработке бесконтактной методики диагностики изменений напряженно-деформированного состояния геоматериалов. Проведенные эксперименты имели целью тестирование указанной методики в условиях многократно повторяющихся последовательных циклов “нагрузки – разгрузки”, приводящих к переходу от линейного деформирования к нелинейному.

Для испытаний подготовлены цилиндрические образцы каменной соли диаметром 35 и высотой 70 мм. Выбор модельного материала обусловлен тем, что на нем можно с достаточной эффективностью исследовать в лабораторных условиях механические изменения, характерные как для горных пород, так и для грунтов [2, 5, 8, 9].

Измерения выполнялись на испытательной машине Instron 150LX с помощью автоматизированного комплекса, позволяющего вести синхронную регистрацию механических и терморadiационных параметров [23]. В этих экспериментах скорость изменения осевой деформации  $\varepsilon_1$  на участках нагружения и разгрузки поддерживалась постоянной по абсолютной величине  $|d\varepsilon_1/dt| = \text{const}$ . Выбор значений  $d\varepsilon_1/dt$ , обеспечивающих “квазиадиабатичность” деформирования, основан на результатах проведенных ранее экспериментов [23].

Принципиальная схема экспериментального стенда представлена на рис. 1. Так же как и в [19–21, 23], в качестве первичного приемника ИК-излучения используется детектор РТН-31 [27], предназначенный для бесконтактного измерения изменений интенсивности оптического излучения в инфракрасном диапазоне частот. Датчик ИК-излучения (1) устанавливается примерно в середине высоты образца (2) на расстоянии 0.5–1 см от его поверхности.

В описываемом эксперименте на каждом цикле “нагрузка – разгрузка” нагрузка возрастала до значения  $\sigma_{\max} \approx 18$  МПа, после чего осуществлялась разгрузка образца до значения, при котором  $\sigma_1 = \sigma_{\min} \approx 0.1$  МПа.

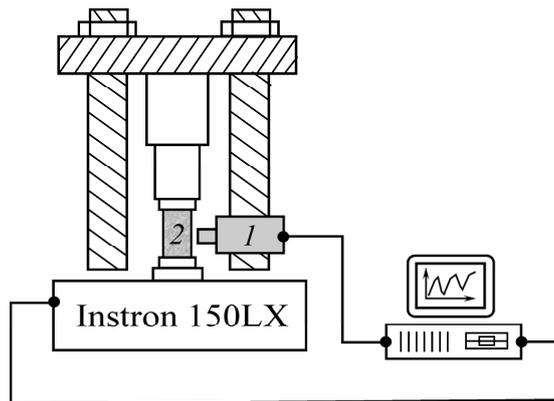


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда

Предел прочности на одноосное сжатие испытываемых образцов с учетом данных испытаний других образцов из той же серии составляет около 20 МПа. Выбор отношения  $\sigma_{\max}/\sigma_c = 0.9$  соответствует относительному максимальному уровню напряжений, принимаемому в лабораторных исследованиях по моделированию влияния циклических многократных нагружений на устойчивость подземных газохранилищ [8, 9].

Отметим, что  $\sigma_{\max}$  значительно превосходит предел упругости  $\sigma_e \approx 10-12$  МПа, характерный для исследуемых образцов каменной соли [23]. На рис. 2 приведены кривые изменения во времени осевого напряжения  $\sigma_1(t)$ , осевой деформации  $\varepsilon_1(t)$  и интенсивности ИК-излучения  $V(t)$  при деформировании образца в условиях последовательных циклов “нагружения – разгрузки” ( $|d\varepsilon_1/dt| = \text{const} = 3$  мм/мин) при постоянном значении амплитуды нагрузки. Разрушение образца при указанной амплитуде изменения напряжений произошло на 8 цикле.

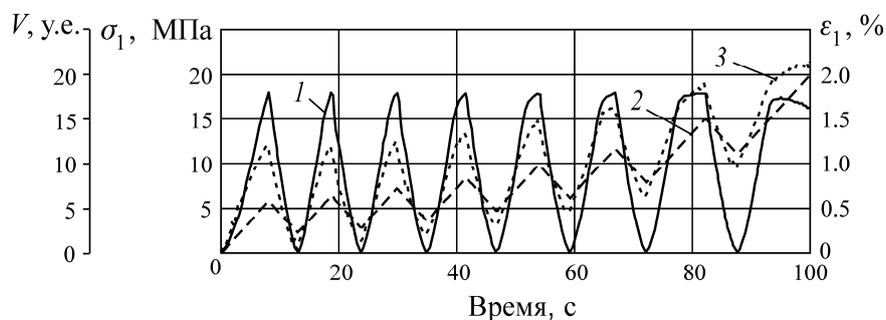


Рис. 2. Зависимости осевого напряжения  $\sigma_1(t)$  (1), осевой деформации  $\varepsilon_1(t)$  (2) и интенсивности ИК-излучения  $V(t)$  (3) от времени при  $|d\varepsilon_1/dt| = 3$  мм/мин

Более наглядно особенности рассматриваемого процесса циклического деформирования могут быть представлены в координатах “осевое напряжение – осевая деформация”, при этом площадь каждой гистерезисной петли характеризует поглощенную на соответствующем цикле механическую энергию, часть которой переходит в теплоту [2, 4, 28]. Диаграмма  $\sigma_1(\varepsilon_1)$  для рассматриваемого образца показана на рис. 3, где отчетливо прослеживается уменьшение “раскрытия” гистерезисной петли на 2-м цикле по сравнению с 1-м циклом “нагружение – разгрузка” и увеличение “раскрытия” последующих петель вплоть до момента разрушения образца. Такая особенность диаграмм  $\sigma_1(\varepsilon_1)$  наблюдается для многих типов грунтов и горных пород, подвергаемых циклическому деформированию [2, 4, 8, 9].

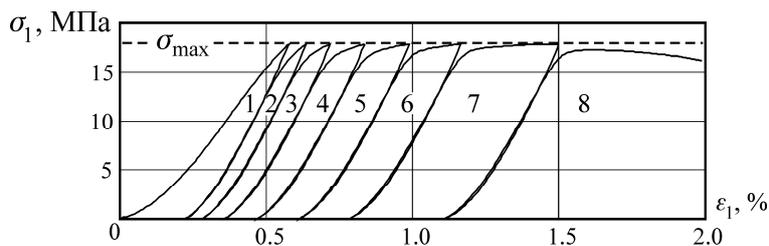


Рис. 3. Диаграмма  $\sigma_1(\varepsilon_1)$ : 1–8 — номера циклов

Различие площадей гистерезисных петель, соответствующих 1-му и 2-му циклам деформирования, объясняется тем, что вид нагрузочной ветви диаграммы  $\sigma_1(\varepsilon_1)$  1-го цикла совпадает с соответствующим видом характерной зависимости  $\sigma_1(\varepsilon_1)$  каменной соли при монотонном одноосном сжатии [12, 23], а в отличие от 1-го, во 2-м цикле не только разгрузка, но и нагружение происходят по практически линейной траектории. Это определяется тем, что уплотнение образца [8, 9] произошло уже на 1-м цикле, и дальнейшее деформирование не сопровождается активным ростом деформаций за счет “залечивания” существовавших в образце дефектов. Рост “раскрытия” гистерезисных петель на последующих после 2-го циклах связан уже с возрастанием остаточных деформаций, вызванных увеличением дефектности образца [10]. На 3-м и последующих циклах на нагрузочных ветвях диаграммы  $\sigma_1(\varepsilon_1)$  наблюдается резкое изменение наклона кривых при приближении значений  $\sigma_1$  к  $\sigma_{\max}$ , которое также указывает, что в пределах ветви нагружения каждого из этих циклов характер процесса деформирования переходит от упругого к упругопластическому.

На рис. 4 представлены зависимости значений рассеянной за  $n$ -й ( $n = 1-7$ ) цикл энергии  $W_n$ , рассчитанных по площади гистерезисных петель, и соответствующих приращений значений интенсивности теплового излучения  $\Delta V_n$ , оцененных по кривой  $V(t)$ .

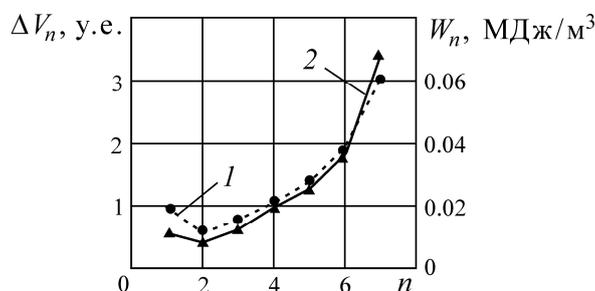


Рис. 4. Зависимости значений рассеянной за цикл энергии  $W_n$  (1) и приращений значений интенсивности теплового излучения  $\Delta V_n$  (2) от номера цикла “нагружение – разгрузка”  $n$

Указанные зависимости имеют качественно тождественный вид. Видно, что рост значений  $W_n$  (для всех циклов с  $n > 2$ ), обусловленный переходом процесса в нелинейную стадию, приводит к повышению температуры образца, т. е. возрастанию значений  $\Delta V_n$ . Аналогичные зависимости, иллюстрирующие эффект разогрева циклически деформируемых образцов горных пород, приведены в работе [4].

Подчеркнем, что упругое деформирование в рассматриваемом режиме нагружения и разгрузки давало бы, в соответствии с положениями теории термоупругости [24], нулевое приращение температуры за цикл, а значит, и отсутствие эффекта разогрева образца. В действительности на 2-м цикле, где характер траектории  $\sigma_1(\varepsilon_1)$  наиболее близок к линейному, наблюдается уменьшение  $W_n$  и соответствующего значения  $\Delta V_n$ .

Приведенная на рис. 5а зависимость  $V(t)$  позволяет детально отразить стадии изменения механического состояния циклически деформируемого образца. Анализируя эту зависимость, можно видеть, что ее характер существенно меняется в достаточно четко фиксируемые моменты времени  $T_n$  ( $n = 3-8$ ), соответствующие значениям напряжений, в которых на кривой  $\sigma_1(t)$  (рис. 5б) фиксируется переход процесса деформирования из линейной в нелинейную стадию.

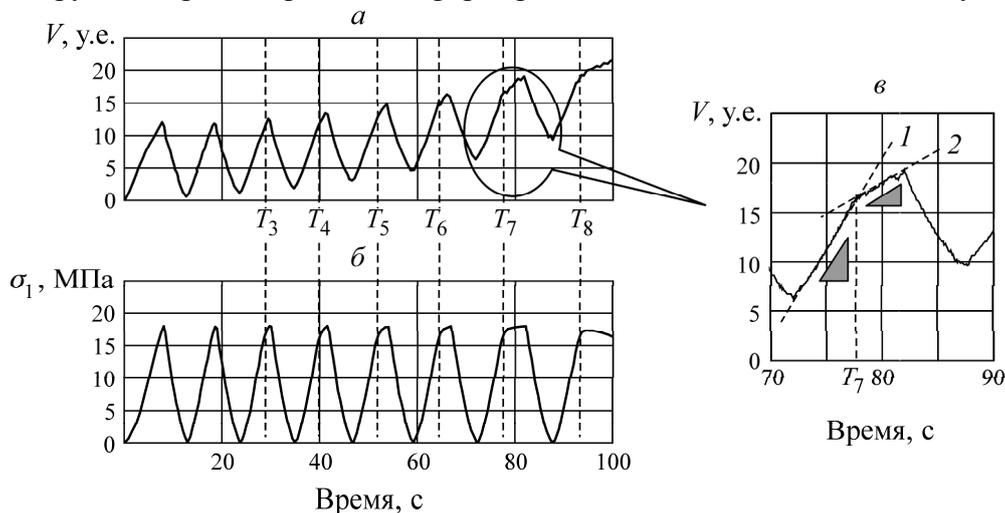


Рис. 5. Зависимости  $V(t)$  (а) и  $\sigma_1(t)$  (б) с указанием моментов времени, соответствующих переходам деформирования образца в нелинейную стадию, и иллюстрации способа их определения (в)

Наиболее отчетливо трансформации зависимостей  $V(t)$  и  $\sigma_1(t)$  проявляются на последних циклах деформирования, предшествующих разрушению образца. В качестве примера рассмотрим на рис. 5в участок зависимости  $V(t)$ , соответствующий 7-му циклу деформирования. Здесь в интервале времени, соответствующем росту нагрузки, прямыми 1 и 2 выделены два линейных участка с различными углами наклона. При этом момент времени  $T_7$ , в котором наблюдается резкое изменение наклона кривой  $V(t)$  (рис. 5а), совпадает со значением момента времени, в котором фиксируется трансформация зависимости  $\sigma_1(t)$  (рис. 5б). Учитывая сделанные при описании диаграммы  $\sigma_1(\varepsilon_1)$  выводы, предположим, что изменение угла наклона  $V(t)$  в рассматриваемом интервале времени указывает на переход процесса деформирования образца в нелинейную стадию. Аналогичное соответствие отмечено в [29], где описаны результаты терморadiационных измерений при циклическом деформировании пластичных композитных материалов.

Для подтверждения данного предположения рассмотрим зависимости  $V(\sigma_1)$  и  $\varepsilon_1(\sigma_1)$  для участка нагружения 7-го цикла (рис. 6). Зависимость  $V(\sigma_1)$  достаточно точно аппроксимируется прямой при значениях  $\sigma_1$ , соответствующих упругому деформированию (участок  $AB$ ). Существенное изменение характера зависимости  $V(\sigma_1)$  наблюдается при приближении значений  $\sigma_1$  к  $\sigma_{\max}$ . Здесь указанная зависимость приобретает явно нелинейный характер, обусловленный большей скоростью повышения температуры образца, чем на предыдущем этапе деформирования. Такой характер зависимости  $V(\sigma_1)$  объясняется тем, что на участке  $AB$  проявляется только “термоупругий”, а на участке  $BC$  еще и “термопластический” эффект. Аналогичным образом ведут себя зависимости  $V(\sigma_1)$  на участках нагружения для всех циклов после второго. При этом длина участка ветви нагружения, в течение которого происходит нелинейное деформирование образца, увеличивается с номером цикла, что видно из диаграмм  $\sigma_1(\varepsilon_1)$  на рис. 3.

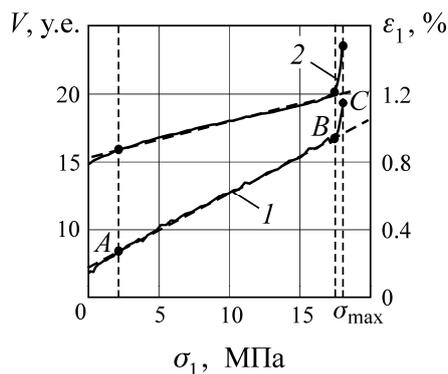


Рис. 6. Зависимости  $V(\sigma_1)$  (1) и  $\varepsilon_1(\sigma_1)$  (2), соответствующие этапу нагрузки на 7-м цикле деформирования образца

На рис. 7 представлена зависимость  $V(\varepsilon_1)$ , на которой визуально фиксируются точки, где на каждом цикле изменяется ее наклон, т. е. происходит переход к нелинейной стадии процесса деформирования.

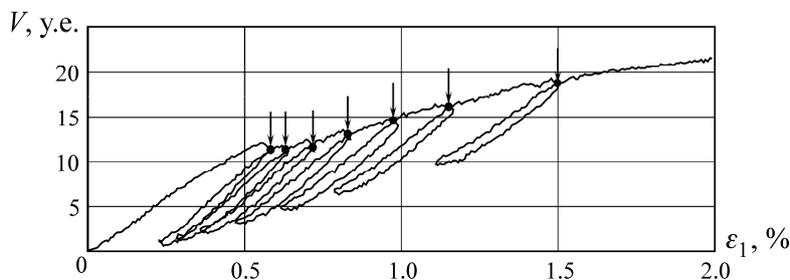


Рис. 7. Зависимость  $V(\varepsilon_1)$  (стрелками указаны точки изменения наклона кривой на каждом цикле нагружения)

Для детализации и обоснования указанной причины трансформации кривых на рис. 8 для циклов с  $n = 3 - 8$  приведены зависимости  $\sigma_1(\varepsilon_1)$ , характеризующие процесс деформирования в режиме нагружения, и соответствующие кривые  $V_1(\varepsilon_1)$ .

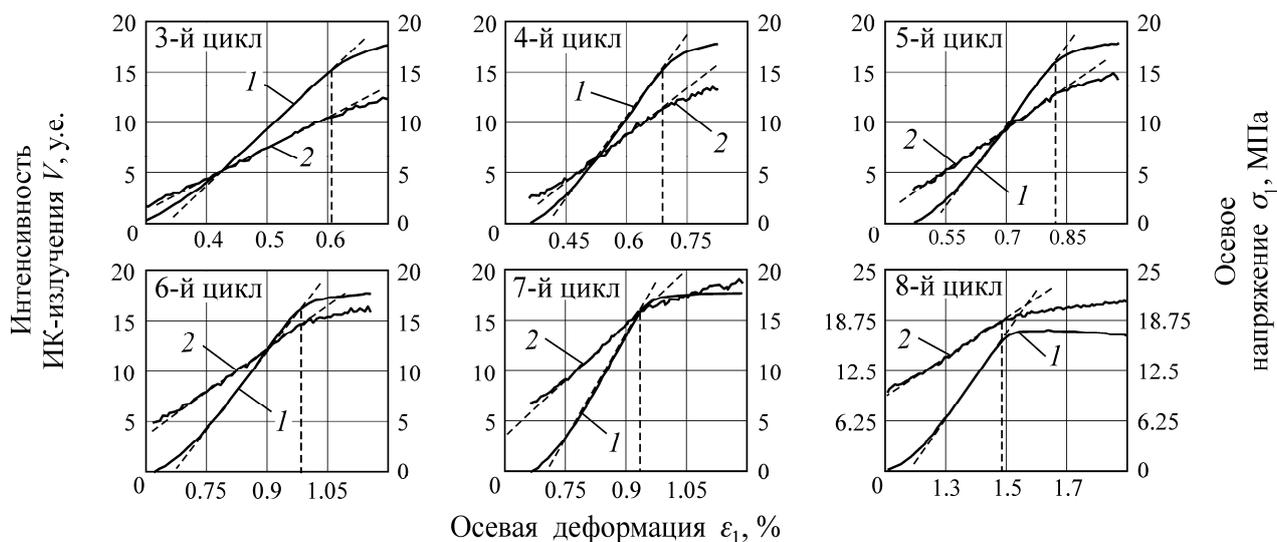


Рис. 8. Зависимости  $\sigma_1(\varepsilon_1)$  (1) и  $V(\varepsilon_1)$  (2) для участков нагружения, соответствующих циклам с  $n = 3 - 8$

Точки перегиба на кривых  $V(\varepsilon_1)$  (показанные стрелками на рис. 7) и  $\sigma_1(\varepsilon_1)$  определяются путем линейной аппроксимации их начальных участков (наклонные штриховые линии), при этом значения  $\varepsilon_1$ , соответствующие этим точкам для каждой пары графиков, оказываются практически совпадающими. Следовательно, зависимость  $V(\varepsilon_1)$  так же, как зависимость  $V(\sigma_1)$ , позволяет достоверно идентифицировать моменты перехода материала из стадии упругого деформирования в неупругую.

#### ВЫВОДЫ

Показано, что стадии изменения напряженно-деформированного состояния образцов каменной соли при их высокоамплитудном циклическом нагружении идентифицируются по особенностям записей интенсивности ИК-излучения, обусловленным термомеханическими эффектами.

Переход между стадиями упругого и неупругого деформирования в пределах каждого цикла нагружения и разгрузки фиксируется по точкам перегиба зависимостей интенсивности инфракрасного излучения от времени и от параметров, характеризующих происходящие в образце механические процессы.

Полученные результаты подтверждают перспективность использования терморadiационных измерений как дополнительного инструмента в современных системах геомеханического мониторинга, поскольку измерения вариаций напряжений непосредственно в массиве оказываются труднореализуемыми. Терморadiационные измерения могут служить заменой на качественном уровне измерений приращений напряжений, особенно в системах экспресс-диагностики.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гудман Р. Механика скальных пород. — М.: Стройиздат, 1987. — 232 с.
2. Вознесенский Е. А. Динамическая неустойчивость грунтов. — М.: Эдиториал УРСС, 1999. — 264 с.
3. Богданов Ю. М., Журавлева Т. Ю., Сильверстов Л. К., Тавостин М. Н. Результаты исследования геомеханических процессов при закачке и отборе газа на ПХГ в каменной соли // Газовая пром-сть. — 2010. — № 6. — С. 72–75.
4. Мохначев М. П. Усталость горных пород. — М.: Наука, 1979. — 152 с.
5. Ставрогин А. Н., Тарасов Б. Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. — СПб.: Наука, 2001. — 343 с.
6. Болдырев Г. Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса. — Пенза: ПГУАС, 2008. — 696 с.
7. Badge M. N., Petros V. Fatigue and dynamic energy behavior of rock subjected to cyclical loading, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci, 2009, Vol. 46. — P. 200–209.
8. Fuenkajorn K., Phueakphum D. Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt, Engineering Geology, 2010, Vol. 112, No. 1. — P. 43–52.
9. Guo Y. T., Zhao K. L., Sun G. H., Yang C. H., Hong-Ling M. A., Zhang G. M. Experimental study of fatigue deformation and damage characteristics of salt rock under cyclic loading, Rock and Soil Mechanics, 2011, Vol. 32, No. 5. — P. 1353–1359.
10. Liu J., Xie H., Hou Z. et al. Damage evolution of rock salt under cyclic loading in uniaxial tests, Acta Geotechnica, 2014, Vol. 9, No. 1. — P. 153–160.
11. Momeni A., Karakus M., Khanlari G. R., Heidari M. Effects of cyclic loading on the mechanical properties of a granite, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci, 2015, Vol. 77. — P. 89–96.

12. Жигалкин В. М., Усольцева О. М., Семенов В. Н., Цой П. А., Асанов В. А., Барях А. А., Паньков И. Л., Токсаров В. Н. Деформирование квазипластичных соляных пород при различных условиях нагружения. Сообщ. 1: Закономерности деформирования соляных пород при одноосном сжатии // ФТПРПИ. — 2005. — № 6. — С. 14–25.
13. Виттке В. Механика скальных пород. — М.: Недра, 1990. — 439 с.
14. Захаров В. Н., Кубрин С. С., Фейт Г. Н., Блохин Д. И. Определение напряженно-деформированного состояния горных пород при разработке угольных пластов, опасных по гео- и газодинамическим явлениям // Уголь. — 2012. — № 10. — С. 34–36.
15. Курленя М. В., Опарин В. Н. Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород. — Новосибирск: Наука, 1999. — 335 с.
16. Lavrov A. Fracture-induced phenomena and memory effects in rocks: a review, *Strain*, 2005, Vol. 41, No. 4. — P. 135–149.
17. Лавров А. В., Шкуратник В. Л. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) // Акуст. журн. — 2005. — Т. 51. — № 7. — С. 6–18.
18. Опарин В. Н., Аннин Б. Д., Чугуй Ю. В. и др. Методы и измерительные приборы для моделирования и натурных исследований нелинейных деформационно-волновых процессов в блочных массивах горных пород. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. — 330 с.
19. Шейнин В. И., Левин Б. В., Мотовилов Э. А., Морозов А. А., Фаворов А. В. Идентификация периодических изменений напряженного состояния грунтов по изменениям плотности потока инфракрасного излучения // ПМТФ. — 2000. — № 6. — С. 193–198.
20. Шейнин В. И., Левин Б. В., Мотовилов Э. Ф., Морозов А. А., Фаворов А. В. Диагностика быстрых периодических изменений напряжений в горных породах по данным инфракрасной радиометрии // Физика Земли. — 2001. — № 4. — С. 24–30.
21. Шейнин В. И., Сидорчук В. Ф., Блохин Д. И. Экспериментальные исследования методом ИК-радиометрии изменений нормальных тангенциальных напряжений на поверхности забоя скважины в модели грунтового массива // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2004. — № 6. — С. 8–11.
22. 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, No. 3. — P. 483–493.
23. Шейнин В. И., Блохин Д. И. Исследования особенностей проявления термомеханических эффектов при одноосном сжатии образцов каменной соли // ФТПРПИ. — 2012. — № 1. — С. 46–53.
24. Опарин В. Н., Киряева Т. А., Гаврилов В. Ю. и др. О некоторых особенностях взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами в угольных пластах Кузбасса // ФТПРПИ. — 2014. — № 2. — С. 3–30.
25. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. Т. 2. — М.: Мир, 1969. — 863 с.
26. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. — М.: Сов. радио, 1978. — 400 с.
27. Ильин А. С. Термоэлектрические приемники оптического излучения с пленочными и проволочными термопарами для прецизионных измерений // Метрология. — 2005. — № 11. — С. 19–30.
28. Москвитин В. В. Пластичность при переменных нагружениях. — М.: Изд-во МГУ, 1965. — 266 с.
29. Muneer M., Prakash R. V., Balasubramaniam K. Tensile deformation studies in glass/epoxy composite specimen using infrared thermography, *Int. J. of Aerospace Innovations*, 2010, Vol. 2, No. 1. — P. 13–22.

*Поступила в редакцию 19/III 2016*