

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТОЭМИССИОННЫХ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В ОБРАЗЦАХ КАМЕННОЙ СОЛИ ПРИ ИХ ЦИКЛИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Д. И. Блохин^{1,2}, А. В. Харченко²

¹ Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС»,
Москва, Россия;

² Институт проблем комплексного освоения недр имени академика
Н. В. Мельникова РАН, Москва, Россия

Аннотация: В статье представлены результаты испытаний образцов каменной соли в условиях одноосного сжатия в режиме последовательных циклов нагрузки – разгрузки с увеличивающимися от цикла к циклу значениями максимального достигнутого напряжения. В описываемых экспериментах, кроме стандартных измерений изменений механических величин, характеризующих наблюдаемые процессы деформирования, проведена синхронная регистрация параметров вариаций инфракрасного (ИК) излучения и акустической эмиссии (АЭ), сопутствующих указанным процессам. Цель экспериментов – исследования закономерностей изменения параметров АЭ- и ИК-излучения на различных стадиях процесса деформирования с учетом выбранных режимов испытаний. Осуществлен совместный анализ экспериментальных зависимостей механических и физических параметров от времени, а также физических параметров – от механических. Установлена принципиальная возможность исследований с использованием ИК-измерений эффекта влияния истории нагружения на деформационные и прочностные характеристики образцов геоматериалов (эффекта «памяти»). Выявленные особенности поведения интенсивности теплового излучения геоматериалов при их циклическом нагружении позволяют высказать предположение о возможности практического применения фиксируемых эффектов в системах геоконтроля в комплексе с апробированными методиками получения количественных оценок напряжений в породных массивах, основанными на использовании акустоэмиссионного и деформационного «эффектов памяти».

Ключевые слова: подземные хранилища газа, каменная соль, циклическое нагружение, осевые напряжения, осевые деформации, инфракрасное излучение, акустическая эмиссия, эффект «памяти».

Для цитирования: Блохин Д. И., Харченко А. В. Комплексное исследование акустоэмиссионных и термомеханических эффектов в образцах каменной соли при их циклическом деформировании // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 4-1. – С. 129–137. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_129.

Complex study of acoustoemission and thermomechanical effects in samples of rock salt at their cyclic deformation

D. I. Blokhin^{1,2}, A. V. Kharchenko²

¹ National Research Technological University "MISIS", Moscow, Russia;

² Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract: The paper presents the results of uniaxial compression tests on rock salt specimens, involving successive load/unload cycles, with the maximum stress increasing from cycle to cycle. Changes in mechanical characteristics, infrared radiation (IR) variations, and acoustic emission (AE) were measured. The goal of the experiment was to study how the parameters of AE and IR radiations change during the process of rock deformation, modes of testing taken into account at that. The experimental time dependences of mechanical and physical parameters are analyzed, as well as relationships between mechanical parameters and physical characteristics. It is established that IR measurements can be used to study the effect of the loading history on the deformation behavior and strength characteristics of geomaterial specimens (the memory effect). Analysis of changes in the intensity of thermal radiation of geomaterials under cyclic loading suggests that it is possible to practically apply the discovered effects in combination with well-established techniques of quantitative estimation of stresses in rock masses, which are based on the acoustic emission and deformation memory effects.

Key words: Underground gas storage, rock salt, cyclic loading, axial stresses, axial deformations, infrared radiation, acoustic emission, "memory" effect.

For citation: Blokhin D. I., Kharchenko A. V. Complex study of acoustoemission and thermomechanical effects in samples of rock salt at their cyclic deformation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(4-1):129–137. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_129.

Введение

В настоящее время одним из эффективных способов хранения газообразных и жидких углеводородов является устройство хранилищ в массивах каменной соли [1, 2]. В процессе циклической эксплуатации подземных хранилищ газа (ПХГ) происходят существенные изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) вмещающего массива каменной соли, которые могут привести к повышению его структурной нарушенности, что, в свою очередь, увеличивает вероятность миграции газа [1]. Этим определяется актуальность лабораторных и натурных экспериментов, направленных на разработку методик, позволяющих оценивать изменения механического состояния камен-

ной соли, подвергаемой циклическому деформированию.

Большинство исследований по установлению закономерностей деформирования геоматериалов (в т. ч. и каменной соли) проводится на образцах или моделях, имитирующих массивы горных пород, в лабораторных условиях, в которых возможно получать данные об НДС геоматериалов с использованием методик, основанных на синхронных измерениях напряжений и деформаций [3–7]. Однако эффективное использование указанных методов в натуральных условиях затруднено рядом причин как методического, так и технологического характера [8]. Альтернативой существующим методам может стать использование бесконтактных термо-

радиационных (ИК-радиометрических) измерений [9–13]. Проведенные ранее исследования по связи параметров теплового излучения с механическими характеристиками материала свидетельствуют о перспективности использования метода ИК-диагностики для оценки динамики поврежденности каменной соли в процессе циклической эксплуатации ПХГ [9].

Цель описываемых в статье экспериментов — проверка эффективности использования ранее апробированных методик ИК-диагностики изменений напряженно-деформированного состояния геоматериалов [9, 12] в условиях последовательных циклов нагружения — разгрузки с увеличивающимся от цикла к циклу значением максимального достигнутого напряжения. Ниже описываются результаты экспериментов, в которых число циклов ограничивалось двумя.

В настоящее время широкое распространение получили экспериментальные исследования по выявлению влияния повторного (или циклического) нагружения на долговечность как материалов конструкций подземных сооружений, так и вмещающих пород [5, 7, 14–18]. В частности, в работах, посвященных нелинейному поведению геоматериалов при повторных нагрузках, подтверждено наличие так называемого «эффекта памяти» [14–18], наблюдаемого при испытаниях с возрастающей от цикла к циклу амплитудой нагрузки. В экспериментах на одноосное сжатие деформационный «эффект памяти» проявляется в виде резкого изменения угла наклона кривой «осевое напряжение σ_1 — осевая деформация ε_1 » при достижении напряжением σ_1 своего максимального испытанного ранее значения, при напряжениях, меньших этого значения, процесс деформирования носит линейный характер [14, 15].

Указанные особенности циклического деформирования геоматериалов находят отражение и в изменениях параметров полей различной физической природы (акустическая, электромагнитная эмиссия и др.), сопутствующих процессам изменения напряженного состояния геоматериалов [14, 15]. Например, невозпроизводимость активности акустической эмиссии (АЭ) dN/dt (число импульсов в секунду) в процессе циклического нагружения твердых тел при напряжениях, меньших максимального достигнутого ранее значения напряжения и резкое возрастание значений dN/dt при достижении этого «запомненного» значения принято называть «эффектом Кайзера» [14, 15]. Возможности эффективного использования эмиссионных откликов такого рода в геомеханических исследованиях показана в [14–18]. Поэтому и методика проведения испытаний и анализа экспериментальных данных в описываемых экспериментах соответствует рекомендациям, сформулированным в монографии [14].

Методы и материалы

Испытания выполнялись на испытательной машине Instron 150LX с помощью автоматизированного комплекса, позволяющего вести синхронную регистрацию механических, терморadiационных и акустикоэмиссионных параметров при различных схемах и режимах нагружения. Фото экспериментального стенда представлено на рис. 1.

Для измерений вариаций интенсивности теплового излучения в диапазоне длин волн от 2 до 14 мкм используется оптический детектор РТН-31 [9, 12]. Датчик ИК-излучения 1 устанавливается примерно в середине высоты образца 2 на расстоянии 0,5–1 см от его поверхности.

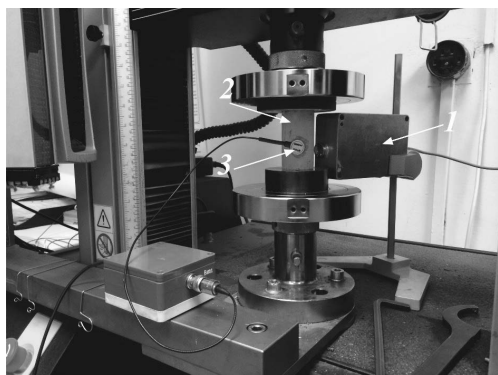


Рис. 1. Экспериментальный стенд:
1 – датчик ИК-излучения, 2 – образец,
3 – пьезопреобразователь
Fig. 1. Experimental stand: 1 – IR sensor,
2 – sample, 3 – piezo transducer

Регистрация активности акустической эмиссии dN/dt (число импульсов в секунду), являющейся одним из часто используемых в лабораторных и натурных геомеханических исследованиях акустоэмиссионных параметров [14–18], велась пьезопреобразователем 3 посредством измерительного комплекса A-Line 32D в полосе частот 30–500 кГц. Преобразователь акустических сигналов 3 размещается на свободной поверхности образца на одной высоте с датчиком ИК-излучения.

Для испытаний были подготовлены цилиндрические образцы каменной соли диаметром 52 мм и высотой 100 мм. В проведенных экспериментах скорость изменения продольной деформации на участках нагружения или разгрузки поддерживалась постоянной $|d\varepsilon_1/dt| = \text{const} = 0,01$ мм/с мм/с. Выбор значения $d\varepsilon_1/dt$ основан на результатах проведенных ранее экспериментов [9, 12], и обеспечивает информативность и достоверность данных ИК- и АЭ-измерений.

Результаты

На рис. 2 представлены графики изменения во времени осевого

напряжения $\sigma_1(t)$ 1, интенсивности ИК-излучения $V_w(t)$ 2 и суммарного числа импульсов акустической эмиссии $\Sigma N(t)$ 3, построенные по результатам испытаний одного из образцов в режиме «нагрузка – разгрузка». В данном эксперименте число циклов «нагружение – разгрузка» равнялось двум. Нагружение образца проводилось до значения $\sigma_1 = \sigma_1^I \approx 13$ МПа, после чего осуществлялась его разгрузка до $\sigma_1^I = 2$ МПа. Во втором цикле испытаний образец доводился до разрушения. Зафиксированное значение предела прочности образца σ_c составило ≈ 25 МПа.

На графиках (рис. 1) фиксируется существенное изменение наклона кривых $\sigma_1(t)$ и $\Sigma N(t)$ в момент времени, соответствующий достижению осевым напряжением при повторной нагрузке значения $\sigma_1 = \sigma_1^I$. Подобное поведение зависимостей $\sigma_1(t)$ и $\Sigma N(t)$ при описываемом режиме испытаний в соответствии с [14, 15] можно отнести к проявлениям «эффекта памяти». Аналогичные выводы можно сделать и в отношении зависимости $V_w(t)$, по характерным особенностям которой также можно оценить значение σ_1 .

На рис. 3 приведены зависимости $\Sigma N(\sigma_1)$ и $V_w(\sigma_1)$, а на рис. 4 – зависимости $\sigma_1(\varepsilon_1)$, $\Sigma N(\varepsilon_1)$ и $V_w(\varepsilon_1)$. По графикам с большой точностью определяются значения аргументов, в которых изменяется угол наклона исследуемых экспериментальных зависимостей, что позволяет однозначно оценить не только максимальное значение напряжения σ_1 , достигнутое в первом цикле (рис. 3), но и соответствующее значение продольной деформации ε_1 (рис. 4).

Заключение

Проведены серии испытаний образцов каменной соли при одно-

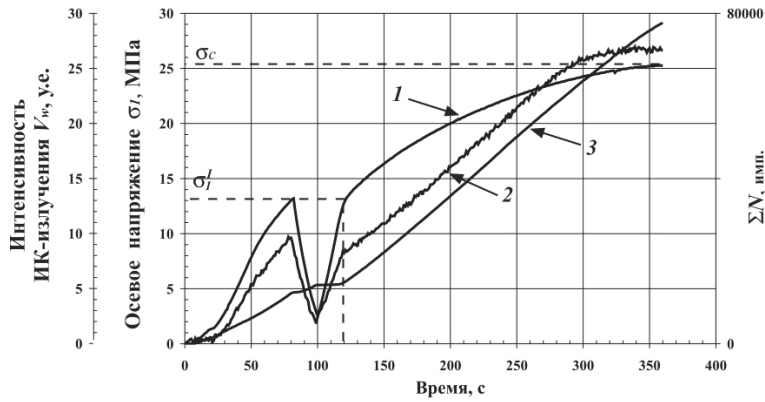


Рис. 2. Зависимости $\sigma_1(t)$ (1), $V_w(t)$ (2), $\Sigma N(t)$ (3) при $d\varepsilon_1/dt = \text{const} = 0,01$ мм/с
 Fig. 2. Dependencies of $\sigma_1(t)$ (1), $V_w(t)$ (2), $\Sigma N(t)$ (3) at $d\varepsilon_1/dt = \text{const} = 0,01$ mm/s

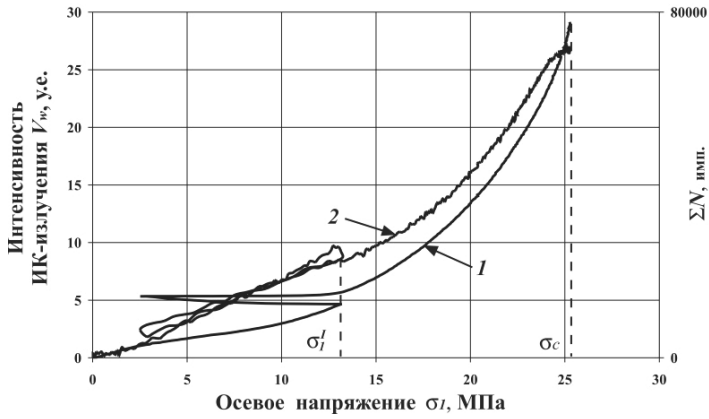


Рис. 3. Зависимости суммарного числа импульсов акустической эмиссии $\Sigma N(\sigma_1)$ (1) и $V_w(\sigma_1)$ (2)
 Fig. 3. Dependencies of the total number of acoustic emission pulses $\Sigma N(\sigma_1)$ (1) and $V_w(\sigma_1)$ (2)

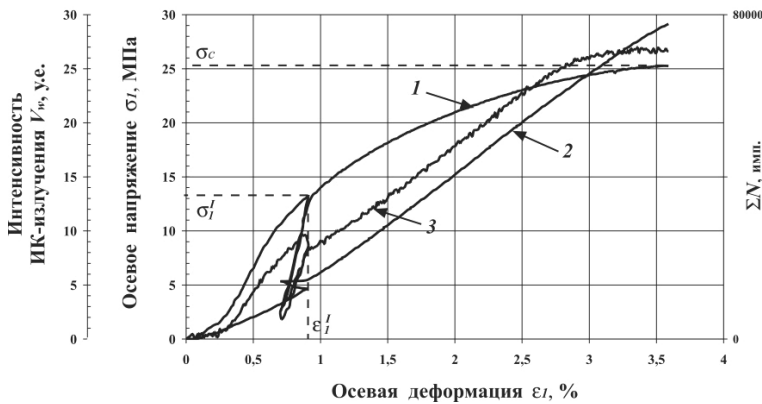


Рис. 4. Зависимости $\sigma_1(\varepsilon_1)$ (1), $\Sigma N(\varepsilon_1)$ (2) и $V_w(\varepsilon_1)$ (3)
 Fig. 4. Dependencies $\sigma_1(\varepsilon_1)$ (1), $\Sigma N(\varepsilon_1)$ (2) and $V_w(\varepsilon_1)$ (3)

осном деформировании в режиме с циклически (по «треугольной траектории») изменяющейся нагрузкой. При проведении экспериментов осуществлялась синхронная регистрация изменений механических (нагрузка на образец, осевая деформация) и сопутствующих вариаций физических (интенсивность инфракрасного излучения, активность акустической эмиссии и др.) параметров. По полученным синхронным записям исследованы закономерности изменения параметров АЭ и ИК на различных стадиях процесса деформирования при указанном режиме испытаний. Проведен совместный анализ экспериментальных зависимостей механических и физических параметров от времени, а также физических параметров — от механических.

Показано, что при выбранном режиме испытаний как акустикоэмиссионные, так и терморadiационные измерения оказываются эффективными для диагностики предыстории процессов деформирования. Однако, как установлено в [19], информативность акустикоэмиссионных измерений понижается при увеличении скорости нагружения, а терморadiационные измерения, — наоборот [9], — при малых

скоростях нагружения могут не давать информации о механических процессах в образце вследствие влияния теплообмена. Поэтому целесообразным представляется комплексный подход к диагностике предыстории нагружения, основанный на совместных измерениях механических параметров, ИК- и АЭ-сигналов.

В заключение отметим, что для эффективной диагностики поведения геоматериалов в рассмотренных условиях необходима разработка соответствующих физических моделей, позволяющих однозначно идентифицировать по изменению характера ИК-излучения изменения параметров соответствующих нелинейных механических процессов. Тем не менее, результаты проведенных экспериментов не только подтверждают перспективность определения прочностных и деформационных характеристик геоматериалов по данным бесконтактных терморadiационных измерений, но и указывают на принципиальную возможность использования таких измерений для оценки степени поврежденности образцов горных пород, а в перспективе и породных массивов, включающих подземные выработки, в т. ч. и ПХГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 промышленность. — 2010. — № 6. — С. 72–75.
2. Богданов Ю. М., Журавлева Т. Ю., Тавостин М. Н., Калиниченко И. В. Оценка конвергенции и срока службы подземных выработок – емкостей в каменной соли в системе ПХГ // Газовая промышленность. — 2011. — № 7. — С. 55–58.
3. 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. Сообщение 1: Закономерности деформирования соляных пород при одноосном сжатии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2005. — № 6. — С. 14–25. <https://doi.org/10.1007/s10913-006-0013-z>.

4. *Li W., Han Y., Wang T., Ma J.* DEM micromechanical modeling and laboratory experiment on creep behavior of salt rock // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, Vol. 46, pp. 38 – 46. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.07.013>.

5. *Chen J., Du C., Jiang D., Fan J., He Y.* The mechanical properties of rock salt under cyclic loading-unloading experiments // *Geomechanics and Engineering*, 2016, Vol. 10, № 3, pp. 325 – 334. DOI: 10.12989/gae.2016.10.3.325.

6. *Liu J., Wang C., Pei J., Wang L., Xu H., Deng C.* A New Testing Method for the Characterization of the Tension-Compression Cyclic Behavior of Rock Salt // *Geotechnical Testing Journal*, 2020, Vol. 43, № 4, pp. 844 – 852. DOI: 10.1520/GTJ20180349.

7. *He M. M., Ren J., Su P., Li N., Chen Y. H.* Experimental Investigation on Fatigue Deformation of Salt Rock // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2020, Vol. 56, № 6, pp. 402 – 409. <https://doi.org/10.1007/s11204-020-09622-x>.

8. *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.

9. *Шейнин В. И., Блохин Д. И.* Исследования особенностей проявления термомеханических эффектов при одноосном сжатии образцов каменной соли // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2012. – № 1. – С. 46 – 54. <https://doi.org/10.1134/S1062739148010054>.

10. *Беспалько А. А., Штирц В. А., Яворович Л. В., Чулков А. О., Федотов П. И.* Инфракрасное свечение скважин и его физическое моделирование на образцах горных пород при одноосном силовом нагружении // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. – 2017. – № 3. – С. 16 – 20.

11. *Lou Q., He X.* Experimental study on infrared radiation temperature field of concrete uniaxial compression // *Infrared Physics & Technology*, 2018, Vol. 90, pp. 20 – 30. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.01.033>

12. *Шейнин В. И., Блохин Д. И., Новиков Е. А., Мудрецова Л. В.* Исследование стадий деформирования известняка на основе акустоэмиссионных и термомеханических эффектов // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 2019. – № 6. – С. 11 – 14. <https://doi.org/10.1007/s11204-020-09621-y>

13. *Cao K., Ma L., Zhang D., Lai X., Zhang Z., Khan N. M.* An experimental study of infrared radiation characteristics of sandstone in dilatancy process // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, Vol. 136, Article 104503. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2020.104503>

14. *Лавров А. В., Шкуратник В. Л., Филимонов Ю. Л.* Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах. – М.: Издательство МГГУ, 2004. – 450 с.

15. *Lavrov A.* Fracture-induced phenomena and memory effects in rocks: a review, *Strain*, 2005, Vol. 41, № 4, pp. 135 – 149. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2005.00233.x>

16. *Meng Q., Chen Y., Zhang M., Han L., Pu H., Liu J.* On the Kaiser effect of rock under cyclic loading and unloading conditions: insights from acoustic emission monitoring // *Energies*, 2019, Vol. 12, № 17, Article 3255. doi:10.3390/en12173255

17. *Пантелеев И. А., Мубассарова В. А., Зайцев А. В., Шевцов Н. И., Коваленко Ю. Ф., Карев В. И.* Эффект Кайзера при трехосном сжатии песчаника с последовательным вращением эллипсоида заданных напряжений // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2020. – № 3. – С. 47 – 55. <https://doi.org/10.1134/S1062739120036653>

18. *Бельтюков Н. Л.* Особенности использования эффекта Кайзера для оценки напряженного состояния массива горных пород // *Горное эхо*. – 2019. – № 3. – С. 24 – 31. <https://doi.org/10.7242/echo.2019.3.7>

19. *Filimonov Y., Lavrov A., Shkuratnik V.* Acoustic emission in rock salt: effect of loading rate // *Strain*, 2002, Vol. 38, pp. 157 – 159. DOI: 10.1046/j.1475-1305.2002.00022.x

REFERENCES

1. Bogdanov Yu. M., Zhuravleva T. Yu., Sil'verstov L. K., Tavostin M. N. Investigation of Geomechanical Processes during Gas Injection and Extraction in Underground Gas Storage in Rock Salt, *Gazovaya promyshlennost'*. 2010, no. 6, pp. 72–75 [In Russ].
2. Bogdanov Yu. M., Zhuravleva T. Yu., Tavostin M. N., Kalinichenko I. V. Assessment of the convergence and service life of underground workings-tanks in rock salt in the UGS system, *Gazovaya promyshlennost'*. 2010, no. 7, pp. 55–58 [In Russ].
3. Zhigalkin V. M., Usol'tseva O. M., Semenov V. N., Tsoi P. A., Asanov V. A., Baryakh A. A., Pan'kov I. L., Toksarov V. N. Deformation of quasi-plastic salt rocks under different conditions of loading. Report I: Deformation of salt rocks under uniaxial compression. *Journal of Mining Science*, 2005, Vol. 41, no. 6, pp. 507–515. <https://doi.org/10.1007/s10913-006-0013-z>.
4. Li W., Han Y., Wang T., Ma J. DEM micromechanical modeling and laboratory experiment on creep behavior of salt rock. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, Vol. 46, pp. 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.07.013>.
5. Chen J., Du C., Jiang D., Fan J., He Y. The mechanical properties of rock salt under cyclic loading-unloading experiments. *Geomechanics and Engineering*, 2016, Vol. 10, no. 3, pp. 325–334. DOI: 10.12989/gae.2016.10.3.325.
6. Liu J., Wang C., Pei J., Wang L., Xu H., Deng C. A New Testing Method for the Characterization of the Tension-Compression Cyclic Behavior of Rock Salt. *Geotechnical Testing Journal*, 2020, Vol. 43, no. 4, pp. 844–852. DOI: 10.1520/GTJ20180349
7. He M. M., Ren J., Su P., Li N., Chen Y. H. Experimental Investigation on Fatigue Deformation of Salt Rock. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2020, Vol. 56, no. 6, pp. 402–409. <https://doi.org/10.1007/s11204-020-09622-x>.
8. Zakharov V. N., Kubrin S. S., Feit G. N., Blokhin D. I. Determination of the stress-strain state of rocks in the development of coal seams that are dangerous for geo- and gas-dynamic phenomena. *Ugol'*. 2012. no. 10. pp. 34–36 [In Russ].
9. Sheinin V. I., 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. <https://doi.org/10.1134/S1062739148010054>.
10. Bespal'ko A. A., Shtirc V. A., Yavorovich L. V., Chulkov A. O., Fedotov P. I. Infrared glow of wells and its physical modeling on rock samples under uniaxial force loading, *Fundamental and applied issues of mining sciences*. 2017, no. 3, pp. 16–20. [In Russ].
11. Lou Q., He X. Experimental study on infrared radiation temperature field of concrete uniaxial compression. *Infrared Physics & Technology*, 2018, Vol. 90, pp. 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.01.033>.
12. Sheinin V. I., Blokhin D. I., no.vikov E. A., Mudretsova L. V. Study of Limestone Deformation Stages on The Basis of Acoustic Emission and Thermomechanical Effects. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2020, Vol. 56, no. 6, pp. 398–401. <https://doi.org/10.1007/s11204-020-09621-y>.
13. Cao K., Ma L., Zhang D., Lai X., Zhang Z., Khan N. M. An experimental study of infrared radiation characteristics of sandstone in dilatancy process. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, Vol. 136, Article 104503. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104503>
14. Lavrov A. V., Shkuratnik V. L., Filimonov Yu. L. *Akustoemissionnyj effekt pamyati v gornyh porodah* [Acoustic-emission memory effect in rocks], Moscow, MGPU, 2004, 456 p. [In Russ].
15. Lavrov A. Fracture-induced phenomena and memory effects in rocks: a review, *Strain*, 2005, Vol. 41, no. 4, pp. 135–149. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2005.00233.x>

16. Meng Q., Chen Y., Zhang M., Han L., Pu H., Liu J. On the Kaiser effect of rock under cyclic loading and unloading conditions: insights from acoustic emission monitoring. *Energies*, 2019, Vol. 12, no. 17, Article 3255. doi:10.3390/en12173255

17. Panteleev I. A., Mubassarova V. A., Zaitsev A. V., Shevtsov N. I., Kovalenko Y. F., Karev V. I. Kaiser Effect in Sandstone in Polyaxial Compression with Multistage Rotation of an Assigned Stress Ellipsoid. *Journal of Mining Science*, 2020, Vol. 56, no. 3, pp. 370–377. <https://doi.org/10.1134/S1062739120036653>

18. Belyutyukov N. L. Features of Kaiser Effect Use to Estimate Stress State of the Rock, *Gornoe Ekho*. 2019, no. 3, pp. 24–31. [In Russ] <https://doi.org/10.7242/echo.2019.3.7>

19. Filimonov Y., Lavrov A., Shkuratnik V. Acoustic emission in rock salt: effect of loading rate. *Strain*, 2002, Vol. 38, pp. 157–159. DOI: 10.1046/j.1475-1305.2002.00022.x **PLoS**

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Блохин Дмитрий Иванович^{1,2} – канд. техн. наук, dblokhin@yandex.ru;

*Харченко Анна Викторовна*² – канд. техн. наук, av-kharchenko@yandex.ru;

¹ Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС», Москва, Россия;

² Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН, Москва, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Blokhin D. I.^{1,2}, Cand. Sci. (Eng.), dblokhin@yandex.ru;

*Kharchenko A. V.*², Cand. Sci. (Eng.), av-kharchenko@yandex.ru;

¹ National Research Technological University “MISIS”, Moscow, Russia;

² Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

Получена редакцией 01.02.2021; получена после рецензии 19.02.2021; принята к печати 10.03.2021.

Received by the editors 01.02.2021; received after the review 19.02.2021; accepted for printing 10.03.2021.

