

УДК 622.02

**ЭФФЕКТ КАЙЗЕРА ПРИ ТРЕХОСНОМ СЖАТИИ ПЕСЧАНИКА
С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВРАЩЕНИЕМ ЭЛЛИПСОИДА ЗАДАННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ**

**И. А. Пантелеев¹, В. А. Мубассарова¹, А. В. Зайцев², Н. И. Шевцов³,
Ю. Ф. Коваленко³, В. И. Карев³**

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН,

E-mail: pia@icmm.ru, ул. Академика Королева, 1, 614013, г. Пермь, Россия

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

E-mail: a-zaitsev@mail.ru, Комсомольский проспект, 29, 614990, г. Пермь, Россия

³Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского,

E-mail: wikarev@ipmnet.ru, просп. Вернадского, 101, корп. 1, 119526, г. Москва, Россия

Проведено экспериментальное исследование проявления эффекта Кайзера при непропорциональном трехосном циклическом сжатии песчаника с последовательным вращением эллипсоида заданных напряжений на угол 90° . Программа нагружения состояла из трех пар циклов, в каждой из которых максимальное по модулю напряжение второго цикла превышало напряжение первого на 20 МПа при фиксированном боковом подпоре. Циклическое нагружение песчаника осуществлялось в трех ортогональных направлениях, по два цикла в каждом из направлений. Установлено, что эффект Кайзера возникает только при повторном нагружении в фиксированном направлении, активизация акустической эмиссии при смене направления активной нагрузки не зависит от ранее достигнутого уровня приложенного напряжения. Это указывают на ориентационную природу эффекта Кайзера, согласно которому материал “запоминает” свою последнюю внутреннюю поврежденную структуру.

Эффект Кайзера, акустическая эмиссия, истинное трехосное нагружение, вращение эллипсоида заданных напряжений, эффект деформационной памяти, испытательная система

DOI: 10.15372/FTPRPI20200305

В середине XX в. Й. Кайзер в экспериментах по циклическому деформированию горных пород обнаружил эффект памяти — отсутствие импульсов акустической эмиссии в материале при циклическом нагружении до тех пор, пока не будет достигнут максимальный уровень нагрузки предыдущего цикла [1]. Достижение этого уровня сопровождается скачкообразным ростом активности акустической эмиссии.

В настоящее время проведено большое количество исследований, направленных на изучение условий проявления эффекта Кайзера в породах различного генезиса и при разных условиях нагружения [2–12]. Одно из важных практических направлений использования этого эффекта — разработка методов контроля напряженно-деформированного состояния массива, в том числе в искусственных анизотропных материалах [4, 13–22].

Экспериментальные исследования деформационного поведения горных пород при циклическом одноосном сжатии с боковым подпором по схеме Кармана показали, что резкий скачок активности акустической эмиссии во втором и последующих циклах отмечается при достижении не максимального уровня приложенного осевого напряжения в предыдущем цикле, а уровня максимального дифференциального напряжения $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$ (σ_1, σ_3 — максимальное и минимальное главные напряжения) [23]. Установлено, что дифференциальное напряжение проявления эффекта Кайзера в следующем цикле зависит от уровня бокового давления:

$$\sigma_1^{II*} - (1+k)\sigma_3^{II} = \sigma_1^I - (1+k)\sigma_3^I, \quad (1)$$

где k — безразмерный коэффициент, зависящий от типа породы [4, 24]; σ_1^{II*} — максимальное главное напряжение, при котором наблюдается скачок акустической эмиссии во втором цикле; σ_3^{II} — боковой подпор во втором цикле; σ_1^I — максимальное главное напряжение, достигнутое в первом цикле; σ_3^I — боковой подпор в первом цикле.

В [5, 8] для нескольких типов пород показана линейная зависимость коэффициента k от модуля Юнга и скорости продольных волн. В [8] описана аналогия между соотношением (1) и критерием Кулона–Мора, что позволило выявить экспоненциальную зависимость коэффициента k от угла внутреннего трения породы.

Изучение влияния вращения эллипсоида заданных напряжений на проявление эффекта Кайзера проводилось разными научными коллективами в экспериментах на одноосное сжатие и косвенное растяжение горных пород отдельно для каждого типа нагружения и с их чередованием [4, 25–27]. Вращение эллипсоида заданных напряжений осуществлялось поворотом призматического образца после каждого цикла относительно оси заданной нагрузки или вырезанием образцов различной геометрии под разным углом из предварительно однократно нагруженной плиты [26, 28–32]. Установлено, что эффект Кайзера при одноосном нагружении горных пород наблюдается отчетливо в тех случаях, когда направление максимального сжимающего напряжения во втором цикле отличается от направления первого цикла в пределах $\pm 10^\circ$. При вращении эллипсоида заданных напряжений на 90° эффект не отмечается вне зависимости от уровня нагрузки и типа породы. Это значит, что эффект Кайзера — эффект не только памяти уровня максимальных напряжений, но и памяти состояния и ориентации ансамбля дефектов и трещин. Подтверждением служат результаты экспериментов по последовательному гидростатическому и одноосному сжатию образцов туфа и гранита, показывающие, что эффект Кайзера в этом случае не проявляется [33, 34]. Действительно, гидростатическое сжатие приводит к частичному смыканию берегов имеющих микротрещин, часть из ориентированных субпараллельно направлению сжатия при последующем одноосном сжатии начинает расти сразу после приложения нагрузки.

В естественных условиях залегания горные породы находятся в трехосном напряженно-деформированном состоянии, которое может меняться при вариациях регионального геодинамического режима или антропогенного воздействия, вызванного добычей полезных ископаемых. Такое изменение напряженно-деформированного состояния будет сопровождаться вращением эллипсоида заданных напряжений, т. е. изменением ориентации главных напряжений, и приведет к изменению характера накопления повреждений. Вопрос, будет ли порода “помнить” предыдущее напряженно-деформированное состояние после переориентировки приложенных напряжений в условиях многоосной нагрузки, остается открытым и актуальным из-за развития современных методов оценки состояния массива горных пород в районах добычи твердых и жидких полезных ископаемых.

Цель настоящей работы — исследование эффекта Кайзера при циклическом трехосном непропорциональном нагружении образцов песчаника в условиях последовательного изменения направления активного сжатия после каждой пары циклов.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования эффекта Кайзера при трехосных циклических нагрузках создана серия кубических образцов песчаника Верхнекамского (Березниковско-Соликамского) региона с размером ребра 40 мм. Образцы изготовлены на специальном обрабатывающем комплексе ИПМех РАН с высокой точностью, непараллельность граней не превышала 20 мкм. Перед началом испытаний измерялись скорости распространения продольных упругих волн в каждом образце в трех направлениях (перпендикулярно плоскости напластования и в двух произвольных лежащих в ней направлениях). Определено, что образцы слабо анизотропны по упругим свойствам (характерная скорость P -волн по каждому из трех направлений варьируется в пределах 15 %).

Механические испытания проводились на испытательной системе трехосного независимого нагружения (ИСТНН) в лаборатории геомеханики Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН — уникальном испытательном стенде для физического моделирования деформационных процессов в горных породах при сложных горно-геологических условиях [35–38]. С помощью данной системы можно выполнять эксперименты по истинному независимому трехосному сжатию кубических образцов с размером грани 40 и 50 мм по любым траекториям, в частности в виде многозвенных ломанных с регистрацией смещений и сил по трем взаимно ортогональным направлениям. Управление нагружением возможно по силе и смещению. Можно независимо нагружать образец по каждой из трех осей благодаря примененной в конструкции нагружающего узла оригинальной кинематической схеме, которая позволяет нажимным плитам сближаться в трех направлениях, не создавая препятствия друг другу. При установке образцов в рабочую камеру ИСТНН на каждую грань образца крепилась фторопластовая прокладка со смазкой для минимизации трения о нагружающие плиты и обеспечения однородного напряженно-деформированного состояния (рис. 1). Автоматизированный комплекс управления и сбора данных ИСТНН включает LVDT-датчики перемещения и датчики усилия с разрешающей способностью 0.2 мкм и 0.03 МПа соответственно. Измерения необходимых величин проводятся независимо по всем трем осям нагружения с частотой дискретизации 1 Гц.



Рис. 1. Образец испытательной системы трехосного независимого нагружения после остановки испытания на сложное непропорциональное сжатие песчаника

Для непрерывной регистрации акустической эмиссии при нагружении образцов использован аппаратный комплекс Amsy-6 (Vallen, Германия), укомплектованный тремя широкополосными преобразователями 2SMEG-P (Deci, США) с плоской характеристикой в интервале 200–2000 кГц и предусилителями АЕР4Н (Vallen, Германия) с усилением 34 дБ. Датчики крепились на каждой из трех нагружающих плит вакуумной смазкой (рис. 1). В [39–41] показано, что данные об интегральных и дифференциальных характеристиках акустической эмиссии, полученные с преобразователей 2SMEG-P на нагружающих плитах ИСТНН, соответствуют данным, зарегистрированным на боковой грани образца. Это обстоятельство открывает новые перспективы для исследования механизмов разрушения горных пород на ИСТНН при произвольных траекториях трехосного нагружения в виде многозвенных ломаных на основе анализа данных акустической эмиссии. Для выделения одиночных импульсов на фоне шумов различной природы применялась регистрация акустической эмиссии с фиксированным порогом отсека по амплитуде в 38.9 дБ. После экспериментов проводилась многопараметрическая фильтрация данных для удаления импульсов, связанных с механическими шумами и электромагнитными наводками.

Программа циклического нагружения песчаника предполагала всестороннее сжатие до напряжения 10 МПа и последующую реализацию трех пар циклов “активное нагружение–разгрузка”. В первом цикле выполнялось активное сжатие по оси X до напряжения $\sigma_{xx} = 60$ МПа с последующей разгрузкой до $\sigma_{xx} = 10$ МПа при удерживании напряжений постоянными по двум другим осям $\sigma_{yy} = \sigma_{zz} = 10$ МПа (рис. 2). Во втором цикле нагрузка осуществлялась в этом же направлении до $\sigma_{xx} = 80$ МПа для проверки выполнения эффекта Кайзера с последующей разгрузкой до 10 МПа. Далее, такая же пара циклов следовала при активном сжатии по оси Y с контролем постоянства напряжений в двух других направлениях, затем — в направлении Z . Скорость активного нагружения и разгрузки в каждом из шести циклов постоянна и равна 31 кПа/с. Общая длительность испытания одного образца составила более 6 ч. При непропорциональном трехосном сжатии образца песчаника дважды изменялись ориентации главных напряжений, т. е. вращались эллипсоиды заданных напряжений: с $\sigma_1 = \sigma_{xx} > \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{yy} = \sigma_{zz}$ на $\sigma_1 = \sigma_{yy} > \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{xx} = \sigma_{zz}$, с $\sigma_1 = \sigma_{yy} > \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{xx} = \sigma_{zz}$ на $\sigma_1 = \sigma_{zz} > \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{xx} = \sigma_{yy}$.

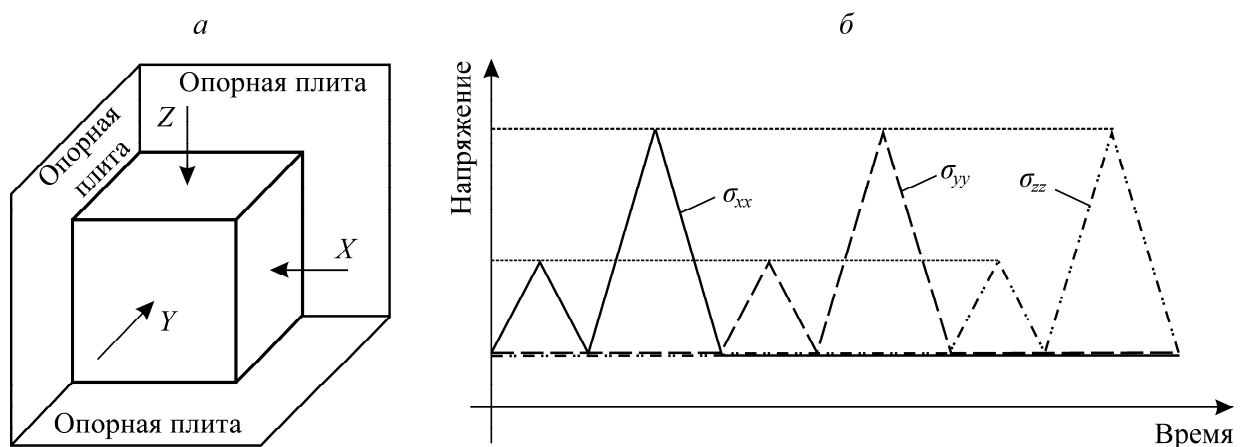


Рис. 2. Схема (а) и программа (б) нагружения песчаника

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены диаграммы деформирования одного из образцов песчаника в каждом из трех пар циклов нагружения. Всего испытано четыре образца. Результаты экспериментов схожи: для каждого цикла проявляется деформационный эффект памяти, заключающийся в скачкообразном изменении угла наклона кривой “напряжение – деформация” во втором цикле при достижении наибольшего напряжения первого цикла. Для сравнения деформационных характеристик в каждом из трех направлений определены касательный модуль деформации на этапе активного нагружения и модуль упругости на этапе разгрузки для обоих циклов (таблица).

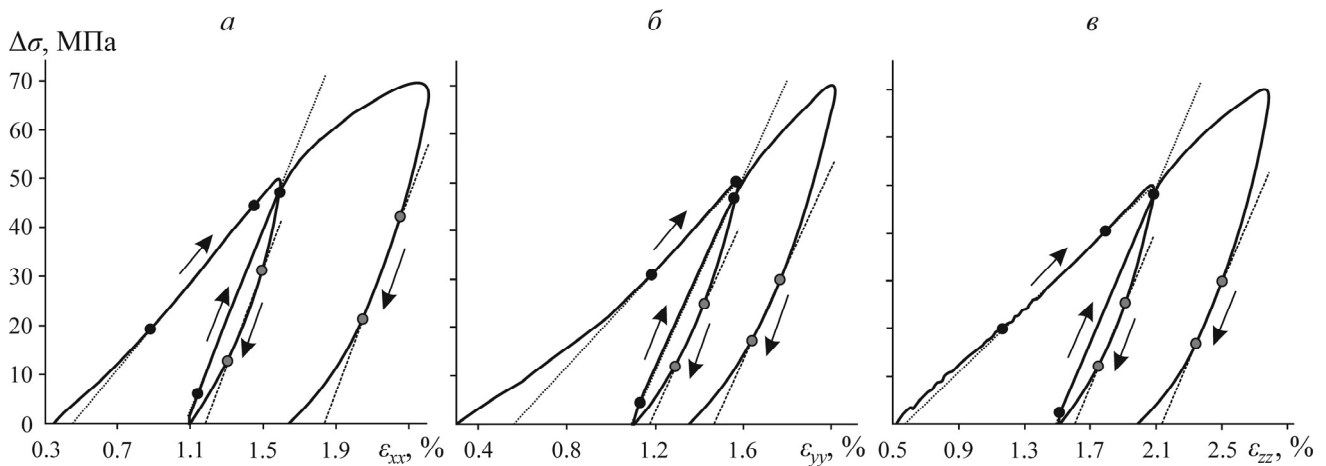


Рис. 3. Кривые деформирования для двух циклов нагружения в направлениях X (а), Y (б) и Z (в) (пунктирные линии — линейная аппроксимация, точки — границы интервалов, для которых оценивались касательные модули)

В первых циклах нагружения в каждом из направлений (циклы 1, 3, 5) наблюдается вариация модуля деформации, вызванная исходной неоднородностью песчаника и наличием вторичных разноориентированных локальных трещиноподобных дефектов, накопленных в предыдущих циклах. Касательные модули деформации, определенные во вторых циклах, близки модулям упругости, установленным на этапе разгрузки в первых циклах по каждому направлению. Для второй и третьей пары циклов отмечается снижение относительно первого цикла модуля упругости из второго цикла.

Деформационные модули, определенные на каждом цикле активного сжатия и разгрузки, ГПа

Направление активного сжатия	Номер цикла	Модуль деформации	Модуль упругости
X	1	4.48	10.04
X	2	9.12	10.04
Y	3	4.94	10.04
Y	4	10.03	9.95
Z	5	3.29	8.18
Z	6	8.09	8.04

Для анализа активности акустической эмиссии, зарегистрированной при циклическом трехосном сжатии песчаника, в скользящем временном окне проводилось осреднение длительностью 1 с данных о количестве зарегистрированных импульсов акустической эмиссии каж-

дым из трех датчиков. На рис. 4 показано совмещение программы нагружения и среднего суммарного счета акустической эмиссии. Видно, что предварительное гидростатическое сжатие образца сопровождается квазилинейным ростом количества зарегистрированных импульсов акустической эмиссии, который замедляется при начале активного сжатия в направлении X с сохранением бокового поджатия по Y и Z . Следующая активизация акустической эмиссии происходит при приложенном напряжении $\sigma_{xx} = 40.7$ МПа и связана с началом активного роста поврежденности. Во втором цикле нагружения активизация акустической эмиссии возникает при напряжении $\sigma_{xx} = 60.7$ МПа, близком к максимальному напряжению предыдущего цикла. Наблюдается четко выраженное проявление эффекта Кайзера для этой пары циклов.

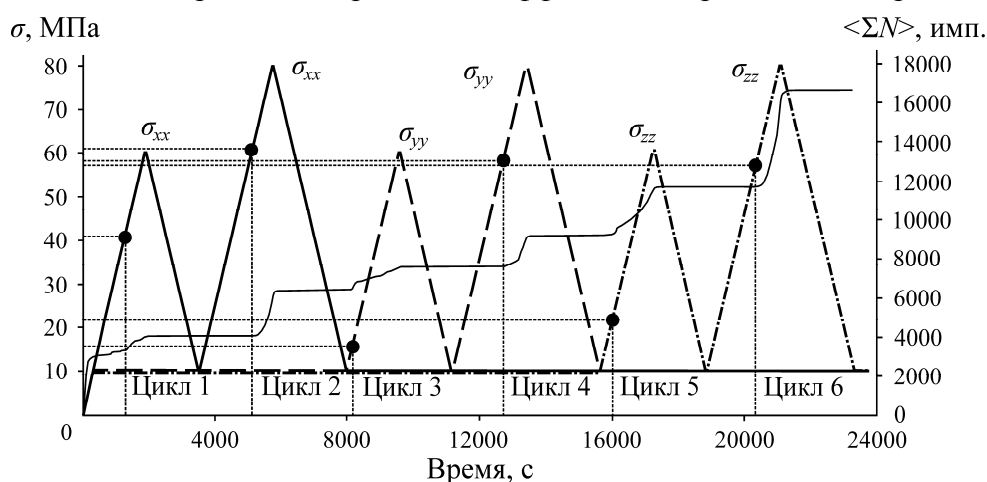


Рис. 4. Программа нагружения песчаника и средний суммарный счет акустической эмиссии (точки — моменты активации акустической эмиссии)

Аналогичная ситуация происходит для второй и третьей пары циклов. Напряжение активации акустической эмиссии постепенно уменьшается и становится ниже 60 МПа, что связано с последовательным развитием поврежденности песчаника, т. е. появлением внутренней поврежденной структуры [42]. В отличие от первого цикла, в третьем (первый цикл нагружения по направлению Y) и пятом (первый цикл нагружения по направлению Z) активизация акустической эмиссии наступает при меньшем уровне приложенного напряжения: в третьем цикле при достижении $\sigma_{yy} = 15.7$ МПа, в пятом — при $\sigma_{zz} = 21.5$ МПа.

Полученные результаты демонстрируют отсутствие “памяти” материала при смене направления главного напряжения (вращении эллипсоида заданных напряжений) и наличие “памяти” при повторном деформировании материала в заданном направлении. Это доказывает, что эффект Кайзера — ориентационный эффект памяти состояния ансамбля трещиноподобных дефектов относительно направления действия максимального сжимающего напряжения. В рассматриваемом случае в каждой паре циклов нагружения происходит активизация существующих и формирование новых дефектов и трещин, ориентированных субпараллельно направлению максимального по модулю сжимающего напряжения σ_1 . При повторном нагружении без изменения ориентации эллипсоида заданных напряжений вторичная активизация акустической эмиссии определяется локальным напряженно-деформированным состоянием в окрестности этих трещин. При смене направления действия σ_1 на 90° в песчанике создаются новые системы трещин ортогонально имеющимся.

ВЫВОДЫ

Экспериментально исследованы особенности проявления эффекта Кайзера при циклическом непропорциональном трехосном нагружении образцов песчаника Верхнекамского региона. Опыты выполнялись на испытательной системе трехосного независимого нагружения с непрерывной записью акустической эмиссии. Программа нагружения песчаника включала по два цикла одноосного сжатия с боковым подпором последовательно в каждом из трех ортогональных направлений. Амплитуда вторых циклов в каждом случае превышала амплитуду первого цикла на 20 МПа. Активизация акустической эмиссии при уровне приложенного напряжения, соответствующем максимальному напряжению предыдущего цикла, наблюдается только в случае, когда повторное нагружение осуществляется без изменения ориентации максимального главного напряжения (вращения эллипсоида заданных напряжений). Полученные закономерности расширяют имеющиеся знания об условиях проявления эффекта Кайзера при трехосных нагрузках со сменой траектории деформирования и доказывают, что это ориентационный эффект “памяти” внутренней поврежденной структуры материала (состояния ансамбля трещиноподобных дефектов, ориентированных относительно ранее действующей нагрузки).

Авторы благодарят академика РАН А. А. Баряха (ПФИЦ УрО РАН, г. Пермь) за активное участие в обсуждении плана работ и полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kaiser J.** An investigation into the occurrence of noises in tensile tests or a study of acoustic phenomena in tensile tests, 1950, Ph.D. Thesis, Tech. Hosch. Munchen, Munich, Germany.
2. **Holcomb D. J.** Observation of the Kaiser effect under multiaxial stress states: implications for its use in determining in situ stress, *Geoph. Res. Letts*, 1993, Vol. 20, No. 19. — P. 2119–2122.
3. **Li C. and Nordlund E.** Experimental verification of the Kaiser effect in rocks, *J. Rock Mech. and Rock Eng.*, 1993, Vol. 26, No. 4. — P. 333–351.
4. **Lavrov A. V.** The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques, *J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2003, Vol. 40. — P. 151–171.
5. **Vervoort A. and Govaerts A.** Kaiser effect in triaxial tests of limestone samples, *In-situ rock stress*, Taylor and Francis Group, London, 2006. — P. 143–149.
6. **Tuncay E. and Ulusay R.** Relation between Kaiser effect levels and pre-stresses applied in the laboratory, *J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2008, Vol. 45, No. 4. — P. 524–537.
7. **Tuncay E. and Obara Y.** Comparison of stresses obtained from acoustic emission and compact conical-ended borehole overcoring techniques and an evaluation of the Kaiser effect level, *Bulletin of Eng. Geol. and the Env.*, 2012, Vol. 71, No. 2. — P. 367–377.
8. **Yu R., Tian Y., and Wang X.** Relation between stresses obtained from Kaiser effect under uniaxial compression and hydraulic fracturing, *J. Rock Mech. and Rock Eng.*, 2015, Vol. 48, Issue 1. — P. 397–401.
9. **Zhang Y., Chen Y., Yu R., Hu L., and Irfan M.** Effect of loading rate on the felicity effect of three rock types, *J. Rock Mech. and Rock Eng.*, 2017, Vol. 50, No. 6. — P. 1673–1681.
10. **Meng Q., Chen Y., Zhang M., Han L., Pu H., and 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. — P. 1–18.
11. **Gajst H., Shalev E., Weinberger R., Marco Sh., Zh W., and Lyakhovsky V.** Relating strain localization and Kaiser effect to yield surface evolution in brittle rocks, *Int. J. Geoph.*, 2020, Vol. 221, No. 3. — P. 2091–2103.

12. Шкуратник В. Л., Филимонов Ю. Л., Кучурин С. В. Особенности эффекта Кайзера в образцах угля на различных стадиях трехосного осесимметричного деформирования // ФТПРПИ. — 2007. — № 1. — С. 3–10.
13. Kanagawa T., Hayashi M., and Nakasa N. Estimation of spatial geostress components in rock samples using the Kaiser effect of acoustic emission, Proc. Jpn. Soc. Civil Eng., 1977, Vol. 285. — P. 63–75.
14. Villaescusa E., Seto M., and Baird G. Stress measurements from oriented core, J. Rock Mech. and Min. Sci., 2002, Vol. 39, No. 5. — P. 603–615.
15. Zang A. and Stephansson O. Stress field of the earth's crust, Springer, 2010. — 322 p.
16. Lehtonen A., Cosgrove J. W., Hudson J. A., and Johansson E. An examination of in situ rock stress estimation using the Kaiser effect, J. Eng. Geol., 2012, Vol. 124. — P. 24–37.
17. Heimisson E. R., Einarsson P., Sigmundsson F., and Brandsdóttir B. Kilometer-scale Kaiser effect identified in Krafla volcano, Iceland, Geoph. Res. Let., 2015, Vol. 42. — P. 7958–7965.
18. Рассказов М. И., Терешкин А. А., Цой Д. И. Оценка напряженного состояния массива месторождения “Пионер” на основе акустико-эмиссионного эффекта памяти горных пород // Проблемы природопользования. — 2019. — № 2 (21). — С. 62–67.
19. Белютюков Н. Л. Особенности использования эффекта Кайзера для оценки напряженного состояния массива горных пород // Горн. эхо. — 2019. — Т. 76. — № 3. — С. 24–31.
20. Шкуратник В. Л., Николенко П. В. Об использовании эффекта Кайзера в эпоксидной смоле с кварцевым наполнителем для оценки напряжений в массиве горных пород // ГИАБ. — 2012. — № S1. — С. 97–104.
21. Николенко П. В., Шкуратник В. Л., Чепур М. Д., Кошелев А. Е. Использование эффекта Кайзера в композиционных материалах для контроля напряженного массива горных пород // ФТПРПИ. — 2018. — № 1. — P. 25–31.
22. Shkuratnik V. L. and Nikolenko P. V. Spectral characteristics of acoustic emission in carbon fiber-reinforced composite materials subjected to cyclic loading, Adv. in Material Sci. and Eng., 2018, ID 1962679. — P. 1–8.
23. Проскуряков Н. М., Карташов Ю. М., Ильинов М. Д. Эффекты памяти горных пород при различных видах их нагружения // Эффекты памяти в горных породах. — М.: МГИ, 1986. — С. 22–37.
24. Filimonov Y. L., Lavrov A. V., Shafarenko Y. M., and Shkuratnik V. L. Memory effects in rock salt under triaxial stress state and their use for stress measurement in a rock mass, J. Rock Mech. and Rock Eng., 2001, Vol. 34, No. 4. — P. 275–291.
25. Lavrov A., Vervoort A., Wevers M., and Napier J. A. L. Experimental and numerical study of the Kaiser effect in cyclic Brazilian tests with disk rotation, J. Rock Mech. and Min. Sci., 2002, Vol. 39, No. 3. — P. 287–302.
26. Chen Z. H., Tham L. G., and Xie H. Experimental and numerical study of the directional dependency of the Kaiser effect in granite, J. Rock Mech. and Min. Sci., 2007, Vol. 44, No. 7. — P. 1053–1061.
27. Fu X., Xie Q., and Liang L. Comparison of the Kaiser effect in marble under tensile stresses between the Brazilian and bending tests, Bulletin of Eng. Geol. and the Env., 2014, Vol. 74, No. 2. — P. 535–543.
28. Michihiro K., Hata K., Yoshioka H., and Fujiwara T. Determination of the initial stresses on rock mass using acoustic emission method, J. Acoustic Emission, 1991/1992, Vol. 10, No. 1/2. — P. 63–76.
29. Stuart C., Meredith P., Murrell S., and Van Munster J. Anisotropic crack damage and stress-memory effects in rocks under triaxial loading, J. Rock Mech. and Min. Sci. and Geomech. Abs., 1993, Vol. 30, No. 7. — P. 937–941.
30. Lavrov A., Vervoort A., and Wevers M. Anisotropic damage formation in brittle rock: experimental study by means of acoustic emission and Kaiser effect, Proc. of the Sixth Euromech-Mecamat Conf. on Non-Linear Mech. of Anisotropic Materials, University of Liege, 2002. — P. 385–392.

31. **Holcomb D. J. and Costin L. S.** Detecting damage surfaces in brittle materials using acoustic emissions, *J. App. Mech.*, 1986, Vol. 53, No. 3. — P. 536–544.
32. **Li C.** A theory for the Kaiser effect and its potential applications, *Proc. 6th Conf. AE/MA in Geol. Struct. and Materials, Clausthal-Zellerfeld, Trans Tech Publications*, 1998. — P. 171–185.
33. **Holcomb D. J. and Martin R. J.** Detecting peak stress history using acoustic emissions, *Proc. 26th U. S. Symp. on Rock Mech., Rotterdam, A. A. Balkema*, 1985, Vol. 2. — P. 715–722.
34. **Panasiyan I. I., Kolegov S. A., and Morgunov A. N.** Stress memory studies in rock by means of acoustic emission, *Proc. Int. Conf. Mech. Jointed and Faulted Rock (MJFR), Rotterdam, A. A. Balkema*, 1990. — P. 435–439.
35. **Karev V. I., Kovalenko Yu. F., and Ustinov K. B.** Modeling deformation and failure of anisotropic rocks nearby a horizontal well, *J. Min. Sci.*, 2017, Vol. 53, No. 3. — P. 425–433.
36. **Karev V. I., Klimov D. M., Kovalenko Yu. F., and Ustinov K. B.** Fracture of sedimentary rocks under a complex triaxial stress state, *Mech. of Solids*, 2016, Vol. 51, No. 5. — P. 522–526.
37. **Klimov D. M., Karev V. I., and Kovalenko Yu. F.** Experimental study of the influence of a triaxial stress state with unequal components on rock permeability, *Mech. of Solids*, 2015, Vol. 50, No. 6. — P. 633–640.
38. **Karev V. I., Klimov D. M., Kovalenko Yu. F., and Ustinov K. B.** Mechanical-mathematical and experimental modeling of well stability in anisotropic media, *Mech. of Solids*, 2013, Vol. 48, No. 4. — P. 357–363.
39. **Шевцов Н. И., Зайцев А. В., Пантелеев И. А.** Исследование связи напряженно-деформированного состояния горных пород с потоком акустической эмиссии на испытательной системе трехосного независимого нагружения // *Процессы в геосредах*. — 2019. — № 1. — С. 129–136.
40. **Пантелеев И. А., Коваленко Ю. Ф., Сидорин Ю. В., Зайцев А. В., Карев В. И., Устинов К. Б., Шевцов Н. И.** Эволюция поврежденности при сложном неравнокомпонентном сжатии песчаника по данным акустической эмиссии // *Физ. мезомеханика*. — 2019. — Т. 22. — № 4. — С. 56–63.
41. **Shevtsov N., Zaitsev A., and Panteleev I.** Deformation and destruction of rocks on the true triaxial loading system with continuous acoustic emission registration, *Phys. and Mathem. Modeling of Earth and Env. Proc.*, 2019. — P. 424–432.
42. **Li Dexing, Wang Enyuan, Kong Xiangguo, Jia Haishan, Wang Dongming, and Ali Muhammad.** Damage precursor of construction rocks under uniaxial cyclic loading tests analyzed by acoustic emission, *Construction and Building Materials*, 2019, Vol. 206. — P. 169–178.

Поступила в редакцию 22/V 2020

После доработки 01/VI 2020

Принята к публикации 29/V 2020