

КАЧЕСТВО ПРОЯВЛЕНИЯ АКУСТИКО- ЭМИССИОННОГО ЭФФЕКТА КАЙЗЕРА В АНТРАЦИТЕ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ЕГО СТОЙКОСТИ К КРИОТЕРМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

В.Л. Шкуратник¹, П.В. Николенко¹, П.С. Ануфренкова¹

¹ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: ftkp@mail.ru

Аннотация: Приведено описание экспериментальных исследований проявлений акустико-эмиссионного эффекта памяти (эффекта Кайзера) в образцах антрацита, подвергнутых различному количеству циклов замораживания-оттаивания. Всего исследовано 6 групп относительно однородных образцов, одна из которых (нулевая) являлась контрольной и не подвергалась криотермическим воздействиям, а число таких воздействий в каждой из остальных групп равнялось номеру группы. После криотермического воздействия все образцы подвергались двум циклам механического нагружения с максимальным уровнем напряжения в них 10 и 14 МПа соответственно. В процессе этого нагружения измерялась активность акустической эмиссии (ААЭ) и оценивались показатели, характеризующие качество проявления эффекта Кайзера во втором цикле. Это показатель сохранности памяти FR, равный отношению напряжения, при котором возобновляется эмиссия во втором цикле к максимальному напряжению первого цикла, и показатель Δ , представляющий собой отношение осредненных значений ААЭ до и после момента проявления эффекта Кайзера. Получены и проанализированы количественные значения показателей FR и Δ в функции от количества циклов замораживания и оттаивания антрацита. Показано, что с увеличением криогенной дезинтеграции угольного материала первый из указанных показателей падает, а второй возрастает, причем максимальные изменения FR и Δ , и соответственно, динамика поврежденности антрацита имеют место в первых циклах криотермического воздействия.

Ключевые слова: антрацит, циклическое замораживание и оттаивание, циклическое механическое нагружение, криогенная дезинтеграция, активность акустической эмиссии, эффект Кайзера.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 18-05-70002.

Для цитирования: Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Ануфренкова П.С. Качество проявления акустико-эмиссионного эффекта Кайзера в антраците как показатель его стойкости к криотермическим воздействиям // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 7. – С. 5–12. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-5-12.

Kaiser effect performance in anthracite as an indicator of the rock resistance to cryo-thermal treatment

V.L. Shkuratnik¹, P.V. Nikolenko¹, P.S. Anufrenkova¹

¹ National University of Science and Technology «MISS», Moscow, Russia, e-mail: e-mail: ftkp@mail.ru

Abstract: The article presents the experimental studies into the stress memory in acoustic emission (Kaiser effect) in anthracite samples subjected to different number of freeze–thaw cycles. All in all, 6 groups of relatively uniform samples were tested; one group (0) was a reference set unexposed to cryo-thermal effects; the number of a group conformed with the number of treatment cycles. After the cryo-thermal action, all samples were subjected by two cycles of mechanical loading up to maximum stresses of 10 and 14 MPa, respectively. During a loading cycle, acoustic emission activity of a sample was measured, and the Kaiser effect in the second cycle of loading was assessed by two characteristics. These characteristics were the factor of retention FR of the stress memory, or the ratio of the stress of emission initiation in the second cycle to the maximal stress of the first cycle, and the index Δ , or the ratio of the averaged acoustic emission activities before and after the moment of the Kaiser effect. The values of FR and Δ are obtained and analyzed as functions of the number of anthracite freeze–thaw cycles. The value of FR drops but Δ grows with increasing cryogenic disintegration of coal. The maximal change in FR and Δ , and, accordingly, the highest dynamics of damage in anthracite takes place in the first cycles of cryo-thermal treatment.

Key words: anthracite, cyclic freezing–thawing, cyclic mechanical loading, cryogenic disintegration, acoustic emission activity, Kaiser effect.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Grant No. 18-05-70002.

For citation: Shkuratnik V. L., Nikolenko P. V., Anufrenkova P. S. Kaiser effect performance in anthracite as an indicator of the rock resistance to cryo-thermal treatment. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(7):5-12. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-5-12.

Введение

Процессы добычи, переработки и хранения углей часто сопровождаются воздействиями различных факторов криогенного выветривания, приводящими к их дезинтеграции, активизации процессов окисления и, как следствие, повышению рисков самовозгорания и ухудшению ряда потребительских свойств, например, теплотворной способности [1, 2]. С учетом особенностей состава, структуры и генезиса углей, их разной и меняющейся в широких пределах степени влажности, а также сложной разномасштабной и изменяющей свои параметры пористости, среди факторов криогенного выветривания особую роль играют циклические с переходом через 0 °С температурные воздействия [3, 4].

Для оценки стойкости углей к указанным воздействиям и возникающей под их влиянием поврежденности наиболее перспективны акустические методы. Это

связано с тем, что на акустические свойства геосреды оказывают существенно большее влияние возникающие в ней структурные изменения и дефекты, чем ее исходный минеральный и химический состав. Кроме того, активные акустические методы, как никакие другие, обладают возможностью управления чувствительностью при выявлении разномасштабных структурных неоднородностей за счет применения различных типов и диапазонов частот упругих волн, схем и режимов измерений, а также использования разнообразных видов сигналов, их кинематических и динамических информативных параметров [5–7].

Накопленный опыт свидетельствует о том, что при изучении свойств и состояния угольного материала возможности активных акустических измерений могут быть серьезно расширены, если их сочетать с возможностями метода акустической эмиссии (АЭ) [8]. В част-

ности, один из вариантов такого метода — метод термостимулированной АЭ (метод ТАЭ), предполагает использование для оценки дезинтеграции углей под влиянием их циклического замораживания и оттаивания параметров АЭ, возникающей в результате воздействия на объекты исследования тестового термического воздействия [9, 10].

Основными достоинствами метода ТАЭ являются высокая информативность и возможность количественной оценки склонности угля к криотермической деформации, а также ограниченные требования к размерам и форме используемых для исследований образцов. В то же время для метода характерна высокая сложность обработки акустико-эмиссионной информации и большая длительность проведения соответствующих измерений.

В связи с этим в рамках настоящей работы рассматриваются и обсуждаются результаты исследования динамики криотермической поврежденности образцов антрацита на основе анализа качества проявления в них акустико-эмиссионного эффекта Кайзера (ЭК) [11]. Для реализации этого эффекта необходимо циклическое механическое нагружение образцов, к форме, размерам, а также торцевым поверхностям которых предъявляются довольно жесткие требования. Однако эта сложность компенсируется относительной простотой получения и обработки соответствующей акустико-эмиссионной информации.

Постановка экспериментов

Объектом исследований являлась выборка из 18 образцов антрацита Восточного Донбасса. Образцы в форме цилиндров высотой 80 мм и диаметром 40 мм были получены с использованием колонкового алмазного инструмента из монолитных блоков, при этом параллельность их торцевых поверхностей

обеспечивалась методом сухого шлифования. Предварительно проведенное цензурирование ультразвуковым время-импульсным методом на частоте $f = 200$ кГц позволило гарантировать относительную однородность образцов, так как скорости распространения продольных упругих волн в них отличались не более, чем на 3%. Усредненные значения прочности и плотности исследуемых образцов составили $\sigma_c = 18$ МПа и $\rho = 1500$ кг/м³ соответственно.

Выборка была разделена на 6 равных групп по 3 образца. Образцы нулевой группы являлись контрольными и не подвергались каким-либо криотермическим воздействиям. Образцы, входящие в остальные 5 групп, подвергались циклам замораживания–оттаивания в пределах от минус 30 до плюс 30 °С при влажности 80%. Для этого они помещались в программируемую климатическую камеру «КТНУ-150», которая обеспечивала точность поддержания температуры $\pm 0,5$ °С и влажности до 3%. Длительность каждого цикла замораживания–оттаивания составляла 1 ч, а количество таких циклов в каждой группе образцов равнялось номеру группы. Таким образом, минимальному количеству циклов (одному) подвергались образцы I группы, а максимальному количеству (пяти) — образцы V группы.

Каждый из образцов, испытавших соответствующее число циклов замораживания–оттаивания, подвергался двум циклам одноосного механического нагружения с постоянной скоростью возрастания и снижения напряжения $\dot{\sigma}_1 = const$. При этом максимальный уровень напряжения в первом цикле составлял $\sigma_{1max}^1 = 10$ МПа, а во втором — $\sigma_{1max}^2 = 14$ МПа, то есть выполнялось обязательное для проявления ЭК условие $\sigma_{1max}^1 < \sigma_{1max}^2$. Одноосное нагружение образцов осуществлялось с помощью пресса EU-100 через стальной защитный цилиндри-

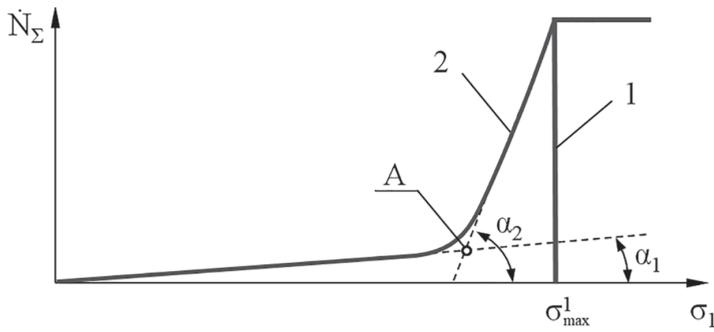


Рис. 1. Модельные зависимости активности АЭ во втором цикле нагружения в функции от уровня максимального напряжения в первом цикле $\sigma_{1\max}^1$: 1 — при идеальном проявлении ЭК; 2 — при реальном проявлении ЭК

Fig. 1. Model dependences of AE activity in the second loading cycle and maximal stress in the first loading cycle $\sigma_{1\max}^1$: 1 — ideal performance of Kaiser effect; 2 — actual performance of Kaiser effect

ческий корпус, в котором размещался приемный акустический преобразователь, подключенный к акустико-эмиссионной измерительной системе A-line-32D. Таким образом, результатом эксперимента на каждом конкретном образце являлась информация о синхронном изменении двух информативных параметров σ_1 и активности акустической эмиссии N_Σ .

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Как известно, акустико-эмиссионный эффект Кайзера проявляется при циклическом нагружении с возрастающим от цикла к циклу уровнем максимального напряжения. Он заключается в невозпроизводимости параметров АЭ в цикле $n + 1$ до момента, пока уровень напряжения σ_1 в этом цикле не превысит максимальный уровень напряжения в цикле n . Как только такое превышение будет иметь место, параметры АЭ скачкообразно восстанавливаются до уровня, имевшего место в цикле n [11].

Интерес к исследованиям ЭК в горных породах традиционно был связан с тем, что по факту он является проявлением в них памяти об испытанном ранее напряженно-деформированном состоянии [12, 13]. В то же время многочисленные

исследования свидетельствуют о том, что качество проявления ЭК существенно зависит от степени и развития поврежденности горной породы, которые снижают предел ее прочности [14, 15]. Рост трещин, возникающих в образце под влиянием механической нагрузки, и по сути, ответственных за формирование памяти, становится неустойчивым, прежде всего, из-за их взаимодействия между собой. В результате нарушается соответствие между уровнем напряжений и параметрами трещин, рост которых начинается раньше «запомненного» максимального напряжения предшествующего цикла, что и приводит к искажению ЭК. Кроме того, указанные искажения обусловлены появлением акустических шумов из-за взаимодействия микротрещин, трение которых создает шумовую составляющую АЭ при напряжениях, меньших максимального уровня предшествующего цикла нагружения. Отмеченное иллюстрируется представленными на рис. 1 упрощенными (модельными) зависимостями активности АЭ N_Σ во втором цикле одноосного механического нагружения образца в функции от уровня максимального напряжения в первом цикле $\sigma_{1\max}^1$.

Как видно из рис. 1, при идеальном проявлении ЭК возрастание параметра N_Σ начинается точно в момент, когда

$\sigma_1^2 = \sigma_{1\max}^1$. Реально рост \dot{N}_Σ начинается при $\sigma_{1\max}^2 < \sigma_{1\max}^1$. Один из вариантов оценки значения σ_1^2 предполагает нахождение точки А, где пересекаются пунктирные составляющие билинейной регрессии кривой 2. По проекции этой точки на ось X можно найти значение $\sigma_{1\max}^2 = \sigma_1^*$, соответствующее фактическому проявлению ЭК. Количественно ухудшение памяти геоматериала об испытанном ранее максимальном напряжении оценивается показателем сохранности памяти (Felicity ratio) [11].

$$FR = \sigma_1^* / \sigma_{1\max}^1 \quad (1)$$

При идеальной памяти и, соответственно, отсутствии значимой поврежденности и $FR = 1$. С увеличением поврежденности $FR \rightarrow 0$. Реально любой геоматериал в той или иной степени всегда дефектен, и поэтому $FR < 1$. Тем не менее, прослеживая динамику показателя FR , можно судить о динамике поврежденности угля под влиянием криотермических воздействий.

Для оценки шумовой составляющей, также связанной с развитием дефектности геоматериала и ухудшающей каче-

ство проявления ЭК в нем, может быть использовано отношение Δ осредненной активности АЭ при $\sigma_1^2 < \sigma_1^*$ к осредненной активности АЭ при $\sigma_1^2 > \sigma_1^*$. Для количественной оценки величины Δ могут быть использованы углы наклона пунктирных прямых, отражающих билинейную регрессию кривой 2 на рис. 1 [11]

$$\Delta = \alpha_1 / \alpha_2 \quad (2)$$

При идеальном ЭК $\Delta \rightarrow 0$ и увеличивается, когда при $\sigma_1^2 < \sigma_1^*$ происходит активизация взаимодействия трещин и увеличение трения по соответствующим поверхностям раздела в геоматериале.

На рис. 2 в качестве примера приведены зависимости $\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1, t)$ для одного из образцов антрацита I группы при двух циклах его одноосного нагружения с возрастающим уровнем максимального напряжения при переходе от первого ко второму циклу, а в таблице представлены усредненные по трем образцам каждой группы измеренные значения FR и Δ .

Как видно из данных таблицы, антрацит в своем исходном состоянии обладает довольно высоким (близким к

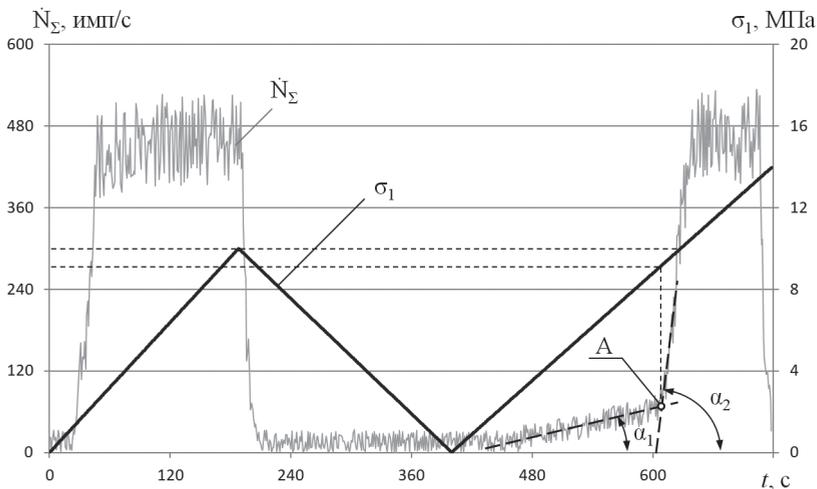


Рис. 2. Изменения во времени активности АЭ образца антрацит. I группы в процессе его двухциклового механического одноосного нагружения

Fig. 2. Time history of AE activity in anthracite samples from group I in two-cycle mechanical uniaxial loading

Усредненные значения параметров FR и Δ для различных групп образцов антрацита
Averaged values of FR and Δ for different groups of anthracite samples

№ группы	0	I	II	III	IV	V
FR	0,97	0,9	0,85	0,81	0,785	0,746
Δ	0,12	0,176	0,226	0,29	0,37	0,46

единице) показателем сохранности памяти. По мере увеличения циклов замораживания–оттаивания показатель FR закономерно уменьшается, что свидетельствует об увеличении поврежденности антрацита. Причем, в наибольшей степени такое увеличение наблюдается после I цикла криотермического воздействия, которое приводит к относительному (по сравнению с нулевым циклом) уменьшению FR более, чем на 7%. Начиная со II и вплоть до V цикла, относительное уменьшение FR составляет примерно от 6 до 4%.

Что касается параметра Δ , то при отсутствии криотермического воздействия он минимален, а по мере увеличения количества циклов замораживания–оттаивания растет, причем в наибольшей степени — после I цикла указанного воздействия (почти на 47%). Затем, при переходе к каждому последующему циклу криотермического воздействия, относительное увеличение параметра Δ находится в пределах от 30 до 25%.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования свидетельствуют о существ-

венном влиянии циклического криотермического воздействия на качество проявления акустико-эмиссионного эффекта Кайзера (ЭК) в образцах антрацита. Показательно, что такое влияние, связанное с дезинтеграцией угольного материала, наиболее сильно проявляется уже при первых циклах замораживания–оттаивания.

Параметры FR и Δ , количественно отражающие качество проявления ЭК, могут быть использованы и для количественной оценки динамики поврежденности антрацита в результате воздействия различной физической природы и, в частности, факторов криогенного выветривания. Очевидно, что рассмотренные подходы к оценке влияния криотермической дезинтеграции антрацитов на основе анализа качества проявления в них эффекта Кайзера могут быть распространены и на другие типы углей. Однако, поскольку последние обладают существенно меньшей, чем антрациты, прочностью, основной нерешенной проблемой здесь остается изготовление образцов нужных размеров без привнесения в них дополнительной поврежденности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эпштейн С.А., Никитина И.М., Агарков К.В., Нестерова В.Г., Минаев В.И. Влияние циклического замораживания-размораживания углей на показатели их качества // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 6. — С. 5–18. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-5-18.
2. Эпштейн С. А., Коссович Е. Л., Гаврилова Д. И., Агарков К. В. Влияние циклического замораживания-размораживания углей на их способность к окислению // Горный журнал. — 2019. — № 7. — С. 71–76. DOI: 10.17580/gzh.2019.07.04.

3. Aoki K., Hibiya K., Yoshida T. Storage of refrigerated liquefied gases in rock caverns: characteristics of rock under very low temperatures // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 1990. Vol. 5. No 4. Pp. 319 – 325.

4. Dwivedi R. D., Soni A. K., Goel R. K., Dube A. K. Fracture toughness of rocks under sub-zero temperature conditions // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2000. Vol. 37. No 8. Pp. 1267 – 1275.

5. Shkuratnik V. L., Nikolenko P. V., Koshelev A. E. Stress dependence of elastic p-wave velocity and amplitude in coal specimens under varied loading conditions // *Journal of Mining Science*. 2016. Vol. 52. No 5. Pp. 873 – 877.

6. Morcote A., Mavko G., Prasad M. Dynamic elastic properties of coal // *Geophysics*. 2010. Vol. 75. No 6. Pp. 227 – 234.

7. Nazarova L. A., Zakharov V. N., Shkuratnik V. L., Nazarov L. A., Protasov M. I., Nikolenko P. V. Use of tomography in stress- strain analysis of coal-rock mass by solving boundary inverse problems // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 191. Pp. 1048 – 1055.

8. Lavrov A. V., Shkuratnik V. L. Deformation- and fracture-induced acoustic emission in rocks // *Acoustical Physics*. 2005. Vol. 51 (Suppl. 1). Pp. S2 – S11.

9. Новиков Е. А., Шкуратник В. Л., Зайцев М. Г., Ошкин Р. О. Исследование изменения свойств и состояния углей в результате криогенного выветривания методом термостимулированной акустической эмиссии // *Криосфера Земли*. – 2018. – Т. 22. – № 4. – С. 76 – 85.

10. 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.

11. Лавров А. В., Шкуратник В. Л., Филимонов Ю. Л. Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – 456 с.

12. Lord A. E., Koerner R. M. Field determination of prestress (existing) stress in soil and rock masses using acoustic emission // *Journal of Acoustic Emission*. 1985. Vol. 4. No 2/3. Pp. 11 – 16.

13. Панасьян Л. Л., Петровский М. А. Об использовании эффекта Кайзера для оценки напряжений в горных породах // *Инженерная геология*. – 1984. – № 2. – С. 114 – 119.

14. Kurita K., Fujii N. Stress memory of crystalline rock in acoustic emission // *Geophysical Research Letters*. 1979. Vol. 6. No 1. Pp. 9 – 12.

15. Li C., Nordlund E. Experimental verification of the Kaiser effect in rocks // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 1993. Vol. 26. No 4. Pp. 333 – 351. **MIAB**

REFERENCES

1. Epshtein S. A., Nikitina I. M., Agarkov K. V., Nesterova V. G., Minaev V. I. Effects of cyclic freezing and thawing on coals quality indices. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(6):5-18. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-5-18.

2. Epshtein S. A., Kossovich E. L., Gavrilova D. I., Agarkov K. V. Effects of cyclic freeze-thawing of coals on their ability to oxidize. *Gornyi Zhurnal*, 2019, no 7, pp. 71 – 76. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.07.04.

3. Aoki K., Hibiya K., Yoshida T. Storage of refrigerated liquefied gases in rock caverns: characteristics of rock under very low temperatures. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 1990. Vol. 5. No 4. Pp. 319 – 325.

4. Dwivedi R. D., Soni A. K., Goel R. K., Dube A. K. Fracture toughness of rocks under sub-zero temperature conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2000. Vol. 37. No 8. Pp. 1267 – 1275.

5. Shkuratnik V.L., Nikolenko P.V., Koshelev A.E. Stress dependence of elastic p-wave velocity and amplitude in coal specimens under varied loading conditions. *Journal of Mining Science*. 2016. Vol. 52. No 5. Pp. 873 – 877.
6. Morcote A., Mavko G., Prasad M. Dynamic elastic properties of coal. *Geophysics*. 2010. Vol. 75. No 6. Pp. 227 – 234.
7. Nazarova L.A., Zakharov V.N., Shkuratnik V.L., Nazarov L.A., Protasov M.I., Nikolenko P.V. Use of tomography in stress- strain analysis of coal-rock mass by solving boundary inverse problems. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 191. Pp. 1048 – 1055.
8. Lavrov A.V., Shkuratnik V.L. Deformation- and fracture-induced acoustic emission in rocks. *Acoustical Physics*. 2005. Vol. 51 (Suppl. 1). Pp. S2 – S11.
9. Novikov E.A., Shkuratnik V.L., Zaytsev M.G., Oshkin R.O. Changes in properties and state of coal exposed to freeze-thaw weathering: Evidence from thermally induced acoustic emission. *Earth's Cryosphere*. 2018, vol. 22, no 4, pp. 68 – 74. [In Russ].
10. 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.
11. Lavrov A.V., Shkuratnik V.L., Filimonov Yu.L. *Akustoemissionnyy effekt pamyati v gornykh porodakh* [Acoustic emission memory effect in rocks], Moscow, Izd-vo MGGU, 2004, 456 p.
12. Lord A.E., Koerner R.M. Field determination of prestress (existing)stress in soil and rock masses using acoustic emission. *Journal of Acoustic Emission*. 1985. Vol. 4. No 2/3. Pp. 11 – 16.
13. Panas'yan L.L., Petrovskiy M.A. On the use of the Kaiser effect for assessing stresses in rocks. *Inzhenernaya geologiya*. 1984, no 2, pp. 114 – 119.
14. Kurita K., Fujii N. Stress memory of crystalline rock in acoustic emission. *Geophysical Research Letters*. 1979. Vol. 6. No 1. Pp. 9 – 12.
15. Li C., Nordlund E. Experimental verification of the Kaiser effect in rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 1993. Vol. 26. No 4. Pp. 333 – 351.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шкуратник Владимир Лазаревич¹ – д-р техн. наук, профессор,
 Николенько Петр Владимирович¹ – канд. техн. наук, доцент,
 e-mail: p.nikolenko@misis.ru,
 Ануфренкова Полина Сергеевна¹ – аспирант,
¹ НИТУ «МИСиС».

Для контактов: Шкуратник В.Л., e-mail: ftkp@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.L. Shkuratnik¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
 P.V. Nikolenko¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
 e-mail: p.nikolenko@misis.ru,
 P.S. Anufrenkova¹, Graduate Student,
¹ National University of Science and Technology «MISIS»,
 119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: V.L. Shkuratnik, e-mail: ftkp@mail.ru.

Получена редакцией 20.03.2020; получена после рецензии 06.05.2020; принята к печати 20.06.2020.
 Received by the editors 20.03.2020; received after the review 06.05.2020; accepted for printing 20.06.2020.