



**ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЯВЛЕНИЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ
В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОМАТЕРИАЛАХ ПРИ БЛИЗКИХ К ПРЕДЕЛЬНЫМ РЕЖИМАМ
ПЕРИОДИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ**

Д. И. Блохин¹, В. И. Шейнин²

¹*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН,*

E-mail: dblokhin@yandex.ru, Крюковский тупик 4, г. Москва 111020, Россия

²*НИИОСП им. Н. М. Герсеева – ОАО “НИЦ “Строительство”,*

E-mail: geo-mech@yandex.ru, ул. 2-я Институтская 6, г. Москва 109428, 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 параметров теплового излучения с поверхности образцов каменной соли и бетона при близких к предельным режимам периодического нагружения в условиях одноосного сжатия. Показана качественная идентичность записей механических параметров и вариаций теплового излучения, характеризующих изменения напряженно-деформированного состояния испытываемых образцов геоматериалов. Установлены различия фиксируемых проявлений термомеханических эффектов в бетоне и каменной соли при указанном режиме деформирования.

Геоматериалы, циклическое нагружение, напряжения, деформации, тепловое излучение

**STUDIES OF MANIFESTATION FEATURES OF THERMOMECHANICAL EFFECTS
IN DIFFERENT GEOMATERIALS AT PERIODIC LOADING CLOSE
TO THE LIMIT MODES**

D. I. Blokhin¹ and V. I. Sheinin²

¹*Mel'nikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences,*

E-mail: dblokhin@yandex.ru, Kryukovsky tупik 4, Moscow 111020, Russia

²*Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures,*

E-mail: geo-mech@yandex.ru, ul. 2-a Institut'skaya 6, Moscow 109428, Russia

The possibility to obtain the information on the flow of mechanical processes in geomaterials beyond the limits of elastic deformation using the variations in the IR radiation intensity was studied. The results of experiments on recording the parameters of thermal radiation from the surface of rock salt and concrete samples at close to limiting periodic loading conditions under uniaxial compression are presented. The qualitative identity of the records of mechanical parameters and thermal radiation variations characterizing changes in the stress-strain state of the tested geomaterial samples is shown. The differences in the recorded manifestations of thermomechanical effects in concrete and rock salt under the specified deformation mode are established.

Geomaterials, cyclic loading, axial stress, axial strain, infrared radiation

Известно [1, 2], что в процессе циклического нагружения геоматериалов происходят значительные изменения их механического состояния, фиксируемые и по характеру зависимостей “напряжение – деформация”, соответствующих различным циклам. Следует отметить, что для разных геоматериалов указанные трансформации имеют отличительные особенности [1–4]. Подобные изменения механических свойств материалов отражаются в сопутствующих процессам деформирования изменениях взаимосвязей измеряемых параметров физических полей.

К одним из активно развиваемых методов неразрушающей диагностики изменений механического состояния горных пород относится метод ИК-радиометрии, использующий результаты бесконтактных измерений изменений интенсивности инфракрасного излучения с поверхности геоматериалов при их деформировании [5–10]. Интерпретация результатов терморadiационных ИК-измерений основана на описании известных термодинамических эффектов: изменение температуры твердого тела при ее адиабатическом деформировании (“термоупругий” и “термопластический” эффекты [11]) и зависимость интенсивности инфракрасного излучения с поверхности тела от температуры [12].

Цель настоящей работы — исследование с использованием ИК-измерений проявлений указанных эффектов в геоматериалах с различными физико-механическими свойствами в условиях многократно повторяющихся последовательных циклов “нагрузки – разгрузки”.

Для испытаний были подготовлены цилиндрические образцы каменной соли ($d = 35$ мм и $h = 70$ мм) и бетона ($d = 50$ мм и $h = 100$ мм). Измерения выполнялись на испытательной машине Instron 150LX с помощью автоматизированного комплекса, позволяющего вести синхронную регистрацию механических и терморadiационных параметров [7, 8]. В проведенных экспериментах скорость изменения осевой деформации ε_1 на участках нагружения и разгрузки поддерживалась постоянной по абсолютной величине $|d\varepsilon_1/dt| = \text{const}$.

Предел прочности на одноосное сжатие σ_c подвергаемых многоцикловым испытаниям образцов каменной соли, с учетом данных прочностных одноцикловых испытаний образцов из той же серии, принят составляющим около 20 МПа. Для образцов бетона значение σ_c по аналогичным соображениям принималось равным 32 МПа.

В описываемых “типовых” экспериментах на каждом цикле “нагрузка – разгрузка” нагрузка возрастала до значения, соответствующего $\sigma_{\max} \approx 0.9\sigma_c$, после чего осуществлялась его разгрузка до значения, при котором $\sigma = \sigma_{\min} \approx 0.1$ МПа.

На рис. 1а представлены характерные зависимости изменения во времени осевого напряжения $\sigma_1(t)$, продольной деформации $\varepsilon_1(t)$ и интенсивности ИК-излучения $V(t)$ при многократном нагружении образца каменной соли, на рис. 1б — соответствующие зависимости для образца бетона.

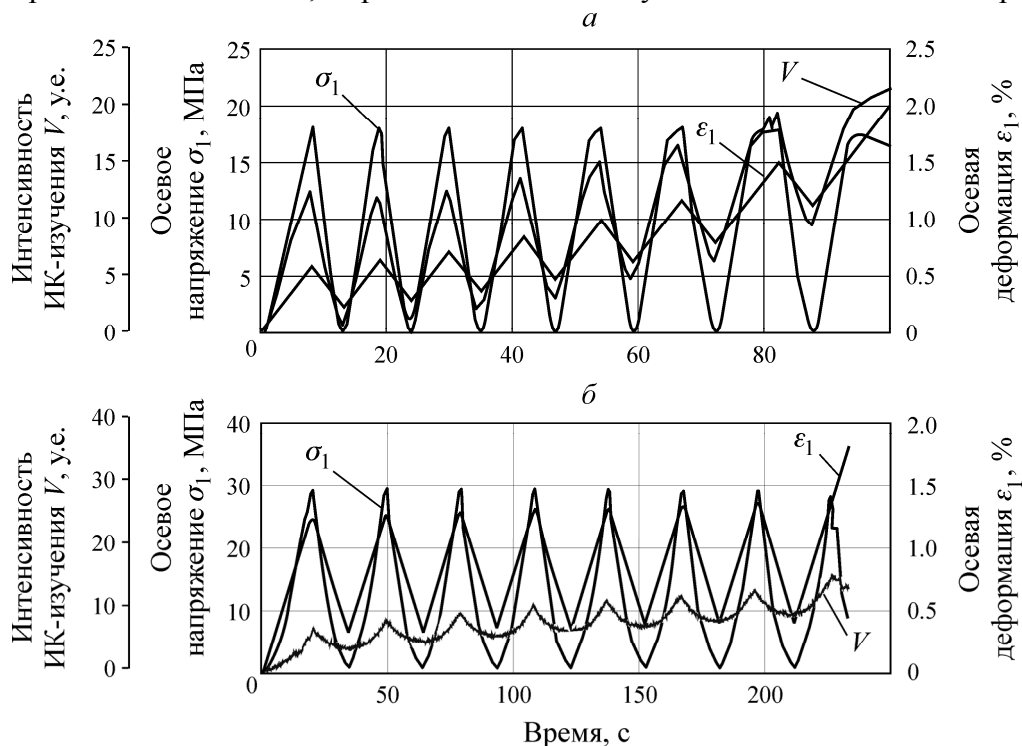


Рис. 1. Зависимости $\sigma_1(t)$, $\varepsilon_1(t)$ и $V(t)$ для образца: а — каменной соли при испытании с $|d\varepsilon_1/dt| = \text{const} = 3$ мм/мин; б — бетона при испытании с $|d\varepsilon_1/dt| = \text{const} = 3.6$ мм/мин

Приведенные на рис. 2 зависимости $\sigma_1(\varepsilon_1)$ и $V(\varepsilon_1)$ позволяют более детально отразить стадии изменения механического состояния циклически деформируемых образцов. Диаграммы $\sigma_1(\varepsilon_1)$, полученные для каменной соли и бетона (рис. 2а, б и рис. 2в, г соответственно) имеют стандартный вид и содержат особенности, характерные для диаграмм, описывающих подобный режим нагружения исследуемых геоматериалов [3, 4].

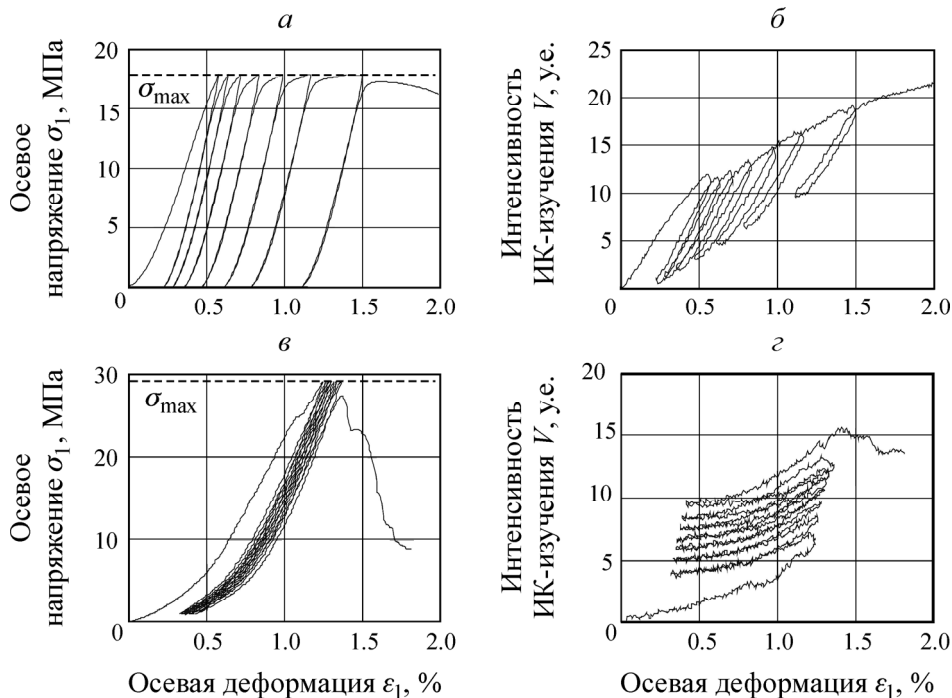


Рис. 2. Зависимости для каменной соли: а — $\sigma_1(\varepsilon_1)$; б — $V(\varepsilon_1)$; для бетона: в — $\sigma_1(\varepsilon_1)$; г — $V(\varepsilon_1)$

Для исследования различий в характере кривых $\sigma_1(\varepsilon_1)$ и $V(\varepsilon_1)$ для каменной соли и бетона на рис. 3 приведены указанные зависимости, характеризующие процесс деформирования испытываемых геоматериалов на отдельных циклах “нагружения – разгрузки”.

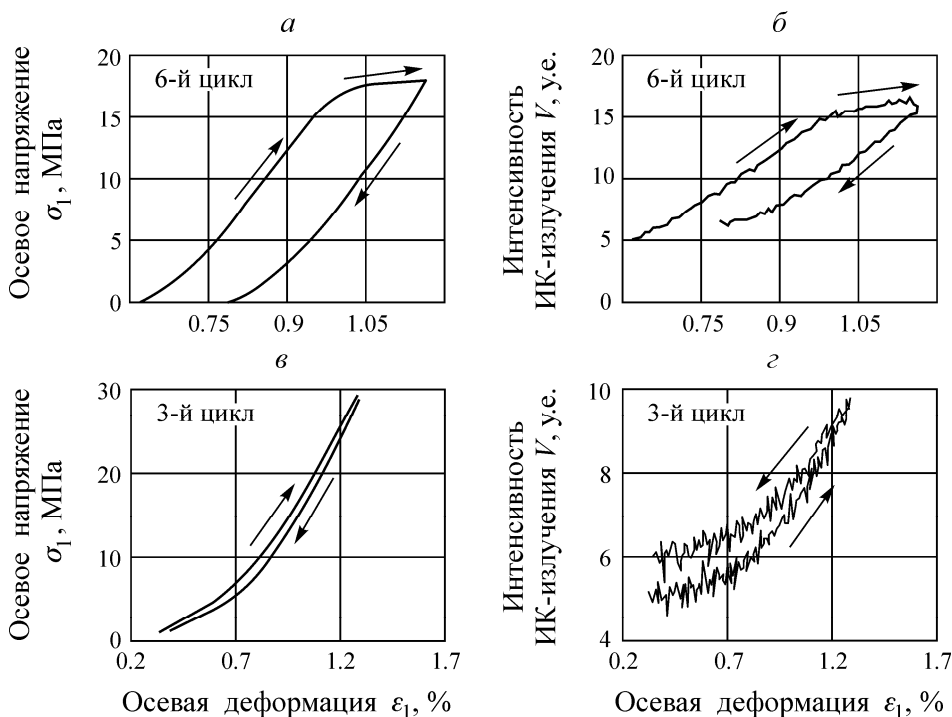


Рис. 3. Зависимости, соответствующие шестому циклу деформирования образца каменной соли: а — $\sigma_1(\varepsilon_1)$; б — $V(\varepsilon_1)$ и третьему циклу деформирования образца бетона: в — $\sigma_1(\varepsilon_1)$; г — $V(\varepsilon_1)$

Как видно из рис. 3а зависимости $\sigma_1(\varepsilon_1)$, деформирование образца каменной соли на этапе нагружения происходит по траектории более “медленной” по сравнению с траекторией, характеризующей этап разгрузки в этом же цикле. Указанный факт находит отражение (рис. 3б) в том, что “остывание” образца каменной соли осуществляется с большей скоростью, чем его “разогрев”, соответствующий участку нагружения. При этом наблюдается высокая идентичность зависимостей $\sigma_1(\varepsilon_1)$ и $V(\varepsilon_1)$. Аналогичные выводы можно сделать при анализе кривых $\sigma_1(\varepsilon_1)$ и $V(\varepsilon_1)$, построенных для остальных циклов деформирования образцов каменной соли.

Иначе соотносятся между собой зависимости $\sigma_1(\varepsilon_1)$ и $V(\varepsilon_1)$ для бетона. На графике $V(\varepsilon_1)$ (рис. 3г) в пределах участка, соответствующего этапу разгрузки, отчетливо фиксируются более высокие значения интенсивности ИК-излучения, а значит, и температуры, по сравнению с аналогичными значениями, полученными для тех же деформаций, но на участке нагружения. Такой характер графиков $V(\varepsilon_1)$ для бетона можно, по-видимому, объяснить известной особенностью деформирования бетонов, проявляющейся в том, что разгрузочная ветвь диаграммы $\sigma_1(\varepsilon_1)$ представляет собой более “выпуклую” кривую, чем кривая для участка “нагрузки” [4, 10].

ВЫВОДЫ

Качественное сравнение зависимостей $\sigma_1(\varepsilon_1)$ и $V(\varepsilon_1)$ позволяет сделать вывод о возможности идентификации по данным терморadiационных измерений особенностей процессов деформирования в различных типах геоматериалов при их высокоамплитудном циклическом нагружении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Mokhnachev M. P.** Fatigue of Rocks, Moscow, Nauka, 1979, 152 pp. (in Russian) [**Мохначев М. П.** Усталость горных пород. — М.: Наука, 1979. — 152 с.]
2. **Voznesensky E. A.** Dynamic Instability of Soil, Moscow, Editorial URSS, 1999, 264 pp. (in Russian) [**Вознесенский Е. А.** Динамическая неустойчивость грунтов. — М.: Эдиториал УРСС, 1999. — 264 с.]
3. **Fuenkajorn K. and Phueakphum D.** Effects of Cyclic Loading on Mechanical Properties of Maha Sarakham Salt, Engineering Geology, 2010, vol. 112, no. 1, pp. 43–52.
4. **Eryshev V. A. and Toshin D. S.** Diagram of concrete deformation under few repeated loads, Izv. Vuzov. Stroitel'stvo, 2005, no. 10, pp. 109–114 (in Russian) [**Ерышев В. А., Тошин Д. С.** Диаграмма деформирования бетона при многократных повторных нагружениях// Изв. вузов. Строительство. — 2005. — № 10. — С. 109–114.]
5. **Sheinin V. I., Levin B. V., Blokhin D. I., and Favorov A. V.** Identification of nonstationary changes in stress state of geomaterials by infrared radiometry data, Journal of Mining Science, 2003, vol. 39, no. 5, pp. 431–437. [**Шейнин В. И., Левин Б. В., Блохин Д. И., Фаворов А. В.** Особенности идентификации нестационарных изменений напряженного состояния геоматериалов по данным инфракрасной радиометрии // ФТПРПИ. — 2003. — № 5. — С. 15–22.]
6. **Wu L., Liu S., Wu Y. and Wang C.** Precursors for Fracturing and Failure, Part II: IRR T-Curve Abnormalities, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2006, vol. 43, no. 3, pp. 483–493.
7. **Sheinin V. I. and Blokhin D. I.** Features of Thermomechanical Effects in Rock Salt Samples under Uniaxial Compression, Journal of Mining Science, 2012, vol. 48, no. 1, pp. 39–45. [**Шейнин В. И., Блохин Д. И.** Исследования особенностей проявления термомеханических эффектов при одноосном сжатии образцов каменной соли // ФТПРПИ. — 2012. — № 1. — С. 46–54.]

8. **Sheinin V. I., Blokhin D. I., Maksimovich I. B., and Sarana E. P.** Experimental research into thermomechanical effects at linear and nonlinear deformation stages in rock salt specimens under cyclic loading, *Journal of Mining Science*, 2016, vol. 52, no. 6, pp. 1039–1046. [**Шейнин В. И., Блохин Д. И., Максимович И. Б., Сарана Е. П.** Экспериментальное исследование проявлений термомеханических эффектов на линейной и нелинейной стадиях деформирования образцов каменной соли в режиме циклического нагружения // *ФТПРПИ*. — 2016. — № 6. — С. 15–22]
9. **Ma L., Sun H., Zhang Y., Zhou T., Li K. and Guo J.** Characteristics of infrared radiation of coal specimens under uniaxial loading, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, vol. 49, issue 4, pp. 1567–1572.
10. **Lou Q., He X.** Experimental study on infrared radiation temperature field of concrete uniaxial compression, *Infrared Physics & Technology*, 2018, vol. 90, pp. 20–30.
11. **Nadai A.** *Theory of Flow and Fracture of Solids*, New York: McGraw-Hill, 1963.
12. **Kriksunov L. Z.** *Reference Book on Basics of Infrared Mechanics*, Moscow, Sov. Radio, 1978, 400 pp. (in Russian) [**Криксунов Л. З.** *Справочник по основам инфракрасной техники*. — М.: Сов. радио, 1978. — 400 с.]