

УДК 622.02.539.2

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО ЭФФЕКТА ПАМЯТИ  
ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ОБРАЗЦОВ КАМЕННОЙ СОЛИ В УСЛОВИЯХ  
ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

**В. Л. Шкуратник<sup>1</sup>, О. С. Кравченко<sup>1</sup>, Ю. Л. Филимонов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”,

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

<sup>2</sup>ООО “Газпром геотехнологии”, E-mail: y.filimonov@gazpromgeotech.ru,

1-я Магистральная, 11/2, 123290, г. Москва, Россия

Установлены закономерности активности акустической эмиссии при одноосном циклическом нагружении образцов каменной соли Калининградского месторождения. Испытания каждого образца проводились при различной температуре и соотношении уровней максимальных напряжений в последовательных циклах нагружения. Получены экспериментальные зависимости изменения активности акустической эмиссии от максимального напряжения предшествующего цикла и температуры. Показано, что при постоянных повышенных температурах акустико-эмиссионный эффект памяти проявляется так же устойчиво, как и при низких. При увеличении температуры в последующем цикле память о максимальном напряжении предшествующего цикла сохраняется, а при уменьшении — исчезает. Если максимальные уровни напряжений в последовательных циклах одинаковы, а температуры постоянны или повышаются, то эффект памяти нечеткий — оцененное на его основе напряжение меньше, чем максимальное напряжение предшествующего цикла.

*Каменная соль, напряженно-деформированное состояние, измерения, контроль, акустическая эмиссия, циклическое нагружение, акустико-эмиссионный эффект памяти*

DOI: 10.15372/FTPRPI20200207

Для эффективного и безопасного освоения соляных месторождений, строительства и эксплуатации подземных хранилищ углеводородов в отложениях каменной соли необходимо не только оценить реологические свойства, но и охарактеризовать напряженно-деформированное состояние вмещающего массива горных пород [1 – 5]. Для этого в последние годы привлекаются методы геоконтроля, основанные на использовании специфического свойства горных пород способности сохранять и при определенных тестовых воздействиях воспроизводить информацию об испытанных ранее максимальных напряжениях. Конкретные проявления указанного свойства принято называть эффектами памяти, среди которых наиболее исследован акустико-эмиссионный [6 – 9]. Он возникает при циклическом нагружении геоматериала с возрастающим от цикла к циклу уровнем максимального напряжения  $\sigma_{\max}$  и проявляется в скачкообразном возрастании активности акустической эмиссии  $N_{\Sigma}$  в цикле  $n$ , в котором  $\sigma_{\max(n)}$  превышает

$\sigma_{\max(n-1)}$  в цикле  $(n-1)$ . Качество проявления эффекта памяти тем выше, чем точнее совпадают режимы тестового и исходного нагружения объекта [10, 11]. Доказано, что в соляных породах (в каменной соли) проявления эффектов памяти определяются высокой пластичностью и ярко выраженными реологическими свойствами. Воздействие на эти свойства оказывают и температурные режимы испытаний [12–16]. До настоящего времени влияние температурного фактора на проявления акустико-эмиссионного эффекта памяти в каменной соли не учитывалось, несмотря на то, что в зоне залегания подземных хранилищ газа температуры могут превышать  $70^\circ\text{C}$ . В ходе технологических процессов закачки и откачки газа температуры могут как возрастать, так и уменьшаться [17, 18].

Цель настоящей работы — выяснить:

- проявляется ли акустико-эмиссионный эффект памяти в каменной соли при высоких температурах (при  $T_2 \gg T_1$ ,  $T_1$  — комнатная температура);
- сохраняется ли память о последнем максимальном испытанном напряжении при температуре  $T_1$  после перехода к  $T_2$  и температуре  $T_2$  после перехода к  $T_1 \ll T_2$ ;
- каковы особенности проявления акустико-эмиссионного эффекта памяти в образцах каменной соли при различных температурных воздействиях в условиях, когда максимальное напряжение в цикле  $n$  не превышает максимальное напряжение в цикле  $(n-1)$ , а лишь достигает его ( $\sigma_{\max(n-1)} = \sigma_{\max(n)}$ ).

#### АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследовались полученные с глубины 1 км и прошедшие предварительное цензурирование образцы каменной соли Калининградского месторождения. Образцы в форме цилиндров высотой 80 мм и диаметром 40 мм имели равномерно-зернистую кристаллическую структуру и следующие усредненные характеристики: плотность  $\rho = 2140 \text{ кг/м}^3$ , модуль упругости  $E_y = 26000 \text{ МПа}$ , модуль деформации  $E_d = 1445 \text{ МПа}$ , предел прочности при сжатии  $\sigma_c = 24.2 \text{ МПа}$ , предел прочности при растяжении  $\sigma_p = 2.2 \text{ МПа}$ , скорость распространения продольных упругих волн  $V_p = 4.2 \text{ км/с}$  и поперечных  $V_s = 2.2 \text{ км/с}$ .

Экспериментальные исследования проводились с использованием аппаратного комплекса (рис. 1). Образец 1 с закрепленным на нем датчиком температуры 2 помещался в цилиндрическую камеру 3, которая нагревалась до заданной температуры посредством размещенного по ее периметру электронагревательного элемента 4, подключенного к программируемому терморегулятору 5. С помощью гидравлического механизма 6 выполнялось перемещение поршня 7, создающего в образце возрастающее, а затем спадающее с постоянной скоростью  $\sigma_1 = 0.05 \text{ МПа/с}$  одноосное напряженное состояние. Напряжения в образце, контролируемые датчиком силы 8, а также сигналы температурного датчика 2 непрерывно регистрировались на компьютере 9. Сигналы акустической эмиссии, возникающие при нагружении образца, принимались размещенным в защитном корпусе 10 пьезоэлектрическим преобразователем 11 и подавались на измерительную систему A-line 32D 12, где вычислялась и регистрировалась их активность. Аппаратурный комплекс позволял получать графики синхронного изменения во времени активности акустической эмиссии  $N_\Sigma$  и циклически изменяющегося одноосного напряжения  $\sigma_1$  для каждой конкретной температуры  $T_i$ .

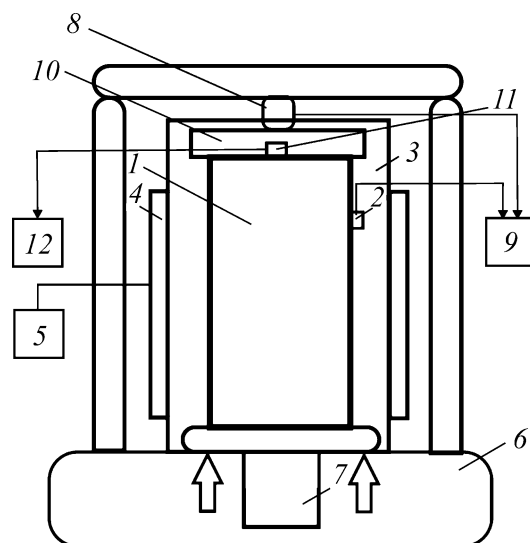


Рис. 1. Блок-схема аппаратного комплекса для исследования акустико-эмиссионного эффекта памяти в образцах каменной соли при разных температурах: 1 — образец; 2 — датчик; 3 — цилиндрическая камера; 4 — электронагреватель; 5 — терморегулятор; 6 — гидравлический механизм; 7 — поршень; 8 — датчик силы; 9 — компьютер; 10 — защитный корпус; 11 — пьезоэлектрический преобразователь; 12 — измерительная система A-line 32D

Проведено три эксперимента, каждый из которых включал три этапа исследования одного и того же образца каменной соли. Этапы отличались режимами проведения испытаний: температурой  $T_i$ , максимальными  $\sigma_{\max}$  и минимальными  $\sigma_{\min}$  напряжениями в цикле (таблица).

Эксперимент № 1 заключался в следующем. На первом этапе при  $T=23\text{ }^{\circ}\text{C}$  образец каменной соли подвергался трем циклам одноосного “нагружения – разгрузки” с максимальными напряжениями  $\sigma_{\max(I)} = 3\text{ МПа}$ ,  $\sigma_{\max(II)} = 6\text{ МПа}$  и  $\sigma_{\max(III)} = 9\text{ МПа}$  в каждом цикле соответственно. Минимальные напряжения в каждом из трех циклов были равны:  $\sigma_{\min} = 2\text{ МПа}$ . После 30 мин выдержки начинался второй этап эксперимента при  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ : образец подвергался трем циклам одноосного “нагружения – разгрузки” с максимальными напряжениями  $\sigma_{\max(I)} = 12\text{ МПа}$ ,  $\sigma_{\max(II)} = 15\text{ МПа}$  и  $\sigma_{\max(III)} = 18\text{ МПа}$  в каждом цикле соответственно. Минимальные напряжения в каждом из трех циклов были равны:  $\sigma_{\min} = 3\text{ МПа}$ . После остывания образца до комнатной температуры выполнялся переход к третьему этапу, в котором при  $T=23\text{ }^{\circ}\text{C}$  образец подвергался трем циклам одноосного “нагружения – разгрузки” с напряжениями  $\sigma_{\max(I)} = 3\text{ МПа}$ ,  $\sigma_{\max(II)} = 6\text{ МПа}$  и  $\sigma_{\max(III)} = 9\text{ МПа}$  в каждом цикле соответственно. Минимальные напряжения в каждом из трех циклов составляли  $\sigma_{\min(I)} = \sigma_{\min(II)} = 2.2\text{ МПа}$ ,  $\sigma_{\min(III)} = 2.8\text{ МПа}$  соответственно.

Эксперимент № 2 аналогичен первому и отличается лишь максимальной температурой второго этапа ( $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). На всех трех этапах эксперимента № 3 циклическое нагружение образца осуществлялось до одинаковых максимальных напряжений в каждом из трех циклов:  $\sigma_{\max(I)} = \sigma_{\max(II)} = \sigma_{\max(III)} = 12\text{ МПа}$ . На первом этапе поддерживали температуру  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при переходе ко второму поднимали до  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а на третьем снижали до  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Режимы экспериментов

Эксперимент	Этап	T, °C	Цикл “разгрузки – нагрузки”	Напряжения, МПа	
				$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\min}$
1	1	23	I	3	2.0
			II	6	2.0
			III	9	2.0
	2	40	I	12	3.0
			II	15	3.0
			III	18	3.0
	3	23	I	3	2.2
			II	6	2.2
			III	9	2.8
2	1	23	I	3	2.5
			II	6	2.5
			III	9	1.8
	2	80	I	12	3.8
			II	15	3.6
			III	18	3.0
	3	23	I	3	1.5
			II	6	0.5
			III	9	0.5
3	1	23	I	12	1.5
			II	12	2.0
			III	12	2.0
	2	60	I	12	2.9
			II	12	2.9
			III	12	2.9
	3	23	I	12	2.1
			II	12	2.1
			III	12	2.1

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимости активности акустической эмиссии каждого из трех образцов каменной соли в функции от циклически изменяющегося во времени  $t$  одноосного напряжения  $\sigma_1$  при разных температурах показаны на рис. 2–4. Как следует из результатов эксперимента № 1, цикл I одноосного механического нагружения образца сопровождается значимым ростом активности акустической эмиссии  $N_\Sigma$  при напряжении  $\sigma_1 \approx 1.5 \text{ МПа} \approx 0.062\sigma_c$ , с которого начинается интенсивное дефектообразование в каменной соли (рис. 2a). Увеличение  $N_\Sigma$  до максимального  $N_{\Sigma(\max)}$  заканчивается с началом снижения  $\sigma_1$ . В этот момент  $N_\Sigma$  резко падает до нуля, возобновляя свой рост только при достижении возрастающим напряжением цикла II  $\sigma_{1\max} = 3 \text{ МПа}$  цикла I. Аналогичные закономерности изменения  $N_\Sigma$  присутствуют и в цикле III нагружения, где увеличение от  $N_\Sigma \approx 0$  до  $N_{\Sigma(\max)}$  происходит скачком в момент, когда  $\sigma_1$  цикла II достигает  $\sigma_{1\max} = 6 \text{ МПа}$  цикла I. В циклах I и II на стадиях разгрузки наблюдается всплеск  $N_\Sigma$ , значения которого меньше  $N_{\Sigma(\max)}$ . При комнатной температуре  $T=23 \text{ °C}$  в образцах каменной соли наблюдается классический акустико-эмиссионный эффект памяти.

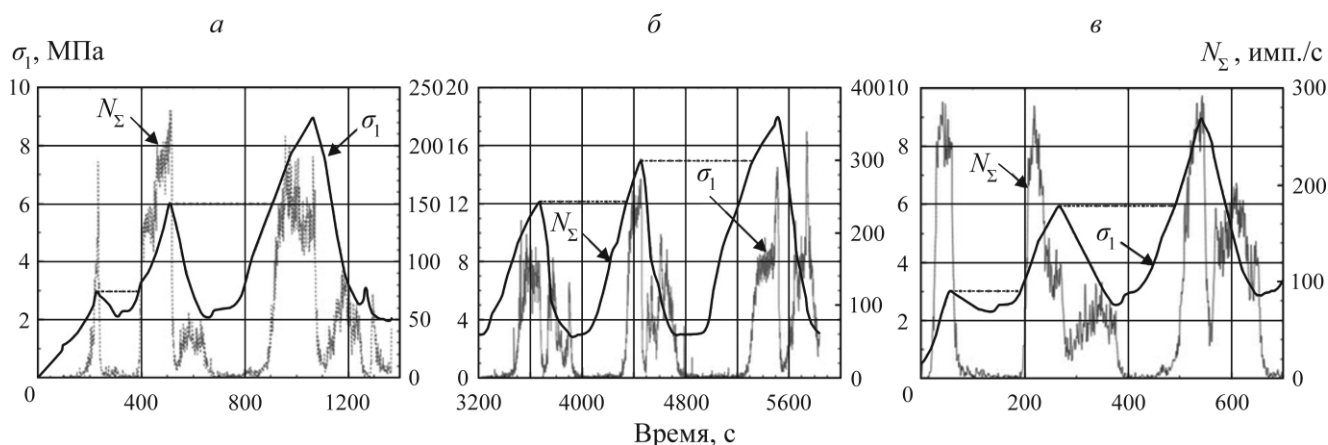


Рис. 2. Зависимость  $N_{\Sigma} = f(t)$  при циклическом нагружении образца каменной соли с возрастающим от цикла к циклу максимальным напряжением при  $T_1 = 23$  °C (а),  $T_2 = 40$  °C (б),  $T_3 = 23$  °C (в)

Как видно из рис. 2б, переход ко второму этапу эксперимента (к температуре  $T=40$  °C) не “стирает” память о  $\sigma_{1\max} = 9$  МПа цикла III первого этапа. На остальных двух циклах нагружения второго этапа акустико-эмиссионный эффект памяти четко проявляется. Скачок  $N_{\Sigma}$  в цикле II возникает при  $\sigma_{1\max}$  цикла I, а скачок  $N_{\Sigma}$  в цикле III — при  $\sigma_{1\max}$  цикла II. Наблюдаемый на стадиях разгрузки всех трех циклов всплеск  $N_{\Sigma}$  при  $T=40$  °C имеет большие значения относительно  $N_{\Sigma(\max)}$ , чем при  $T=23$  °C.

При переходе к третьему этапу эксперимента (при снижении температуры с 40 до 23 °C) информация о  $\sigma_{1\max}$  цикла III второго этапа не сохраняется. Рост  $N_{\Sigma}$  в цикле I наблюдается сразу с ростом  $\sigma_1$ , т. е. раньше  $\sigma_{1\max}$  цикла III второго этапа (рис. 2в). В циклах II и III третьего этапа акустико-эмиссионный эффект памяти четко проявляется, а наблюдаемые на стадиях разгрузки этих циклов всплески  $N_{\Sigma}$  относительно  $N_{\Sigma(\max)}$ , по сравнению со вторым этапом, уменьшаются.

Основные закономерности акустико-эмиссионного эффекта памяти, установленные в эксперименте № 1, справедливы и для эксперимента № 2, на втором этапе которого температура образца составляла уже не 40, а 80 °C (рис. 3).

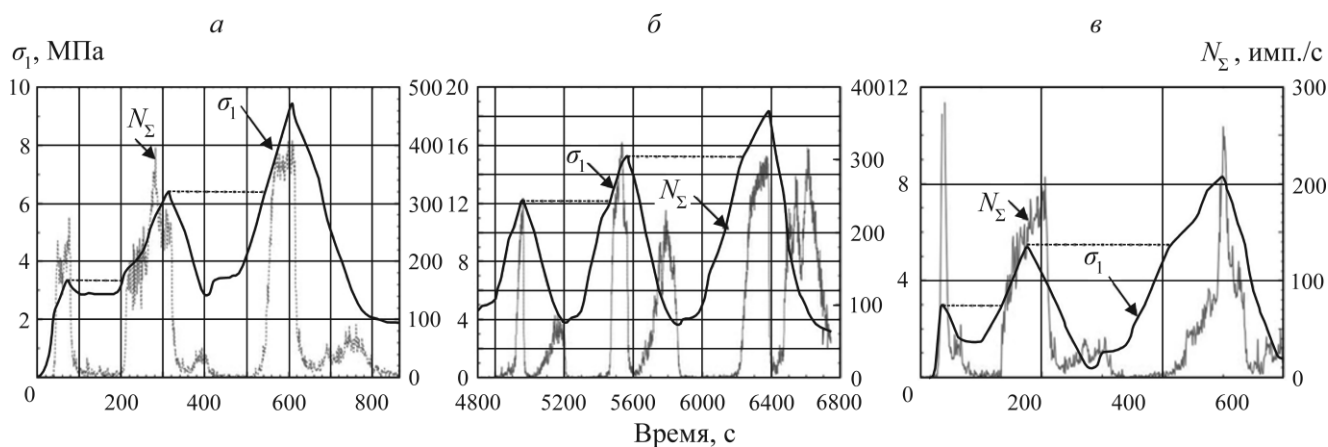


Рис. 3. Зависимость  $N_{\Sigma} = f(t)$  при циклическом нагружении образца каменной соли с возрастающим от цикла к циклу максимальным напряжением при  $T_1 = 23$  °C (а),  $T_2 = 80$  °C (б),  $T_3 = 23$  °C (в)

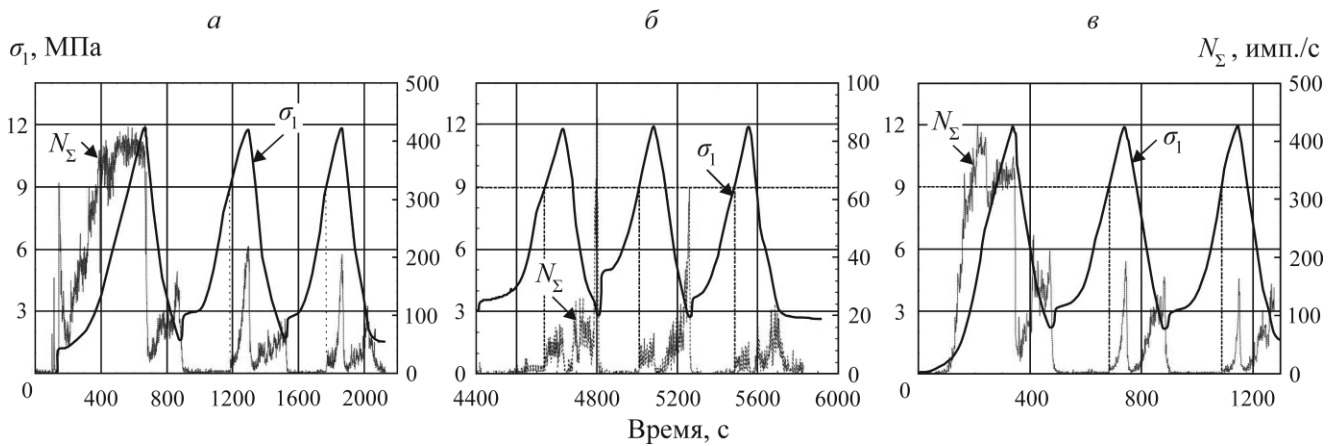


Рис. 4. Зависимость  $N_{\Sigma} = f(t)$  при циклическом нагружении образца каменной соли с постоянными максимальными напряжениями в каждом цикле при  $T_1 = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (а),  $T_2 = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (б),  $T_3 = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (в)

Особенность эксперимента № 3 — постоянство максимального уровня напряжений во всех циклах  $\sigma_{1\text{max}} = 12 \text{ МПа}$ . При таком режиме нагружения акустико-эмиссионный эффект памяти проявляется менее четко. При  $T = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$  устойчивый рост активности акустической эмиссии  $N_{\Sigma}$  в циклах II и III начинается не при  $\sigma_{1\text{max}} = 12 \text{ МПа}$ , а при  $\sigma_1 \approx 9 \text{ МПа}$ , т. е. коэффициент сохранности памяти (отношение напряжения, при котором начинается рост  $N_{\Sigma}$  в цикле  $n$  к  $\sigma_{1\text{max}}$  цикла  $n - 1$ )  $FR \approx 0.75$  (рис. 4а). Это связано с тем, что дефектообразование обусловлено деформациями образца, а на стадии пластического деформирования рост деформаций каменной соли может опережать рост напряжений [19].

Из рис. 4б видно, что при переходе ко второму этапу эксперимента (к температуре  $T = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) акустико-эмиссионный эффект памяти проявляется при  $\sigma_1 \approx 9 \text{ МПа}$  во всех трех циклах, при этом  $N_{\Sigma(\text{max})}$  ниже, чем при  $T = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Наблюдается запаздывание перехода от возрастающих к уменьшающимся значениям  $N_{\Sigma}$  относительно момента такого перехода напряжениями. При переходе к третьему этапу на  $T = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$  рост  $N_{\Sigma}$  в цикле I начинается при  $\sigma_1 < 1 \text{ МПа}$ , т. е. память о  $\sigma_{1\text{max}} = 12 \text{ МПа}$  последнего цикла предыдущего этапа не сохраняется (рис. 4б). В циклах II и III акустико-эмиссионный эффект памяти возникает, как и на первом этапе, при  $\sigma_1 \approx 9 \text{ МПа}$ , но при меньших  $N_{\Sigma}$ .

## ВЫВОДЫ

Исследования закономерностей акустико-эмиссионного эффекта памяти в образцах каменной соли должны проводиться с учетом реальных термобарических условий в массиве соляных пород. Важная составляющая таких условий — изменяющиеся в широких пределах температурные воздействия, учет которых позволит использовать результаты для оценки напряженно-деформированного состояния массива и повышения надежности интерпретации натуральных акустико-эмиссионных измерений. Акустико-эмиссионный эффект памяти устойчиво проявляется при низких ( $23 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и высоких (до  $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) температурах. Память также сохраняется при переходе от низких к высоким температурам. Первый цикл механического нагружения при высокой температуре “помнит” максимальное напряжение предшествующего цикла, нагружение которого осуществлялось при низкой температуре. Однако обратный переход, когда предшествую-

щий цикл нагружения происходил при высокой температуре, а последующий — при низкой, полностью стирает акустико-эмиссионную память. Аналогичные закономерности проявления памяти появляются, когда максимальное напряжение в последовательных циклах одинаково.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu H., Zhang M., Liu M., and Cao L. Influence of natural gas thermodynamic characteristics on stability of salt cavern gas storage, *Earth and Environmental Sci.*, 2019, Vol. 227, No. 4. — P. 135–142.
2. Барях А. А., Самоделкина Н. А. Расчет напряженного состояния массива горных пород в зонах локальных неоднородностей // ФТПРПИ. — 2004. — № 5. — С. 50–59.
3. Зубов В. П., Ковальский Е. Р., Антонов С. В., Пачгин В. В. Повышение безопасности рудников при отработке Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // ГИАБ. — 2019. — № 5. — С. 22–33.
4. Шкуратник В. Л., Кравченко О. С., Филимонов Ю. Л. Экспериментальное исследование зависимостей акустико-эмиссионных и реологических характеристик каменной соли от напряжений и температуры // ФТПРПИ. — 2019. — № 4. — С. 20–26.
5. Назарова Л. А., Назаров Л. А., Голиков Н. А. Оценка реологических свойств пород-коллекторов пластов Баженовской свиты по данным термобарических испытаний // ФТПРПИ. — 2017. — № 3. — С. 22–28.
6. Yamshchikov V. S., Shkuratnik V. L., and Lavrov A. V. Memory effects in rock, *J. Min. Sci.*, 1994, Vol. 30, No. 5. — P. 463–473.
7. Lavrov A. Fracture-induced physical phenomena and memory effects in rocks, *Strain*, 2005, Vol. 41, Issue 4. — P. 135–149.
8. Bai X., Zhang D.-M., Li S.-J., and Rao Z. A novel in situ stress measurement method based on acoustic emission Kaiser effect: a theoretical and experimental study, *J. Royal Society Open Sci.*, 2018, Vol. 5, No. 10, Art. 181263.
9. Yamshchikov V. S., Shkuratnik V. L., and Lykov K. G. Stress measurement in a rock bed based on emission memory effects, *J. Sov. Min. Sci.*, 1990, Vol. 26, No. 2. — P. 122–127.
10. Lavrov A. The Kaiser effect in rocks: Principles and stress estimation techniques, *J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2003, Vol. 40, No. 2. — P. 151–171.
11. Yu X. F., Ge S. G., Yu J., and Shang Y. J. Rock memory and intelligent computing of the excavation process in rock, *J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2000, Vol. 37, No. 3. — P. 549–554.
12. Liang W. G., Xu S. G., and Zhao Y. S. Experimental study of temperature effects on physical and mechanical characteristics of salt rock, *J. Rock Mech. and Rock Eng.*, 2006, Vol. 39. — P. 469–482.
13. Gao X., Yang C., Wu W., and Liu J. Experimental studies on temperature dependent properties of creep of rock salt, *J. Rock Mech. and Eng.*, 2005, Vol. 24. — P. 2054–2059.
14. Kravchenko O. S. and Filimonov Y. L. Deformation of rock salt under increased temperature, *J. Min. Inform. and Analyt. Bulletin*, 2019, No. 1. — P. 69–76.
15. Wisetsaen S., Walsri C., and Fuenkajorn K. Effects of loading rate and temperature on tensile strength and deformation of rock salt, *J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2015, Vol. 73. — P. 10–14.
16. Chen J., Shi X., and Zhou J. The mechanical characteristic of rock salt under uniaxial compression with low temperature effect, *J. Functional Materials*, 2016, Vol. 23, No. 3. — P. 433–436.
17. Zhou Z., Liu J., Wu F., Wang L., Zhuo Y., Liu W., and Li J. Experimental study on creep properties of salt rock and mudstone from bedded salt rock gas storage, *Sichuan Daxue Xuebao (Gongcheng Kexue Ban)*, *J. Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2016, Vol. 48. — P. 100–106.
18. Günther R., Salzer K., Popp T., and Lüdeling C. Steady-state creep of rock salt: Improved approaches for lab determination and modelling, *J. Rock Mech. and Rock Eng.*, 2015, Vol. 48, No. 6. — P. 2603–2613.
19. Лавров А. В., Шкуратник В. Л., Филимонов Ю. Л. Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах. — М.: МГГУ, 2004. — 456 с.

*Поступила в редакцию 10/III 2020*

*После доработки 12/III 2020*

*Принята к публикации 10/IV 2020*