

УДК 622.02:539.2

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА КАЙЗЕРА
В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ДЛЯ КОНТРОЛЯ
НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД**

П. В. Николенко¹, В. Л. Шкуратник¹, М. Д. Чепур¹, А. Е. Кошелев²

¹Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”,
E-mail: ftkp@mail.ru, Ленинский проспект, 4, 119049, г. Москва, Россия
²ООО “Газпром геотехнологии”, ул. Строителей, 8, к. 1, 119311, г. Москва, Россия

Экспериментально исследованы закономерности формирования и проявления акустико-эмиссионного эффекта памяти в твердеющих композиционных материалах для контроля напряженного состояния в массиве горных пород. Показано, что благодаря однородности этих материалов и относительно высокой акустико-эмиссионной тензочувствительности, при помещении в геосреду они позволяют с высокой точностью определять девиатор действующих в ней напряжений.

Массив горных пород, измерения и контроль, напряженное состояние, композиционные материалы, акустическая эмиссия, эффект памяти

DOI: 10.15372/FTPRPI20180103

Горные породы характеризуются высокой степенью разномасштабной неоднородности свойств, структуры и поврежденности. Их механическое нагружение приводит к возникновению и развитию процессов дефектообразования при напряжениях, существенно меньших, чем предел прочности [1–3]. Указанные процессы сопровождаются излучением сигналов акустической эмиссии (АЭ), которые несут информацию о динамике дефектности, а значит, и о напряженно-деформированном состоянии (НДС) геосреды. Описанный механизм лежит в основе метода АЭ, который начал применяться для мониторинга процессов деформирования и разрушения в массивах горных пород еще с начала второй половины XX в. [4, 5]. Несмотря на постоянное совершенствование методического и аппаратного обеспечения традиционных акустико-эмиссионных измерений в массиве, они по-прежнему позволяют получать лишь качественную информацию о НДС. Переход от качественных к количественным оценкам НДС в рамках метода АЭ возможен на основе использования акустико-эмиссионного эффекта памяти (АЭЭП) в горных породах [6]. Этот эффект, открытый Йозефом Кайзером в 50-е годы прошлого столетия и названный впоследствии его именем, проявляется в горных породах при циклическом деформировании с возрастающей от цикла к циклу нагрузкой. АЭЭП заключается в невоспроизводимости параметров АЭ в последующем цикле нагружения по сравнению

с предыдущим и скачкообразном восстановлении этих параметров в момент достижения максимального уровня напряжения предшествующего цикла. Другими словами, геоматериал, обладающий исходной дефектностью, способен “запоминать” информацию о ранее испытанных максимальных напряжениях и воспроизводить ее при повторном нагружении. При этом существуют решения, позволяющие на основе АЭЭП в горных породах проводить оценку НДС массива в окрестностях выработок [7–9].

Опыт применения АЭЭП для оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород в условиях одноосного НДС показал, что уровень напряжений во втором (тестовом) цикле нагружения σ_{1*}^{II} , при котором проявлялся эффект памяти, точно соответствовал уровню напряжений σ_1^{I} в первом (установочном) цикле, когда эта память была сформирована. Незначительное различие значений σ_1^{I} и σ_{1*}^{II} наблюдалось только в случае существенной поврежденности исследуемого геоматериала.

При использовании АЭЭП для оценки сложного НДС (например, при нагружении образцов горных пород в установочном цикле по схеме Кармана, а в тестовом — вдоль их оси) отмечено, что уровни σ_1^{I} и σ_{1*}^{II} никогда не совпадали [10, 11]. Более поздними исследованиями установлено, что величина σ_{1*}^{II} оказывается в той или иной степени близкой к девиатору напряжений первого цикла $D^{\text{I}} = \sigma_1^{\text{I}} - \sigma_2^{\text{I}}$ [12], а различие σ_{1*}^{II} и D^{I} меньше в тех породах, у которых меньше угол внутреннего трения [13]. В общем случае при осесимметричном нагружении значение σ_{1*}^{II} будет определяться соотношением $\sigma_{1*}^{\text{II}} = \sigma_1^{\text{I}} - \sigma_2^{\text{I}} - k\sigma_2^{\text{I}}$ (k — безразмерный параметр, индивидуальный для каждой горной породы и зависящий от коэффициента трения между берегами трещин) [14].

Процедура определения k описана в [7]. Она крайне трудоемка и требует изготовления и испытания серии образцов в условиях осесимметричного неравнокомпонентного сжатия. Кроме того, даже для одного типа пород значение k может изменяться в широких пределах. Например, для гранита Куру $k = 2.8$, а для гранита Уэстерли $k = 3.4$ [10, 11]. Разброс значений k для каменных солей лежит в интервале 0.40–0.75 [15].

Сведение параметра k к нулю позволило бы значительно снизить трудоемкость применения метода АЭЭП для оценки НДС массива, но только за счет потери точности, поскольку в реальных горных породах всегда выполняется условие $k > 0$. С другой стороны, можно предположить, что в искусственно синтезированных материалах за счет контроля над их свойствами в процессе изготовления окажется возможным уменьшить k ниже определенного порога, после которого им можно будет пренебречь.

Использование АЭЭП в композиционных материалах, помещаемых в массив для количественной оценки динамики одноосного НДС, впервые обосновано в [16, 17]. Предлагалось два принципиально разных подхода. Первый заключается в предварительном нагружении цилиндра из композиционного материала и формировании в нем некоторого уровня критических напряжений σ^{I} , превышение которого в контролируемой точке массива может привести к развитию деструктивных процессов. Подготовленный таким образом цилиндр жестко закрепляют в измерительной скважине, снабжая его пьезоэлектрическим преобразователем и электронным блоком регистрации АЭ. В момент, когда приращения напряжений в массиве превысят уровень σ^{I} , в образце проявится АЭЭП, который будет зарегистрирован электронным блоком. Так создается одноуровневый датчик-сигнализатор, позволяющий выявлять превышение напряжениями в массиве заранее заданного критического уровня.

Другой подход заключается в размещении твердеющего композита с дисперсным наполнителем в измерительной скважине в жидком виде. После полимеризации матрицы и завершения деформационных процессов в зоне контроля получившийся цилиндр выбуривают и испытывают в лабораторных условиях на одноосное сжатие с одновременной регистрацией АЭ. Уровень напряжений σ_{1*}^{II} , при котором проявится АЭЭП, будет равняться максимальному приращению напряжений в массиве в зоне контроля.

Настоящая работа посвящена совершенствованию описанных подходов с целью использования для контроля НДС. Ниже приводятся результаты исследований закономерностей формирования и проявления акустико-эмиссионного эффекта памяти в ряде композиционных материалов в условиях сложного напряженного состояния.

ПОСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В лабораторных исследованиях участвовали три серии синтезированных композиционных материалов, из которых были изготовлены цилиндрические образцы диаметром 45 мм и высотой 90 мм. Матрицей для всех образцов выступала эпоксидная смола PoxySystems L. В качестве наполнителя использовались: алюминиевая пудра, имеющая размер частиц ≈ 60 мкм и весовое соотношение с матрицей, равное 1/500 (серия образцов А); дисперсно распределенные нити углеволокна, имеющие длину 3 мм, толщину 15 мкм и весовое соотношение с матрицей 1/1000 (серия образцов В); листы углеткани, расположенные параллельно оси цилиндров (серия образцов С). До полной полимеризации матрицы образцы подвергались вакуумированию при давлении 0.3 атм для удаления пузырьков воздуха и сохранения постоянства свойств синтезированных материалов.

Образцы подвергались многоцикловым испытаниям на установке УДС 65/80 по схеме Кармана ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$). Регистрация АЭ выполнялась с помощью акустико-эмиссионного измерительного комплекса А-Line 32D. Длительность записи одной волновой формы АЭ-события составляла 5000 отсчетов при интервале дискретизации 0.2 мкс. Также регистрировалось время проявления события с точностью до 1 мкс. Образцы всех серий разбиты на три группы. В группе 1 образцы подвергались двухцикловому нагружению, при этом в первом цикле нагружение проводилось по схеме Кармана, включающей первичное обжатие образца гидростатическим давлением ($\sigma_1^1 = \sigma_2^1 = \sigma_3^1$), а затем увеличение осевого напряжения σ_1 до определенного уровня. Тем самым в образце формировалась разница (девиатор) напряжений $D^1 = \sigma_1^1 - \sigma_2^1$. Во втором цикле образец нагружался в условиях одноосного сжатия до уровня $\sigma_1^{\text{II}} > D^1$. Образцы всех серий в группе 1 подвергались установочным нагружениям при $\sigma_2^1 = 2, 4, 10$ МПа и $\sigma_1^1 = 5, 8, 20$ МПа соответственно. По результатам испытаний для всех образцов рассчитаны усредненные параметры k : композиты серии А — 0.06; композиты серии В — 0.03; композиты серии С — 0.1; гранит — 3.0; каменная соль — 0.6. Видно, что значения k в исследованных композитах на один–два порядка ниже значений k для горных пород. Это позволяет предположить, что в определенных обстоятельствах при контроле напряжений в породном массиве на основе эффекта памяти в композиционных материалах указанным параметром можно пренебречь.

На рис. 1 представлена зависимость относительной погрешности Δ воспроизведения эмиссионной памяти от различных значений девиатора напряжений D^1 . Погрешность рассчитана по формуле $\Delta = (1 - \sigma_{1*}^{\text{II}} / D^1) \cdot 100\%$ (σ_{1*}^{II} — осевое напряжение во втором цикле, при котором проявляется АЭЭП).

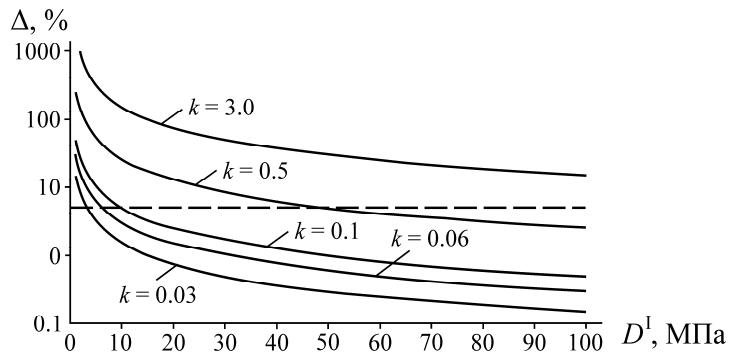


Рис. 1. Зависимость Δ АЭЭП от девиатора напряжений D^I при различных значениях k (штриховой линией отмечен уровень погрешности 5 %)

При значениях $D^I > 3 - 10$ МПа для всех композитов уровень погрешности не превышает 5 %, что позволяет пренебречь параметром k для определения напряжений in-situ. С другой стороны, очевидно, что для рассмотренных горных пород влияние k необходимо учитывать при любых значениях D^I .

Образцы группы 2 подвергались двухцикловому нагружению, при этом в обоих циклах соблюдалось условие $\sigma_{2,3}^I = \sigma_{2,3}^{II}$, $\sigma_1^I < \sigma_1^{II}$. Во всех случаях регистрировалось отчетливое проявление эффекта памяти. На рис. 2 представлен пример проявления АЭЭП в образце серии С для условий $\sigma_{2,3}^I = \sigma_{2,3}^{II} = 5$ МПа, $\sigma_1^I = 16$ МПа. Одновременно с регистрацией напряжений σ_1^{II} , $\sigma_{2,3}^{II}$ и активности АЭ \dot{N}_Σ также регистрировались осевые деформации ε .

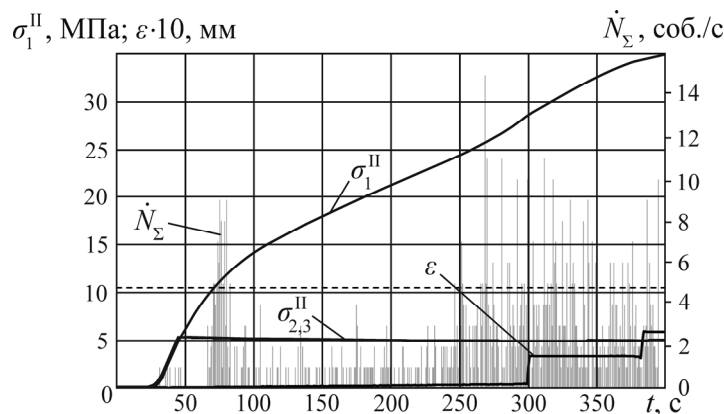


Рис. 2. Зависимости σ_1^{II} , $\sigma_{2,3}^{II}$, ε и \dot{N}_Σ во втором цикле нагружения образца серии С (штриховой линией отмечен уровень D^I)

Следует отметить, что проявление АЭЭП при подобной схеме нагружения во всех типах материалов наблюдается при достижении условия $\sigma_{1*}^{II} = D^I$. Также обращает на себя внимание тот факт, что резкий скачок продольных деформаций ε происходит значительно позднее скачка \dot{N}_Σ и связан, скорее всего, с частичным разрушением композита. Таким образом, в отличие от горных пород [18, 19], деформационный эффект памяти в исследованных материалах не проявляется.

Образцы группы 3 подвергались двухцикловому гидростатическому нагружению по схеме $\sigma_{1-3}^{II} > \sigma_{1-3}^I$. В результате испытаний ни в одном образце эффект памяти не наблюдался. Это подтверждает известное условие формирования и проявления АЭЭП, которое заключается в том, чтобы девиатор напряжений в установочном цикле не был равен нулю ($D^I \neq 0$) [15].

С целью установления диапазона напряжений, при которых формируется и проявляется четкий АЭЭП в исследуемых материалах, образцы каждой из серий подвергались многоцикловому одноосному нагружению с одновременной регистрацией активности акустической эмиссии \dot{N}_Σ . Пример синхронизированных зависимостей σ_1 и \dot{N}_Σ для образца серии А приведен на рис. 3.

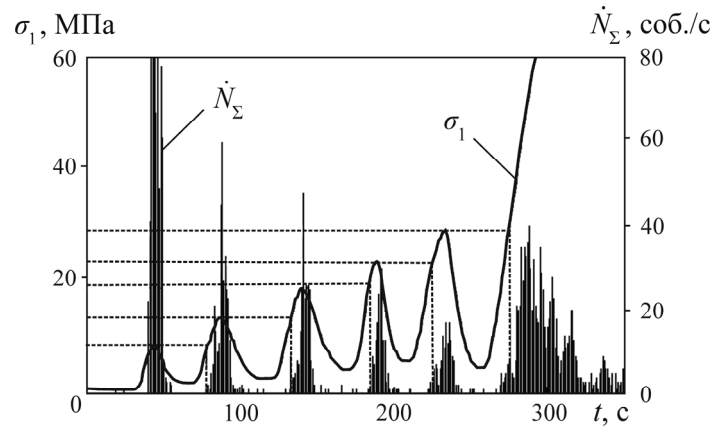


Рис. 3. Зависимости σ_1 и \dot{N}_Σ при циклических испытаниях образца серии А от времени

Видно, что на поздних циклах нагружения эффект памяти начинает проявляться при более низких значениях σ_1 . Подобная закономерность справедлива и для горных пород [20]. Для оценки сохранности памяти в исследованных материалах был определен показатель FR (Felicity Ratio), являющийся, по сути, отношением $\sigma_{1*}^{\text{II}} / \sigma_1^{\text{I}}$. На рис. 4 представлены зависимости значений показателя FR от осевой нагрузки σ_1 для образцов всех серий.

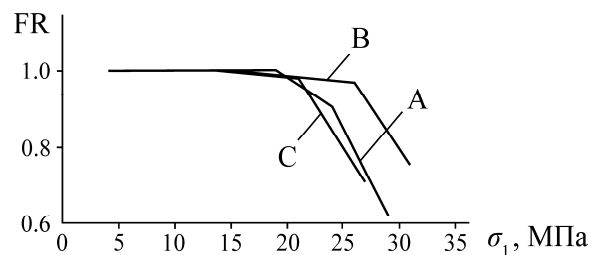


Рис. 4. Зависимость FR для образцов серий А, В и С от осевой нагрузки

Для образцов серий А, В и С показатель FR остается близким к 1 вплоть до максимальных значений σ_1 , равных 24, 27 и 22 МПа соответственно. Указанные значения и являются верхней границей “рабочего” диапазона напряжений каждого из исследованных композитов. В случае сложного напряженного состояния этот диапазон определит возможные значения D^1 в массиве, которые можно контролировать с применением АЭЭП в композиционных материалах.

В дополнение к показателям Δ и FR для оценки применимости исследованных композитов для контроля горного давления рассчитаны значения акустико-эмиссионной тензочувствительности S_{AE} при различных значениях бокового давления $\sigma_{2,3}$ (S_{AE} — параметр, характеризующий влияние продольной относительной деформации на уровень активности акустической эмиссии в образце и являющийся отношением приращения активности АЭ к приращению относительных продольных деформаций на участке нагружения [13]). Фактически величина S_{AE} определяет чувствительность метода АЭЭП при определении напряжений. На рис. 5 представлены результаты расчета значений S_{AE} при $\sigma_{2,3} = 0, 2, 4$ и 10 МПа.

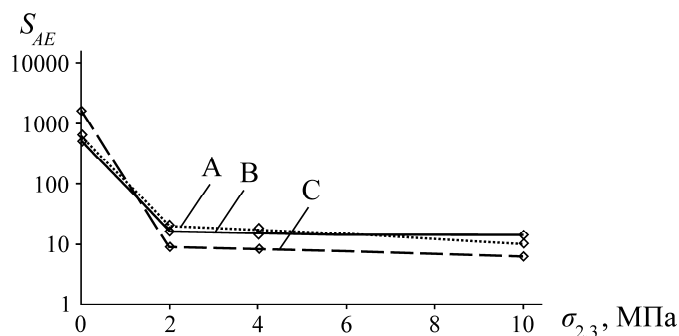


Рис. 5. Результаты расчета S_{AE} для композитов серий А, В и С

Отмечено, что при отсутствии бокового давления S_{AE} достигает достаточно высоких значений. Так, при $\sigma_{2,3} = 0$ для слоистого композита серии С $S_{AE} = 1584$. Однако даже при приложении незначительного бокового обжатия значения S_{AE} для всех исследованных материалов падают более чем на два порядка (например, для образца серии С при $\sigma_{2,3} = 2$ МПа $S_{AE} = 9$). Увеличение $\sigma_{2,3}$ приводит к дальнейшему плавному снижению АЭ тензочувствительности. Подобное снижение обусловливается противодействием $\sigma_{2,3}$ раскрытию трещин, сформированных преимущественно в вертикальном направлении. Особенно значительное падение тензочувствительности наблюдается в слоистых композитах, где в силу их анизотропной структуры все трещины образуются вдоль армирующих слоев из углеткани.

С учетом полученных закономерностей предложен следующий подход для проведения мониторинга НДС в конструктивных элементах систем разработки. В контролируемой области массива бурится измерительная скважина, в торце которой размещают дисперсно наполненный композиционный материал с матрицей, находящейся в жидком состоянии в стадии полимеризации. Глубина заполнения скважины должна быть такой, чтобы сформировался цилиндр, диаметр которого много меньше его высоты. Если в зоне контроля произойдет перераспределение напряжений, в указанном цилиндре сформируется АЭ-память приращений компонент напряженного состояния. Далее цилиндр выбуривают из скважины и из него изготавливают образец так, чтобы направление оси совпадало с направлением априорно известного σ_1 . Полученный цилиндр испытывают в условиях одноосного сжатия с фиксацией значения σ_{1*}^{II} , которое и будет соответствовать значению девиатора приращений напряжений в точке контроля. Для определения абсолютных значений приращений σ_1 и $\sigma_{2,3}$ необходимо независимо измерить значение σ_1 , воспользовавшись методом, описанным в [17].

ВЫВОДЫ

В отличие от горных пород, свойства твердеющих композиционных материалов можно изменять в достаточно широких пределах за счет использования различных по составу и концентрации наполнителей. В частности, композиты могут иметь незначительный угол внутреннего трения. Благодаря этому при помещении в массив и последующем извлечении из него они способны с высокой точностью и повторяемостью воспроизводить информацию об испытанном девиаторе напряжений в широком диапазоне его абсолютных значений. При этом в большинстве случаев нет необходимости в учете свойств композитов и определении дополнительных эмпирических поправочных коэффициентов, как в случае использования при оценке динамики НДС акустико-эмиссионного эффекта памяти в горных породах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lavrov A. V., Shkuratnik V. L.** Deformation- and fracture-induced acoustic emission in rocks, *Acoustical Physics*, 2005, Vol. 51, Issue 1. — P. 2–11.
2. **Ganne P., Vervoort A., Wevess M.** Quantification of pre-peak brittle damage: correlation between acoustic emission and observed micro-fracturing, *Int. J. Rock Mech.*, 2007, Vol. 44, Issue 5. — P. 720–729.
3. **Song L., Gu L., Wei S. P.** Study of damage and acoustic emission properties of rocks under uniaxial cyclic load-unload, *Advanced Materials Research*, 2014, Vol. 887, 888. — P. 878–881.
4. **Виноградов С. Д.** Акустические наблюдения процессов разрушения горных пород. — М.: Наука, 1964. — 84 с.
5. **Шамина О. Г.** Упругие импульсы при разрушении образцов горных пород // Изв. АН СССР, сер. Геофизическая. — 1956. — № 5. — С. 513–518.
6. **Kaiser J.** Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Geräuschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen, *Archiv für das Eisenhüttenwesen*, 1953, Vol. 24, No. 1, 2. — P. 43–45.
7. **Лавров А. В., Шкуратник В. Л., Филимонов Ю. Л.** Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах. — М.: МГГУ, 2004. — 456 с.
8. **Zhang D., Bai X., Qi X., Zhang X., Yi L.** Acoustic emission characteristics and in-situ stresses of bedding rock based on Kaiser effect, *Chinese J. of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, Vol. 35, Issue 1. — P. 87–97.
9. **Paneiro G., Dinis Da Gama C. D.** Applicability of acoustic emission technique for vertical stress determination in mine pillars, *Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses — Proceedings of EUROCK 2014, ISRM European Regional Symposium*, 2014. — P. 273–278.
10. **Li C.** A theory for Kaiser effect and its potential applications, *Proc. 6th Conf. AE/MA in Geologic Structures and Materials*, Clausthal-Zellerfeld, Trans Tech Publications, 1998. — P. 171–185.
11. **Holcomb D. J., Costin L. S.** Detecting damage surfaces in brittle materials using acoustic emission, *J. Appl. Mech., Trans. ASME*, 1986, Vol. 53, No. 3. — P. 536–544.
12. **Hughson D. R., Crawford A. M.** Kaiser effect gauging: the influence of confining stress on its response, *Proc. 6th International Congress on Rock Mechanics*, Rotterdam: A. A. Balkema, 1987, Vol. 2. — P. 981–985.
13. **Holcomb D. J., Martin R. J.** Determining peak stress history using acoustic emissions, *Proc. 26th US Symposium on Rock Mechanics*, Rotterdam: A. A. Balkema, 1985, Vol. 2. — P. 715–722.
14. **Lavrov A. V.** Three-dimensional simulation of memory effects in rock samples, *Proc. International Symposium on Rock Stress*, Rotterdam: A. A. Balkema, 1997. — P. 197–202.
15. **Filimonov Y. L., Lavrov A. V., Shafarenko Y. M., Shkuratnik V. L.** Memory effects in rock salt under triaxial stress state and their use for stress measurements in a rock mass, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2001, Vol. 34, No. 4. — P. 275–291.
16. **Shkuratnik V. L., Nikolenko P. V.** Using acoustic emission memory of composites in critical stress control in rock mass, *J. of Mining Science*, 2013, Vol. 50, Issue 6. — P. 1088–1093.
17. **Nikolenko P. V., Shkuratnik V. L.** Acoustic emission in composites and application for stress monitoring in rock mass, *J. of Mining Science*, 2014, Vol. 61, Issue 2. — P. 80–83.
18. **Wang H.-J., Tang L., Ren X.-H., Yang A.-Y., Niu Y.** Mechanism of rock deformation memory effect in low stress region and its memory fading, *Rock and Soil Mechanics*, 2014, Vol. 35, Issue 4. — P. 1007–1014.
19. **Wang H.-J., Ren X.-H., Tao R.-R., Zhang J.-X.** Mechanism of rock deformation memory effect in low stress region based on frictional sliding, *Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban), J. of Central South University (Science and Technology)*, 2012, Vol. 43, Issue 11. — P. 4464–4471.
20. **Meng Q., Zhang M. E., Han L., Pu H., Chen Y.** Acoustic emission characteristics of red sandstone specimens under uniaxial cyclic loading and unloading compression, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018. — P. 1–20.