

ЗАКОНОМЕРНОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, ПРОДОЛЬНЫХ И ОБЪЕМНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ КАМЕННОЙ СОЛИ ПРИ ЕЕ НАГРУЖЕНИИ ПО СХЕМЕ КАРМАНА И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

О.С. Кравченко

НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: ftkp@mail.ru

Аннотация: Проведены синхронные акустико-эмиссионные и деформационные измерения в образцах каменной соли в условиях сложного напряженного состояния при трех различных уровнях внешнего температурного воздействия. Дано описание аппаратного и методического обеспечения указанных измерений. Выявлены и проанализированы характерные для каждой стадии деформирования и конкретной температуры особенности акустической эмиссии. Отмечено, что при проведении испытаний по схеме Кармана, изменения активности акустической эмиссии в пределах каждой стадии деформирования по сравнению с одноосным нагружением носят более упорядоченный характер, что связано со структурной консолидацией геоматериала. Показано, что в отличие от продольных и объемных деформаций, активность акустической эмиссии испытывает на границах между стадиями деформирования относительно резкие изменения. Это позволяет достаточно четко выявлять указанные границы, оценивать соответствующие им физико-механические свойства каменной соли и идентифицировать стадии ее деформирования. Увеличение температуры, при которой проводились испытания, приводило к некоторому смещению границ между линейно-упругой и упругопластической стадиями деформирования, а также упругопластической стадией и стадией разрушения. Указанное смещение соответствует уменьшению с ростом температуры пределов упругости и длительной прочности каждого образца каменной соли относительно предела его прочности при сжатии.

Ключевые слова: каменная соль, механическое нагружение, стадии деформирования, акустическая эмиссия, температурные воздействия, предел упругости, предел длительной прочности, схема Кармана.

Для цитирования: Кравченко О. С. Закономерности акустической эмиссии, продольных и объемных деформаций каменной соли при ее нагружении по схеме кармана и температурных воздействиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 4. – С. 96–104. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-96-104.

Regular patterns of acoustic activity, axial and volumetric strains in rock salt under Karman's loads and thermal effects

O.S. Kravchenko

National University of Science and Technology «MISS», Moscow, Russia,
e-mail: ftkp@mail.ru

Abstract: Synchronous measurements of acoustic emission and deformation were carried out on rock salt samples subjected to complex stress under three different levels of the external thermal forces. The measurement instrumentation and procedures are described. The features of acoustic emission are revealed for each deformation stage and specific temperature. It is found that in the tests according to Karman's scheme, the acoustic activity at each deformation stage changes more orderly than under uniaxial loading, which is connected with structural consolidation of the geomaterial. As against the axial and volumetric straining, the acoustic activity experiences sharp changes at the boundaries between the deformation stages. This provides sufficient distinction of the boundaries, assessment of the related physical and mechanical properties of rock salt and identification of its deformation stages. The increase in the test temperature caused some displacement of the boundaries between the linearly elastic and elastoplastic stages of deformation as well as between the stages of elastoplasticity and failure. This displacement corresponds to the decrease in the elastic limit and ultimate long-term strength in each sample of rock salt with increasing temperature relative to the ultimate compression strength.

Key words: rock salt, mechanical loading, deformation stages, acoustic emission, thermal effects, elastic limit, ultimate long-term strength, Karman's scheme.

For citation: Kravchenko O. S. Regular patterns of acoustic activity, axial and volumetric strains in rock salt under Karman's loads and thermal effects. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(4):96-104. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-96-104.

Введение

Значительные запасы, технологичность добычи и транспортирования природного газа обуславливают его первоочередную роль в обеспечении энергетической и экономической безопасности страны. В тоже время, объемы потребления газа характеризуются высокой временной нестабильностью. В зависимости от климатических и региональных факторов они могут изменяться от предельно малых до пиковых значений. С этим связана необходимость резервирования газа, в частности, в специальных подземных хранилищах.

С использованием современных скважинных геотехнологий строительство подземных хранилищ газа (ПХГ) наиболее эффективно в толщах соляных горных пород и, прежде всего, в отложениях каменной соли, которая, благодаря своим свойствам, является надежным геологическим барьером. ПХГ представляет собой сложную и масштабную природно-техническую систему. Возможности управления ее устойчи-

востью в процессе эксплуатации ограничены. В связи с этим особую важность приобретает качество проектных решений, используемых при сооружении ПХГ. Эти решения принимаются на основе экспериментальных данных о структурных особенностях и напряженном состоянии вмещающего хранилище массива, а также физико-механических свойствах каменной соли. Сведения о последних имеют важное значение и для обеспечения безопасности и эффективности традиционной отработки соляных месторождений [1]. Обычно их получают на основе измерений продольных и поперечных деформаций в образцах, подвергаемых одноосному механическому нагружению [2]. Такие измерения чрезвычайно трудоемки, не всегда адекватно отражают свойства во всем объеме образца, не учитывают неравномерность поперечных деформаций по его высоте. В связи с этим в последние два десятилетия наблюдается повышенный интерес к исследованию горных пород на основе

акустико-эмиссионных измерений [3–12].

Большинство акустико-эмиссионных исследований свойств соляных пород проводилось без учета реальных термобарических условий, в которых они находятся в массиве, либо с учетом только части этих условий, например, только сложного напряженного состояния [9] или только повышенных температур [13].

В рамках настоящей работы представлены результаты экспериментальных исследований активности акустической эмиссии (АЭ), продольных и объемных деформаций образцов каменной соли на каждой из стадий деформирования при объемном нагружении и различных температурах.

Аппаратурное и методическое обеспечение экспериментальных исследований

Объектами исследования являлись образцы каменной соли Калининградского месторождения, полученные с использованием kernового бурения с глубины 950 м. Всего было отобрано 9 цилиндрических образцов высотой и диаметром 100 мм и 50 мм соответственно. Каменная соль имела следующие усредненные физико-механические свойства: плотность $\rho = 2140 \text{ кг/м}^3$; модуль упругости $E = 26\,000 \text{ МПа}$; модуль деформации $E_{д,у} = 1445 \text{ МПа}$; пределы прочности при сжатии и растяжении соответственно $\sigma_{с,с} = 24,2 \text{ МПа}$ и $\sigma_{р,с} = 2,2 \text{ МПа}$. Все образцы были относительно однородны, что подтверждалось их предварительным цензурированием ультразвуковым время-импульсным методом.

Испытания каждого из образцов проводилось в режиме трехосного механического нагружения по схеме Кармана. При этом скорость осевого нагружения была постоянна и составляла $(d\sigma_1/dt) = \text{const} = 0,05 \text{ МПа/с}$, а поддерживаемое

постоянным боковое напряжение составляло $\sigma_2 = \sigma_3 = \text{const} = 5 \text{ МПа}$. Осевое нагружение осуществлялось вплоть до разрушения, причем температура для каждого трех образцов из выборки была индивидуальна и составляла $T_1 = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_3 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно. Таким образом, при каждом конкретном режиме термобарических воздействий испытания проводились трижды и затем сравнивались. Это сравнение показало качественную близость соответствующих результатов акустико-эмиссионных и деформационных измерений. Поэтому ниже для каждого температурного режима приводится только один экспериментальный результат.

В процессе каждого эксперимента велись непрерывные измерения и запись испытываемых образцом температур T_i , одноосного σ_1 и бокового $\sigma_2 = \sigma_3$ напряжений, активности $N_{э}$ АЭ, продольных ε_1 и поперечных деформаций $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$.

Экспериментальные исследования проводились с использованием представленного на рис. 1 измерительного комплекса на основе установки длительного сжатия УДС 65/80. Главным отличием этого комплекса от использованных ранее в [13] является то, что он реализует сложное напряженно-деформированное состояние образца по схеме Кармана при постоянной скорости осевого нагружения.

Образец 1 каменной соли в резиновой оболочке с прикрепленными на нем тензодатчиками продольных 2,3 и поперечных 4,5 деформаций устанавливался в цилиндрическую камеру 6, которая была заполнена маслом. Герметичность камеры обеспечивали верхняя крышка 7 и нижняя крышка 8. Нагрев самой камеры осуществлялся термонагревательным элементом 9, который расположен по периметру камеры и подключен к программируемому терморегуля-

тору 10. Контроль температуры образца осуществлялся с помощью закрепленной на нем термопары 11, передающей сигнал на терморегистратор 12, который подключен к ЭВМ 13. Приемные пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) акустической эмиссии 14 и 15 размещались в верхнем 16 и нижнем 17 защитных корпусах, которые прижимались к торцевым поверхностям образца. С помощью поршня 18 силовой установки создавалось давление на нижний защитный корпус 17, через который это давление передавалось на образец 1. Боковое давление создавалось масляным насосом 19. Контроль осевого давления осуществлялся с использованием датчика 20, а бокового с использованием датчика 21, которые подключались к ЭВМ 13. Деформации, которые возникали на исследуемом образце, с помощью тензометров 2,3 и 4,5, входящих попарно в измерительные мосты тензостанции 22, также передавались на ЭВМ 13, где с помощью программного обеспечения A-stest регистрировались и обрабатывались. Сигналы акустической эмиссии, регистрируемые ПЭП 14 и 15, передавались на акустико-эмиссионную измерительную систему 23 A-line 32 D. Таким образом, производилась одновременная регистрация испытываемых образцом температур T_i , осевых σ_1 и боковых напряжений $\sigma_2 = \sigma_3$, возникающих под их влиянием осевых ε_1 и боковых деформаций $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ и активности акустической эмиссии \dot{N}_Σ .

Результаты экспериментов и их обсуждение

По результатам экспериментов были получены представленные на рис. 2 зависимости, которые отражают изменение продольной ε_1 и объемной $\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3$ деформаций, а также активности АЭ \dot{N}_Σ образца каменной соли в функции от девиатора $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ нап-

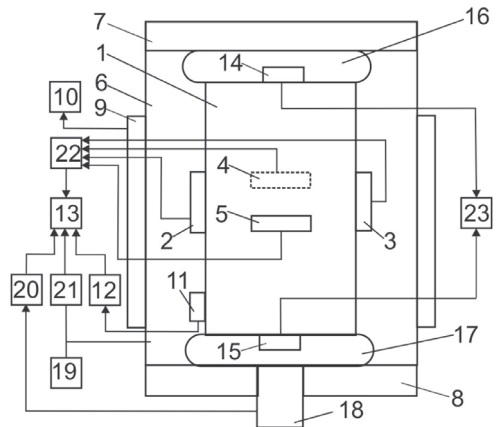


Рис. 1 Блок-схема измерительного комплекса для исследования динамики акустической эмиссии образцов каменной соли в условиях трехосного сжатия и повышенных температур

Fig. 1 Block diagram of a measuring complex for studying the dynamics of acoustic emission of rock salt samples under conditions of triaxial compression and elevated temperatures

ряжений при различных температурах T_i .

Анализируя полученные данные, следует отметить, что в процессе деформирования каменной соли с постоянной скоростью одноосного нагружения АЭ носит не монотонный характер и при различных повышенных температурах имеет свои существенные особенности.

На представленных графиках можно выделить четыре стадии деформирования: I — начальную (пригрузки); II — линейно-упругую; III — упруго-пластическую; IV — разрушения. На рис. 2 границы указанных стадий показаны пунктирными линиями. Эти же стадии выделяются и при одноосном нагружении образцов каменной соли. Каждой из указанных стадий соответствуют определенные качественные изменения в структуре исследуемых образцов, что отражается на характере АЭ. Так на I стадии имеют место локальные разрушения поверхности образца, которые связаны с несовершенством его поверхности и формы. На стадии II происходит линейно-упругое деформи-

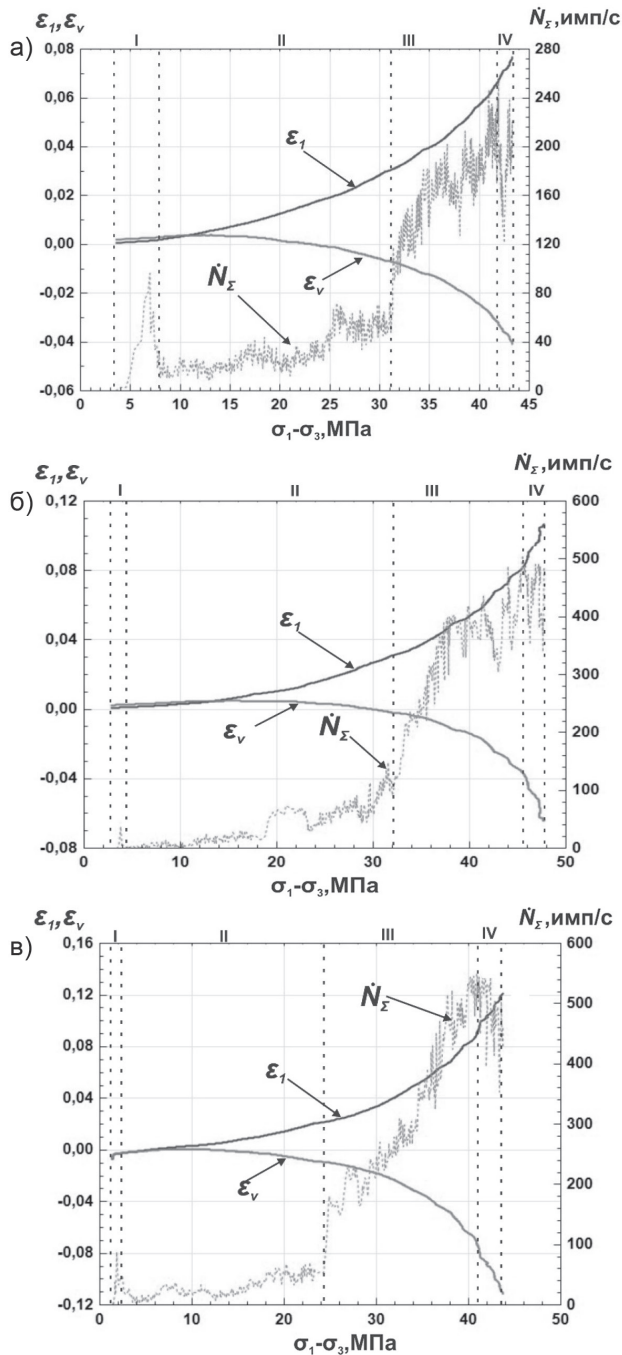


Рис. 2. Зависимости $\epsilon_1 = f(\sigma_1 - \sigma_3)$, $\epsilon_v = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ и $\dot{N}_x = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ образцов каменной соли при постоянной скорости их осевого нагружения и боковом давлении $\sigma_2 = \sigma_3 = 5$ МПа для $T = 23^\circ\text{C}$ (а), $T = 40^\circ\text{C}$ (б) и $T = 60^\circ\text{C}$ (в)

Fig. 2. Dependences $\epsilon_1 = f(\sigma_1 - \sigma_3)$, $\epsilon_v = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ и $\dot{N}_x = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ rock salt samples at constant axial loading rate and lateral pressure $\sigma_2 = \sigma_3 = 5$ МПа для $T = 23^\circ\text{C}$ (а), $T = 40^\circ\text{C}$ (б) и $T = 60^\circ\text{C}$ (в)

Таблица 1

Изменения деформаций и активности АЭ образцов каменной соли при постоянной скорости их осевого нагружения, боковом давлении

$\sigma_2 = \sigma_3 = 5$ МПа и различных температурах T_i

Changes in the strains and AE activity of rock salt samples at a constant rate of axial loading, lateral pressure $\sigma_2 = \sigma_3 = 5$ MPa and various temperatures T_i

| $T_i, ^\circ\text{C}$ | Стадии | Начальная | Линейно-упругая | Упруго пластическая | Разрушения |
|-----------------------|---|---------------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------------------|
| 23 | $\Delta\sigma = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ | 0 – 0,12 | 0,12 – 0,69 | 0,69 – 0,96 | 0,96 – 1 |
| | $\varepsilon_1 = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ | отсутствие изменений | нелинейное увеличение в 20 раз | нелинейное увеличение в 2,3 раза | нелинейное увеличение в 1,2 раза |
| | $(-\varepsilon_v) = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ | отсутствие изменений | нелинейное увеличение в 7 раз | нелинейное увеличение в 3,4 раза | нелинейное увеличение в 1,3 раза |
| | $\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ | скачок до 100, затем спад до 15 | нелинейное увеличение от 15 до 72 | скачок от 72 до 90, затем нелинейный рост до 260 | нелинейное уменьшение от 260 до 240 |
| 40 | $\Delta\sigma = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ | 0 – 0,04 | 0,03 – 0,64 | 0,64 – 0,93 | 0,93 – 1 |
| | $\varepsilon_1 = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ | отсутствие изменений | нелинейное увеличение в 23 раза | нелинейное увеличение в 2,8 раза | нелинейное увеличение в 1,3 раза |
| | $(-\varepsilon_v) = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ | отсутствие изменений | нелинейное увеличение в 6 раз | нелинейное увеличение в 5,6 раза | нелинейное увеличение в 1,8 раза |
| | $\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ | скачок до 16, затем спад до 0 | нелинейное увеличение от 0 до 95 | скачок от 95 до 220, затем нелинейный рост до 495 | нелинейное уменьшение от 495 до 480 |
| 60 | $\Delta\sigma = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ | 0 – 0,03 | 0,03 – 0,54 | 0,54 – 0,92 | 0,92 – 1 |
| | $\varepsilon_1 = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ | отсутствие изменений | нелинейное увеличение в 15 раз | нелинейное увеличение в 4,2 раза | нелинейное увеличение в 1,2 раза |
| | $(-\varepsilon_v) = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ | отсутствие изменений | нелинейное увеличение в 3,5 раза | нелинейное увеличение в 6 раз | нелинейное увеличение в 1,6 раза |
| | $\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ | скачок до 80, затем спад до 20 | нелинейное увеличение от 20 до 45 | скачок от 45 до 175, затем нелинейный рост до 550 | нелинейное уменьшение от 550 до 430 |

Таблица 2

Относительные значения механических характеристик каменной соли

Relative values of the mechanical characteristics of rock salt

| Относительные значения механических характеристик | $T = 23 ^\circ\text{C}$ | $T = 40 ^\circ\text{C}$ | $T = 60 ^\circ\text{C}$ |
|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $\sigma_e / (\sigma_1 - \sigma_3)$ | 0,69 | 0,64 | 0,54 |
| $\sigma_1^\infty / (\sigma_1 - \sigma_3)$ | 0,96 | 0,93 | 0,92 |

рование образца без значимых структурных изменений в нем. Для III стадии характерны начальные процессы трещинообразования, а для IV стадии их дальнейшее развитие вплоть до разрушения. Детальное описание изменений деформаций и активности АЭ при постоянной скорости нагружения и различных температурах на каждой из стадий деформирования протяженностью $\Delta\sigma = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ представлено в табл. 1.

Изменение продольных ε_1 и объемных ε_v деформаций в функции от девиатора σ_d напряжений носит достаточно плавный характер. На границах стадий деформирования не наблюдается каких-либо явных аномалий, которые позволили бы однозначно идентифицировать эти границы. Отметим, что такая же особенность наблюдалась и в экспериментах в одноосном напряженном состоянии.

Дискретность и неоднородность структуры каменной соли обуславливают дискретность и неоднородность ее акустической эмиссии. При трехосном нагружении образцов по сравнению с одноосным активность АЭ в пределах каждой стадии деформирования более стационарна и содержит существенно меньше аномальных выбросов. Физически это понятно, поскольку боковое давление препятствует трещинообразованию, повышая структурную стабильность геоматериала. В то же время на границах между стадиями \dot{N}_Σ испытывает относительно резкие изменения, позволяющие достаточно надежно их идентифицировать по функции $\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1 - \sigma_3)$.

Сравнивая значения активности АЭ на различных стадиях деформирования, можно отметить, что максимальные значения \dot{N}_Σ имеют место на III стадии деформирования и превышают соответствующие значения даже на IV стадии. Такая же закономерность наблюдалась и

при одноосном напряженном состоянии с постоянной скоростью деформирования. Это объясняется тем, что на стадии разрушения возникают крупномасштабные дефекты, которые обуславливают сильное затухание сигналов АЭ, в результате чего часть последних не регистрируется.

С увеличением температуры максимальные значения \dot{N}_Σ увеличиваются. При этом переход от I к III сопровождается ростом значений \dot{N}_Σ и только на IV стадии \dot{N}_Σ уменьшается в рамках одного температурного режима.

При трехосных испытаниях, как и при одноосных, увеличение температуры приводит к смещению границ между стадиями деформирования.

По положению границ между II и III, а также III и IV стадиями деформирования можно оценить относительные значения предела упругости σ_e и предела длительной прочности σ_1^∞ исследуемого образца каменной соли. Экспериментально полученные значения $\sigma_e/(\sigma_1 - \sigma_3)$ и $\sigma_1^\infty/(\sigma_1 - \sigma_3)$ при различных температурах приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, с увеличением температуры относительные значения пределов упругости и длительной прочности уменьшаются, а сами эти значения существенно выше, чем в экспериментах при одноосном нагружении образцов.

Заключение

Представленные результаты свидетельствуют о том, что метод акустической эмиссии может рассматриваться как эффективный инструмент изучения процессов деформирования образцов каменной соли при их нагружении по схеме Кармана и повышенных температурах. Этот метод позволяет по особенностям активности акустической эмиссии надежно идентифицировать стадии деформирования и устанавливать их

границы, а также по положению последних оценивать определенные механические свойства каменной соли. Акустико-эмиссионные измерения при изучении свойств каменной соли могут

быть использованы как самостоятельно, так и в сочетании с традиционными деформационными измерениями, существенно повышая их надежность и информативность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зубов В. П., Ковальский Е. Р., Антонов С. В., Пачгин В. В.* Повышение безопасности рудников при отработке верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 5. — С. 22–33. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-22-33.

2. *Mansouri H., Ajalloeian R.* Mechanical behavior of salt rock under uniaxial compression and creep tests // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. Vol. 110, pp. 19–27.

3. *Li H., Yang C., Zhao W., Liu B., Yin X.* Experimental studies of failure characteristics and evolution laws of ultrasonic velocity and acoustic emission for salt rock under triaxial loading // Rock and Soil Mechanics. 2016. Vol. 37, pp. 2458–2466.

4. *Filimonov Y., Lavrov A., Shkuratnik V.* Acoustic emission in rock salt: effect of loading rate // Strain, 2002. Vol. 38, pp. 157–159. DOI:10.1111/j.1475-1305.2002.00022.x.

5. *Filimonov Y. L., Lavrov A. V., Shafarenko Y. M., Shkuratnik V. L.* Experimentelle untersuchung steinsalzes mittels einaxialer drucktest mit hydrostatischer vorbelastung // Glueckauf-Forschungshefte. 2002. Vol. 61, pp. 80–83.

6. *Novikov E. A., Oshkin R. O., Shkuratnik V. L., Epshtein S. A., Dobryakova N. N.* Application of thermally stimulated acoustic emission method to assess the thermal resistance and related properties of coals // International Journal of Mining Science and Technology. 2018. Vol. 28, No 2, pp. 243–249.

7. *Лавров А. В., Филимонов Ю. Л., Шкуратник В. Л.* Эффект Кайзера в каменной соли // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2002. — № 5. — С. 40–48.

8. *Винников В. А., Вознесенский А. С., Устинов К. В., Шкуратник В. Л.* Теоретические модели акустической эмиссии в горных породах при различных режимах их нагревания // Прикладная механика и техническая физика. — 2010. — т. 51(1). — С. 100–105.

9. *Li H., Yang C., Zhao W., Liu B., Yin X.* Experimental studies of failure characteristics and evolution laws of ultrasonic velocity and acoustic emission for salt rock under triaxial loading // Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics, 2016. Vol. 37, No 9, pp. 2458–2466.

10. *Jie C., Junwe, Z., Song R., Lin L., Liming, Y.* Determination of damage constitutive behavior for rock salt under uniaxial compression condition with acoustic emission // Open Civil Engineering Journal. 2015. Vol. 9, No 1, pp. 75–81.

11. *Mejia F., Shyu M.-L., Nanni A.* Data quality enhancement and knowledge discovery from relevant signals in acoustic emission // Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, Vol. 62, pp. 381–394.

12. *Николенко П. В., Набатов В. В.* Об обеспечении помехозащищенности геоакустического контроля критических напряжений в породном массиве // Горный журнал. — 2015. — № 9. — С. 33–36.

13. *Шкуратник В. Л., Кравченко О. С., Филимонов Ю. Л.* Экспериментальное исследование зависимости акустико-эмиссионных и реологических характеристик каменной соли от напряжений и температуры // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2019. — № 4. — С. 20–27. **ПЛАЭ**

REFERENCES

1. Zubov V.P., Kovalski E.R., Antonov S.V., Pachgin V.V. Improving the safety of mines in developing Verkhnekamsk potassium and magnesium salts. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;5:22-33. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-22-33.
2. Mansouri H., Ajalloeian R. Mechanical behavior of salt rock under uniaxial compression and creep tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* 2018. Vol. 110, pp. 19 – 27.
3. Li H., Yang C., Zhao W., Liu B., Yin X. Experimental studies of failure characteristics and evolution laws of ultrasonic velocity and acoustic emission for salt rock under triaxial loading. *Rock and Soil Mechanics.* 2016. Vol. 37, pp. 2458 – 2466.
4. Filimonov Y., Lavrov A., Shkuratnik V. Acoustic emission in rock salt: effect of loading rate. *Strain*, 2002. Vol. 38, pp. 157 – 159. DOI:10.1111/j.1475-1305.2002.00022.x.
5. Filimonov Y.L., Lavrov A.V., Shafarenko Y.M., Shkuratnik V.L. Experimentelle untersuchung steinsalzes mittels einaxialem drucktest mit hydrostatischer vorbelastung. *Glueckauf-Forschungshefte.* 2002. Vol. 61, pp. 80 – 83.
6. Novikov E.A., Oshkin R.O., Shkuratnik V.L., Epshtein S.A., Dobryakova N.N. Application of thermally stimulated acoustic emission method to assess the thermal resistance and related properties of coals. *International Journal of Mining Science and Technology.* 2018. Vol. 28, No 2, pp. 243 – 249.
7. Lavrov A.V., Filimonov Yu.L., Shkuratnik V.L. Kaiser effect in rock salt. *Fiziko-tehnicheskkiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh.* 2002, no 5, pp. 40 – 48.
8. Vinnikov V.A., Voznesenskiy A.S., Ustinov K.V., Shkuratnik V.L. Theoretical models of acoustic emission in rocks with different heating regimes. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika.* 2010. Vol. 51(1), pp. 100 – 105. [In Russ].
9. Li H., Yang C., Zhao W., Liu B., Yin X. Experimental studies of failure characteristics and evolution laws of ultrasonic velocity and acoustic emission for salt rock under triaxial loading. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*, 2016. Vol. 37, No 9, pp. 2458 – 2466.
10. Jie C., Junwe, Z., Song R., Lin L., Liming, Y. Determination of damage constitutive behavior for rock salt under uniaxial compression condition with acoustic emission. *Open Civil Engineering Journal.* 2015. Vol. 9, No 1, pp. 75 – 81.
11. Mejia F., Shyu M.-L., Nanni A. Data quality enhancement and knowledge discovery from relevant signals in acoustic emission. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, Vol. 62, pp. 381 – 394.
12. Nikolenko P.V., Nabatov V.V. Interference protection in geoacoustic control of critical stresses in rocks. *Gornyi Zhurnal.* 2015, no 9, pp. 33 – 36. [In Russ].
13. Shkuratnik V.L., Kravchenko O.S., Filimonov Yu. L. Stresses and temperature affecting acoustic emission and rheological characteristics of rock salt. *Fiziko-tehnicheskkiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh.* 2019, no 4, pp. 20 – 27. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кравченко Олег Сергеевич – аспирант, НИТУ «МИСиС»,
e-mail: ftkp@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

O.S. Kravchenko, Graduate Student, e-mail: ftkp@mail.ru,
National University of Science and Technology «MISIS»,
119049, Moscow, Russia.

Получена редакцией 17.01.2020; получена после рецензии 21.02.2020; принята к печати 20.03.2020.
Received by the editors 17.01.2020; received after the review 21.02.2020; accepted for printing 20.03.2020.