

УДК 622.179.19

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ
АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КАМЕННОЙ СОЛИ ОТ НАПРЯЖЕНИЙ И ТЕМПЕРАТУРЫ**

В. Л. Шкуратник¹, О. С. Кравченко¹, Ю. Л. Филимонов²

¹Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”,
E-mail: ftkp@mail.ru, Ленинский проспект, 6, 119049, г. Москва, Россия

²ООО “Газпром геотехнологии”, E-mail: y.filimonov@gazpromgeotech.ru,
1-я Магистральная, 11/2, 123290, г. Москва, Россия

Проведены синхронные акустико-эмиссионные и деформационные измерения в образцах каменной соли, подвергаемых одновременно различным уровням одноосного механического и ступенчато возрастающего температурного воздействия. Описано методическое и аппаратное обеспечение таких измерений. Получены экспериментальные зависимости, отражающие изменения деформаций сдвига и активности акустической эмиссии образцов как функций от времени и температуры для различных осевых напряжений. С увеличением напряжений переход каменной соли в стадию прогрессирующей ползучести происходит при меньших температурах. Переход на каждую последующую ступень температурного воздействия сопровождается возрастанием крутизны деформаций сдвига и средней на ступени активности акустической эмиссии. Проанализированы закономерности изменения указанных параметров на стадиях установившейся и прогрессирующей ползучести каменной соли. Отмечены преимущества использования акустико-эмиссионных измерений для прогноза разрушения каменной соли вследствие прогрессирующей ползучести, а также их важность для решения задачи оценки свойств соляных горных пород в реальных термобарических условиях строительства и эксплуатации подземных хранилищ газа.

Каменная соль, подземные хранилища газа, термобарические воздействия, напряженное состояние, деформации, акустическая эмиссия

DOI: 10.15372/FTPRPI20190403

Месторождения, мощности по переработке и потребители углеводородов расположены на территории России неравномерно и зачастую на значительных расстояниях друг от друга. Потребность в углеводородах существенно изменяется во времени в зависимости от климатических и сезонных факторов. Для минимизации рисков возникновения чрезвычайных ситуаций в энергетической сфере необходимо резервирование газо- и нефтепродуктов на местах. При наличии соответствующих горно-геологических условий для решения этой задачи наиболее перспективно использование экономичных, экологически и технологически безопасных подземных хранилищ жидких углеводородов и газа. Подземные хранилища газа размещаются преимущественно в отложениях каменной соли, выступающей в качестве геологического барьера и позволяющей использовать при строительстве и эксплуатации резервуара эффективные скважинные технологии [1, 2].

Структурная и функциональная устойчивость подземных хранилищ газа обусловлена качеством проектных решений, базирующихся на информации прогнозного характера о структурных особенностях соляного массива, его напряженно-деформированном состоянии и физико-механических свойствах слагающих пород [3]. Последние определяются путем лабораторных деформационных измерений в ходе механического нагружения образцов с учетом натуральных термобарических условий [4]. Главная особенность таких условий — повышенные температуры, поскольку подземные хранилища газа размещаются на глубинах более 1500 м, где согласно геотермическому градиенту они могут превышать 50 °С. Температура отложений каменной соли, в которых находятся Астраханское и Чу-Чжувское (Китай), составляет 55–60 и 60–65 °С соответственно [5, 6]. На температурный режим соляного массива в окрестностях подземных резервуаров существенно влияют технологические процессы, связанные с их эксплуатацией, в результате чего температура в приконтурной зоне подземных хранилищ газа может увеличиваться до 60–70 °С [7]. Многочисленные экспериментальные исследования свидетельствуют о значительном влиянии температуры на все физико-механические свойства каменной соли и ее ползучесть [8–12].

Из-за высокой пластичности и ярко выраженных реологических свойств каменной соли деформационные измерения в ней трудоемки и не отличаются высокой точностью и надежностью. В [13–17] показана целесообразность определения физико-механических свойств соляных горных пород на основе более технологичных акустико-эмиссионных измерений. Выявлено, что информативные параметры акустической эмиссии испытывают на границах стадий деформирования и ползучести каменной соли аномальные изменения, позволяющие идентифицировать эти стадии и начало разрушения горной породы.

Акустическая эмиссия исследования процессов деформирования каменной соли интенсивно развивается [18–23]. Однако вопросы влияния на их результаты температурных воздействий, характерных для соляного массива в зоне размещения подземных хранилищ газа и имеющих длительность, достаточную для проявления ползучести, не рассматривались.

Цель настоящей работы — проведение синхронных акустико-эмиссионных и деформационных измерений в образцах каменной соли, подвергаемых различным уровням одноосного механического и длительного ступенчато возрастающего термического воздействия.

ПОСТАНОВКА, АППАРАТУРНОЕ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Объектом исследования служила выборка из девяти близких по структуре и текстуре цилиндрических образцов практически чистой каменной соли Тульского месторождения высотой 120 мм и диаметром 60 мм. Цензурирование ультразвуковым времяимпульсным методом показало, что все входящие в выборку образцы относительно однородны, так как скорости распространения продольных и поперечных упругих волн в них различались не более чем на 3%. Основные свойства образцов каменной соли: плотность 2170 кг/м³; предел прочности при сжатии 27.7 МПа; предел прочности при растяжении 2.0 МПа; модуль упругости 11 600 МПа; модуль деформации 5 400 МПа; скорость распространения продольных и поперечных волн 4.47 и 2.44 км/с соответственно.

Выборка разделялась на три группы, каждая из которых состояла из трех образцов, подвергаемых одинаковым режимам механического и термического нагружения. Таким образом осуществлялось дублирование соответствующего эксперимента. Его результаты принимались за истинные при условии, что для образцов одной группы качественно они полностью совпадали. Поскольку такое совпадение действительно имело место, то ниже приводятся экспериментальные данные, полученные на одном из образцов каждой группы.

Образцы первой группы подвергались квазистатическому одноосному нагружению до уровня $\sigma_1 = 18$ МПа, второй — до $\sigma_2 = 19$ МПа и третьей — до $\sigma_3 = 20$ МПа. Затем образцы ступенчато с шагом 10°C нагревались в диапазоне температур от 20 до 80°C . Длительность ступени составляла 24 ч. В ходе каждого эксперимента измерялись испытываемые образцом температуры T , одноосное напряжение σ_1 , активность \dot{N}_2 возникающей под их влиянием акустической эмиссии, а также продольные ε_1 и поперечные $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ деформации. Интенсивность деформаций сдвига рассчитывалась по формуле $\varepsilon_i = 2(\varepsilon_1 - \varepsilon_3) / \sqrt{3}$.

Исследования проводились с использованием измерительного комплекса на основе установки длительного сжатия УДС 65/80 (рис. 1). Образец 1 каменной соли в резиновой оболочке с установленными на нем симметрично тензодатчиками продольных $2, 3$ и поперечных $4, 5$ деформаций помещался в заполненную маслом цилиндрическую камеру 6 с верхней крышкой 7 и нижней 8 . Нагрев камеры 6 осуществлялся с помощью расположенного по ее образующей кольцевого управляемого электронагревательного элемента 9 , подключенного к программируемому блоку управления температурой 10 . Температура образца измерялась закрепленной на нем термопарой 11 , подключенной к терморегистратору 12 . Торцевыми поверхностями образец прижимался к верхнему 13 и нижнему 14 защитным корпусам, в которых размещались приемные пьезоэлектрические преобразователи акустической эмиссии 15 и 16 . Верхний защитный корпус 13 упирался в крышку 7 камеры 6 . Давление на нижний корпус 14 и образец осуществлялось поршнем 17 силовой установки, измерялось датчиком давления 18 , а затем регистрировалось ЭВМ с программным обеспечением A-stest 19 . Тензодатчики $2, 3$ и $4, 5$, входящие попарно в измерительные мосты тензостанции 20 , обеспечивали измерение деформаций. Далее они регистрировались и обрабатывались ЭВМ 19 , к которой также подключен терморегистратор 12 . Сигналы акустической эмиссии с приемных пьезоэлектрических преобразователей 15 и 16 после их усиления предусилителями 21 и 22 поступали на акустико-эмиссионную измерительную систему A-line 32D 23 .

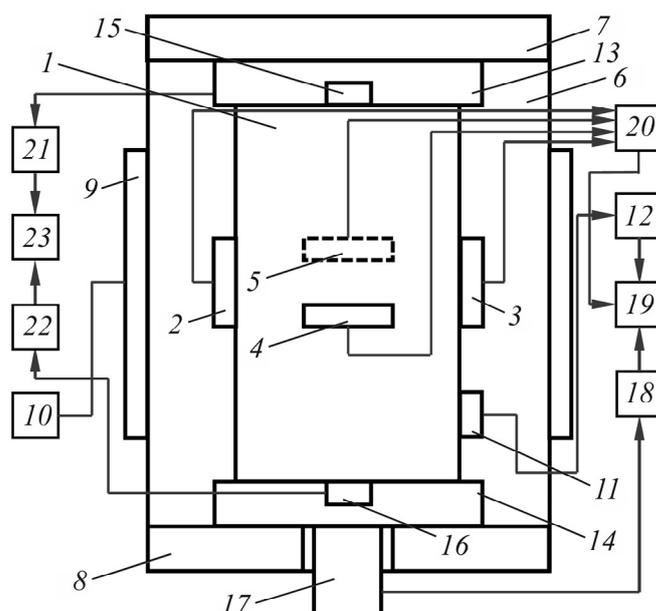


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения и регистрации напряжений, деформаций и акустической эмиссии при одноосном нагружении и нагревании образцов каменной соли

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Получены зависимости, отражающие изменения интенсивности деформаций сдвига ε_i и активности акустической эмиссии \dot{N}_Σ в функции от времени t и температуры T для осевых напряжений $\sigma_1 = 18, 19, 20$ МПа (рис. 2). При $\sigma_1 = \text{const}$ характер и значения ε_i и \dot{N}_Σ с увеличением T изменяются. Так влияет температура на пластичность каменной соли. На всех температурных ступенях, кроме последней, степень указанных изменений существенно больше для ε_i , чем для \dot{N}_Σ .

С переходом на каждую последующую ступень температурного воздействия крутизна зависимостей $\varepsilon_i = f(T, \sigma_1 = \text{const})$ возрастает. На всех ступенях, кроме первой и последней, возрастание относительно линейно. Количественно его можно оценить углом наклона α касательной к кривой $\varepsilon_i = f(T)$ в точке, соответствующей центру каждой ступени, для которой $T_i = \text{const}$. На первой и последней температурных ступенях график $\varepsilon_i = f(T)$ носит ярко выраженный нелинейный характер. В связи с этим каждый из указанных интервалов на рис. 2 разделен штриховой линией на начальный и конечный подынтервалы, а соответствующая касательная строилась только по отношению к центру конечного интервала. Углы α для разных напряжений σ_1 и температурных интервалов, а также средние за соответствующий температурный интервал значения активности акустической эмиссии $\dot{N}_{\Sigma \text{cp}}$ приведены в таблице.

На стадии устойчивой ползучести изменение α и $\dot{N}_{\Sigma \text{cp}}$ невелико (рис. 2). При $\sigma_1 = 18$ МПа переход образцов каменной соли к прогрессирующей ползучести происходит на температурной ступени 70 °С. Начиная с $\sigma_1 = 19$ МПа такой переход наблюдается на ступени 50 °С и сопровождается скачкообразным увеличением α и $\dot{N}_{\Sigma \text{cp}}$. Учитывая, что в пределах каждой группы образцов $\sigma_1 = \text{const}$, считаем, что все изменения параметров α и $\dot{N}_{\Sigma \text{cp}}$ связаны только с термическим воздействием. На последнем температурном интервале такое воздействие вызывает триггерный эффект, проявляющийся переходом от установившейся к прогрессирующей ползучести (при $\sigma_1 = 18$ МПа α увеличивается в 2 раза, $\dot{N}_{\Sigma \text{cp}}$ в > 60 раз; при $\sigma_1 = 19$ МПа α возрастает в 3 раза, $\dot{N}_{\Sigma \text{cp}}$ в > 80 раз; при $\sigma_1 = 20$ МПа α повышается в ~ 2 раза, $\dot{N}_{\Sigma \text{cp}}$ в > 70 раз).

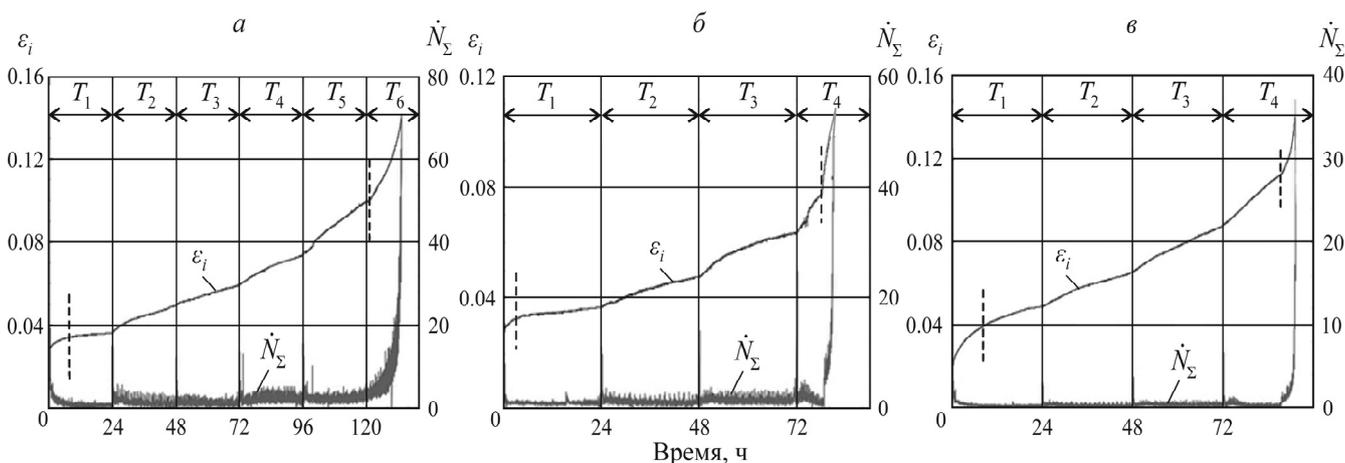


Рис. 2. Изменение интенсивности деформаций сдвига ε_i и активности акустической эмиссии \dot{N}_Σ в образце каменной соли при ступенчатом изменении температуры T и одноосном напряженном состоянии $\sigma_1 = 18$ МПа (а), $\sigma_1 = 19$ (б); $\sigma_1 = 20$ МПа (в)

Углы, характеризующие крутизну деформационных кривых, и средняя активность акустической эмиссии на различных температурных ступенях

Напряжение, МПа	Температура, °С	Угол α , град	Средняя активность, имп./с
18	$T_1 = 23$	8	0.23
	$T_2 = 30$	13	0.30
	$T_3 = 40$	14	0.32
	$T_4 = 50$	18	0.50
	$T_5 = 60$	28	0.53
	$T_6 = 70$	55	35.00
19	$T_1 = 23$	8	0.23
	$T_2 = 30$	12	0.30
	$T_3 = 40$	15	0.33
	$T_4 = 50$	60	28.00
20	$T_1 = 23$	8	0.20
	$T_2 = 30$	19	0.23
	$T_3 = 40$	20	0.27
	$T_4 = 50$	60	20.00

Переход от устойчивой к прогрессирующей ползучести сопровождается существенно большими изменениями акустико-эмиссионного информативного параметра \dot{N}_{Σ} , чем деформационного α . На стадии устойчивой ползучести абсолютные значения \dot{N}_{Σ} при всех уровнях σ_1 малы и не превышают 0.53 имп./с. Это связано с кооперативным влиянием на деформирование образца и дефектообразование в нем факторов времени, термического и механического нагружения. Первый из них способствует проявлениям текучести каменной соли даже при относительно небольших напряжениях, второй создает дополнительные термонапряжения и значительно увеличивает пластичность, благодаря которой деформирование не сопровождается разрушением, третий создает статическое напряженно-деформированное состояние образца. Наблюдаемые на границах температурных ступеней скачки активности акустической эмиссии \dot{N}_{Σ} обусловлены резким изменением температуры и, как следствие, пластичности соли и скорости ее деформирования. Однако в силу кратковременности этих скачков на \dot{N}_{Σ} заметного влияния они не оказывают.

Перспективность использования акустико-эмиссионных измерений для установления момента перехода каменной соли от установившейся стадии к стадии прогрессирующей ползучести наглядно иллюстрируется зависимостями $\varepsilon_i(t)$ и $\dot{N}_{\Sigma}(t)$ на температурной ступени $T = 50$ °С, полученными при одноосном нагружении $\sigma_1 = 20$ МПа (рис. 3).

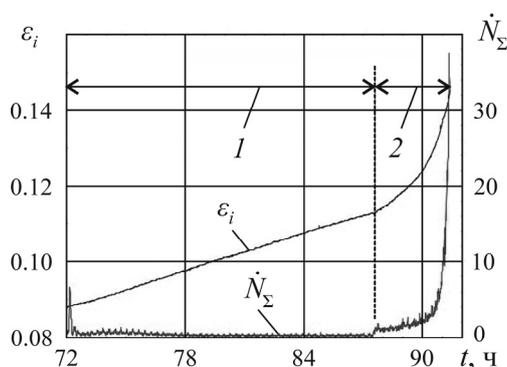


Рис. 3. Изменение интенсивности деформаций сдвига ε_i и активности акустической эмиссии \dot{N}_{Σ} в образце каменной соли при $T = 50$ °С, $\sigma_1 = 20$ МПа: 1 — стадия установившейся ползучести; 2 — стадия прогрессирующей ползучести

На границе между указанными стадиями $\dot{N}_\Sigma(t)$ скачкообразно возрастает в ~ 2 раза, продолжая быстро увеличиваться, что позволяет точно установить момент достижения указанной границы, используя реализуемый современной аппаратурой пороговый принцип измерения активности акустической эмиссии. Данный момент можно установить и по точке перехода от линейного к нелинейному участку зависимости $\varepsilon_i(t)$. Для этого потребуется зарегистрировать всю указанную зависимость и использовать для получения искомой информации относительно сложные технические решения. Следует иметь в виду, что акустико-эмиссионные измерения, в отличие от деформационных, обеспечивают интегральный анализ состояния всего исследуемого объекта, относительно легко могут быть реализованы дистанционно и в режиме мониторинга. Это имеет первостепенное значение при проведении соответствующих измерений в массиве соляных горных пород.

ВЫВОДЫ

Экспериментальные данные свидетельствуют о существенном влиянии температуры на процессы деформирования и разрушения образцов каменной соли в условиях их статического механического нагружения. Температура играет роль своеобразного спускового механизма перевода соли в стадию прогрессирующей ползучести. Наступление такой стадии с ростом статических напряжений образца происходит при более низких температурных воздействиях. Между результатами акустико-эмиссионных и деформационных измерений в образцах каменной соли, подвергаемых термобарическим воздействиям, имеется устойчивая взаимосвязь. Сочетание указанных измерений позволяет повысить надежность исследования структурных изменений соляных горных пород при деформировании. Однако оно не всегда реализуемо, особенно в натуральных условиях и режиме мониторинга. Представляется важной возможность самостоятельного использования метода акустической эмиссии для решения прогнозных задач, связанных с изучением прогрессирующей ползучести каменной соли и сопутствующих ей процессов разрушения, а также с влиянием на эти процессы уровня статических напряжений и повышенных температур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Mansouri H. and Ajalloeian R.** Mechanical behavior of salt rock under uniaxial compression and creep tests, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2018, Vol. 110. — P. 19–27.
2. **Liu H., Zhang M., Liu M., and Cao L.** Influence of natural gas thermodynamic characteristics on stability of salt cavern gas storage. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, Vol. 227, No. 4.
3. **Wu C., Liu J., Zhou Z., Xu H., Wu F., Zhuo Y., and Wang L.** Study on creep properties of salt rock with impurities during triaxial creep test, *Gongcheng Kexue Yu Jishu, Advanced Eng. Sci.*, 2017, Vol. 49. — P. 165–172.
4. **Назарова Л. А., Назаров Л. А.** Оценка реологических свойств пород-коллекторов пластов баженовской свиты по данным термобарических испытаний // ФТПРПИ. — 2017. — № 3. — С. 22–28.
5. **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. of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2016, Vol. 48. — P. 100–106.
6. **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.

7. **He M. M., Li N., Huang B. Q., Zhu C. H., and Chen Y. S.** Plastic strain energy model for rock salt under fatigue loading, *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2018, Vol. 31, No. 3. — P. 322–331.
8. **Kravchenko O. S. and Filimonov Y. L.** Deformation of rock salt under increased temperature, *J. Min. Informational and Analytical Bulletin*, 2018, Vol. 2019, No. 1. — P. 69–76.
9. **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, No. 5. — P. 469–482.
10. **Gao X., Yang C., Wu W., and Liu J.** Experimental studies on temperature dependent properties of creep of rock salt, 2005.
11. **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.
12. **Chen J., Shi X., and Zhou J.** The mechanical characteristic of rock salt under uniaxial compression with low temperature effect, *Functional Materials*, 2016, Vol. 23, No. 3. — P. 433–436.
13. **Shkuratnik V. L. and Yamshikov V. L.** On the relationship between acoustic emission parameters and strength properties of rocks, *Mechanics of Joined and Faulted Rock*, 1995. — P. 469–471.
14. **Filimonov Y., Lavrov A., and Shkuratnik V.** Acoustic emission in rock salt: effect of loading rate, *Strain*, 2002, Vol. 38. — P. 157–159.
15. **Шкуратник В. Л., Филимонов Ю. Л.** О взаимосвязи параметров акустической эмиссии с физико-механическими свойствами и процессами разрушения соляных горных пород // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2004. — С. 35–39.
16. **Wu C., Liu J., Zhou Z., and Zhuo Y.** Creep acoustic emission of rock salt under triaxial compression, *Yantu Gongcheng Xuebao, Chinese J. of Geotech. Eng.*, 2016, Vol. 38. — P. 318–323.
17. **Zhang C., Liang W., Li Z., Xu S., and Zhao Y.** Observations of acoustic emission of three salt rocks under uniaxial compression, *J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2015, Vol. 77. — P. 19–26.
18. **Jie C., Junwei Z., Song R., Lin L., and Liming Y.** Determination of damage constitutive behavior for rock salt under uniaxial compression condition with acoustic emission, *Open Civil Engineering J.*, 2015, Vol. 9, No. 1. — P. 75–81.
19. **Singh A., Kumar C., Kannan L. G., Rao K. S., and Ayothiraman R.** Estimation of creep parameters of rock salt from uniaxial compression tests, *J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2018, Vol. 107. — P. 243–245.
20. **Li H., Yang C., Liu Y., Chen F., and Ma H.** Experimental study of ultrasonic velocity and acoustic emission properties of salt rock under uniaxial compression load, *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao, Chinese J. Rock Mech. and Eng.*, 2014, Vol. 33, No. 10. — P. 2107–2116.
21. **Li H., Dong Z., Ouyang Z., Liu B., Yuan W., and Yin H.** Experimental investigation on the deformability, ultrasonic wave propagation, and acoustic emission of rock salt under triaxial compression, *Appl. Sci. (Switzerland)*, 2019, Vol. 9, No. 4.
22. **Xu Y., Liu J., Xu H., Li T., Xiang G., Deng C., and Wu C.** Experimental study on acoustic emission characteristics of salt rock with impurities under uniaxial compression, *J. of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2016, Vol. 48, No. 6. — P. 37–45.
23. **Zhuo Y., Liu J., Li T., Bian Y., Li J., and Yang S.** Study on acoustic emission of rock salt under triaxial compression, *J. of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2016, Vol. 48. — P. 114–120.

*Поступила в редакцию 24/VI 2019
После доработки 02/VII 2019
Принята к публикации 03/VII 2019*