

УДК 622.02:539.2

**ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО ЭФФЕКТА ПАМЯТИ
В КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ
КРИТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД**

В. Л. Шкуратник, П. В. Николенко

*Московский государственный горный университет, E-mail: ftkp@mail.ru,
Ленинский проспект, 6, 119991, г. Москва, Россия*

Экспериментально установлены закономерности формирования и проявления акустико-эмиссионного эффекта памяти в таком композиционном материале, как текстолит. Показаны возможности применения этого материала в качестве обладающего пороговой чувствительностью преобразователя напряжений в сигнал акустической эмиссии. Обоснованы принципы построения и проведены испытания скважинного датчика, использующего указанный преобразователь и обеспечивающего сигнализацию о достижении приращениями напряжений в массиве некоторого наперед заданного критического уровня.

Напряженно-деформированное состояние, массив пород, композиционные материалы, акустическая эмиссия, эффект памяти, датчик-сигнализатор

Объективная оценка устойчивости массива в окрестностях горных выработок невозможна без количественной информации о его напряженно-деформированном состоянии. Получение такой информации чаще всего базируется на анализе различных физических явлений и эффектов, сопровождающих реакцию геосреды на внешнее механическое возмущение [1]. Однако, поскольку указанная реакция существенно зависит от степени поврежденности, однородности, анизотропии горных пород, их тензочувствительности и ряда других факторов, следует признать, что определение абсолютных значений напряжений с требуемой точностью остается пока еще не решенной задачей. В то же время происходящее под влиянием природных и техногенных воздействий разрушение приконтурного массива приводит к перераспределению и, как следствие, приращению напряжений в его не подвергнутых деструкции областях. Сам факт таких приращений, а тем более превышение последними определенных критических значений, может служить прогнозным признаком потери устойчивости соответствующими конструктивными элементами систем разработки.

В настоящей работе рассматриваются принципы построения скважинных датчиков-сигнализаторов критических приращений напряжений, основанных на использовании акустико-эмиссионного эффекта памяти (АЭЭП) в композиционных материалах, размещаемых в ис-

Исследования проведены в рамках федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 гг.” (соглашение № 14.В37.21.0671).

следуемых областях массива. Важным свойством таких датчиков является их пороговая чувствительность, которая проявляется в том, что ниже определенного порога напряжений соответствующий датчик не является источником значимой акустической эмиссии (АЭ), а выше этого порога активность и другие параметры АЭ многократно возрастают.

Как известно, АЭЭП проявляется непосредственно в горных породах [2, 3] и позволяет оценивать напряжения в массиве путем лабораторных тестовых механических испытаний извлеченных из него образцов [4] или путем анализа АЭ в скважине при ее нагружении с помощью прессиометра [5, 6]. При этом подразумевается, что установочному нагружению, значение которого априори неизвестно, образцы подвергаются непосредственно в массиве. Принципиальным отличием рассматриваемого ниже подхода является смена мест проведения установочного и тестового циклов нагружения, первый из которых осуществляется в лабораторных условиях, а второй — непосредственно в массиве. Причем максимальное значение напряжений в установочном цикле нагружения задано заранее. Цель контроля — фиксация момента его достижения напряжениями в массиве при деформировании.

ПОСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ ИХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Объектом исследований является широко используемый в промышленности композиционный материал — текстолит марки ПТК. Имея слоисто-периодическую структуру, он отличается простотой механической обработки, сочетанием стабильных и высоких прочностных и упругих свойств ($\sigma_c \approx 180$ МПа, $E \approx 50$ ГПа) с относительно равномерно распределенной по объему исходной микродефектностью [7]. Это обуславливает потенциальную перспективность применения текстолита в качестве первичного преобразователя датчиков-сигнализаторов критических напряжений в массиве.

Для практической реализации такого применения необходимо исследовать акустико-эмиссионную тензочувствительность текстолита и особенности формирования и проявления в нем соответствующего эффекта памяти.

Все эксперименты проводились на образцах текстолита в виде дисков диаметром 42 мм и толщиной 16 мм, которые подвергались механическому одноосному нагружению вдоль диаметра через стальные пуансоны с рабочей поверхностью, повторяющей геометрию образца. Для указанного нагружения использовался не создающий акустических помех рычажно-механический пресс [8]. Регистрация и анализ всего спектра информативных параметров АЭ, возникающей в текстолите при его нагружении, осуществлялись измерительным комплексом А-Line 32D в диапазоне частот 50–500 кГц.

Как видно из представленной на рис. 1 зависимости активности АЭ \dot{N}_Σ образца от относительной деформации ε , начиная со значений последней более 0.5% текстолит обладает акустико-эмиссионной тензочувствительностью, достаточной для его использования в качестве преобразователя напряжений в сигнал АЭ. Тот факт, что указанная зависимость существенно “изрезана”, а ее аппроксимированный вариант описывается нелинейной зависимостью

$$\dot{N}(\varepsilon) = 43.4e^{1.8\varepsilon} - 75.7, \quad (1)$$

для построения датчика-сигнализатора на основе АЭЭП существенного значения не имеет.

Первая задача, которая решалась в рамках исследования АЭЭП в текстолите, заключалась в определении характерной для него длительности Δt сохранности памяти. Величина Δt представляет собой временной интервал между завершением установочного и началом тестового

циклов нагружения, при котором качество проявления свойства памяти остается еще приемлемым для практического использования. Указанное качество характеризуется, прежде всего, относительной погрешностью воспроизведения АЭЭП:

$$\Delta_m = \frac{|\sigma_m - \sigma_{set}|}{\sigma_{set}}, \quad (2)$$

где σ_m — напряжение, при котором эффект памяти проявляется в тестовом цикле нагружения; σ_{set} — максимальное напряжение, испытанное образцом в установочном цикле.

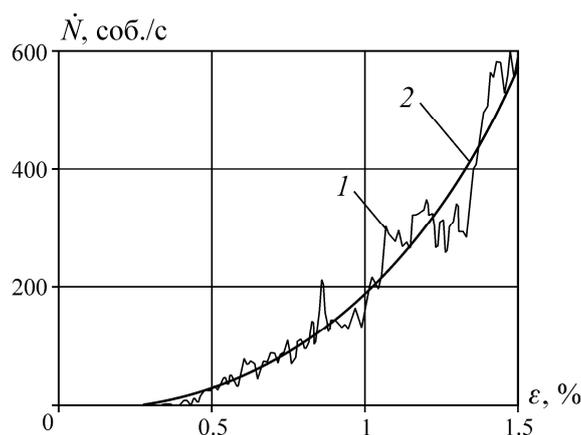


Рис. 1. Экспериментальная (1) и аппроксимированная степенной функцией (2) зависимости активности \dot{N} акустической эмиссии текстолита от его относительной деформации ε

Другим параметром, характеризующим качество памяти, является угол γ между двумя прямыми, аппроксимирующими зависимость суммарного счета N АЭ от напряжений в установочном цикле нагружения. Причем значение $\gamma \approx 90^\circ$ соответствует идеальному проявлению памяти, а $\gamma \approx 180^\circ$ свидетельствует о ее полном отсутствии [9, 10].

В общем случае длительность сохранности памяти Δt текстолита будет зависеть от времени Δt_{set} , в течение которого он испытывал напряжение σ_{set} , а также задаваемых предельно допустимых значений Δ_m и γ . Поэтому эксперименты по определению значений Δt включали установочное нагружение до $\sigma_{set} = 40$ МПа трех групп образцов, значения Δt_{set} для каждой из которых составляли соответственно $\Delta t_{set}^1 = 1$ ч, $\Delta t_{set}^2 = 10$ ч и $\Delta t_{set}^3 = 24$ ч, после чего проводилась разгрузка образцов и их вторичное (тестовое) нагружение через различные интервалы времени Δt_i до максимального значения $\sigma_{test} = 45$ МПа. В процессе этого нагружения измерялись и регистрировались такие параметры АЭ, как счет \dot{N} и суммарный счет N АЭ в функции от величины σ_{test} , по которым находились соответствующие значения Δ_m и γ . Результаты исследований приведены в таблице, а на рис. 2 показан пример зависимостей счета \dot{N} и суммарного счета N АЭ от напряжений σ_{test} в тестовом цикле нагружения при $\Delta t_{set} = 1$ ч и сохранности памяти $\Delta t = 7$ сут. Здесь также иллюстрируется суть параметров Δ_m и γ .

Анализ представленных в таблице экспериментальных данных свидетельствует о том, что с ростом Δt_{set} время сохранности “памяти” в текстолите возрастает. Кроме того, с ростом Δt_{set} при одних и тех же временных интервалах Δt_i между установочным и тестовым циклами на-

гружения возрастает качество “памяти”, что выражается в уменьшении относительной погрешности Δ_m и угла γ . Отметим, что указанные закономерности характерны и для АЭЭП в горных породах, особенно пластичных [11].

Результаты лабораторных экспериментов по исследованию длительности сохранности памяти в текстолите

Δt_{set} , ч	Δt , сут	Δm , %	γ , град
1	1	6	110
	7	7.1	120
	14	9.4	130
	30	10	145
10	7	6.7	100
	14	7.2	115
	30	8.8	135
	40	9.5	150
24	14	6.0	100
	30	8.7	125
	40	8.9	140
	50	9.7	165

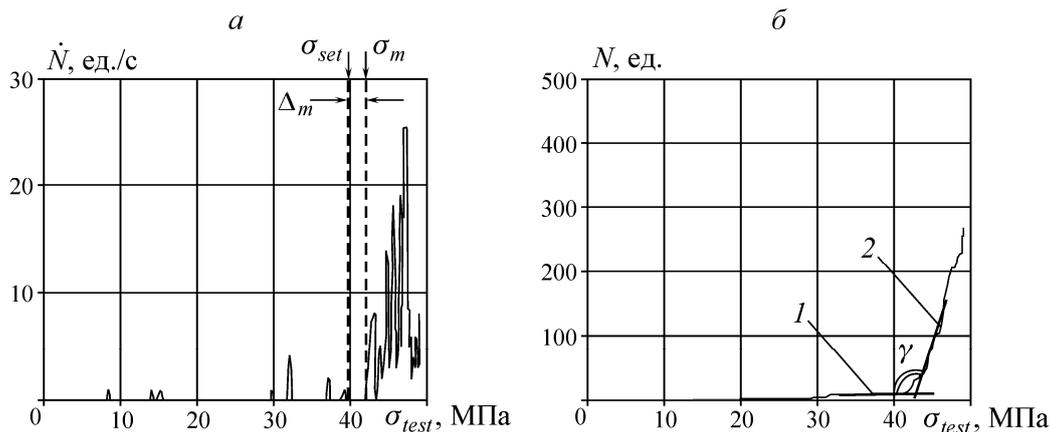


Рис. 2. Зависимость счета \dot{N} (а) и суммарного счета N (б) АЭ от нагрузки σ_{test} при $\Delta t_{set}=1$ ч и $\Delta t = 7$ сут: 1 и 2 — прямые, аппроксимирующие функцию $N=f(\sigma_{test})$ на участках до и после проявления АЭЭП соответственно

Для определения длительности сохранности памяти Δt по данным таблицы необходимо задать предельными значениями Δ_m , γ и Δt_{set} . Так, при $\Delta_m \leq 10\%$, $\gamma \leq 165^\circ$ и $\Delta t_{set} = 24$ ч Δt в текстолите достигает 50 сут.

Следует подчеркнуть, что АЭЭП в текстолите формируется и проявляется при существенно меньших значениях Δt_{set} , чем при отмеченных в геоматериалах. Это следует, например, из сравнения представленных на рис. 2а (для текстолита) и на рис. 3а (для Кибик-Кордонского мрамора) зависимостей $\dot{N}=f(\sigma_{test})$, которые получены на одинаковых по размерам и форме образцах и при идентичных режимах их нагружения. Так, в мраморе через 7 сут после тестового нагружения в течение интервала времени $\Delta t_{set} = 1$ ч АЭЭП вообще не проявляется и становится достаточно четким только при $\Delta t_{set} = 24$ ч (рис. 3б). Указанное дает основание утверждать, что тексто-

лит в отличие от горных пород позволяет “запоминать” напряжения, остающиеся постоянными в течение относительно малых промежутков времени. Это представляется важным при решении ряда задач геоконтроля в массиве, напряженно-деформированное состояние которого достаточно быстро изменяется под влиянием природных или техногенных факторов.

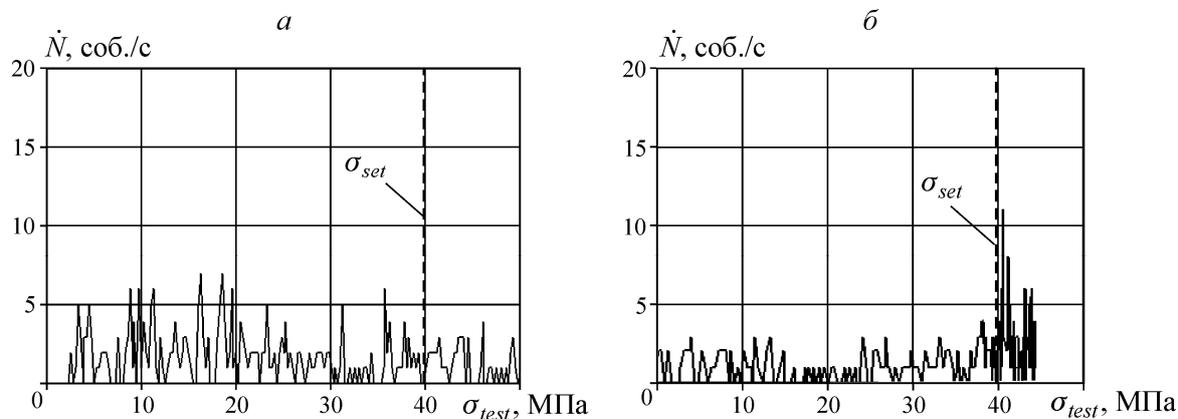


Рис. 3. Зависимость счета \dot{N} АЭ от нагрузки σ_{test} при испытаниях образца мрамора Кибик-Кордонского месторождения при $\Delta_{test}=1$ ч (а) и $\Delta_{set}=24$ ч (б)

Вторая задача, которая решалась в рамках исследования АЭЭП в текстолите, заключалась в установлении влияния на качество его проявления угла θ между направлениями приложения установочной и тестовой нагрузки. При решении этой задачи после нагружения дискового образца вдоль диаметра до уровня $\sigma_{set}=40$ МПа, который поддерживался постоянным в течение часа, нагрузка снималась. Далее образец поворачивался вокруг своей оси дискретно на угол θ_i , кратный 5° . Затем через сутки осуществлялось тестовое нагружение образца до уровня напряжений $\sigma_{test} > \sigma_{set}$, в процессе которого регистрировались зависимости $\dot{N} = f(\sigma_{test})$ и $N = f(\sigma_{test})$. Анализ полученных зависимостей показал, что при $\theta=0^\circ$ качество проявления АЭЭП в текстолите максимально и характеризуется значениями $\Delta_m \approx 5\%$ и $\gamma \approx 100^\circ$. Предельное значение угла θ , при котором АЭЭП проявляется еще достаточно четко ($\Delta_m \leq 15\%$ и $\gamma \leq 160^\circ$), составляет 15° .

АППАРАТУРНОЕ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТОДА КОНТРОЛЯ И ЕГО ИСПЫТАНИЯ

Конструкция скважинного датчика критических напряжений на основе АЭЭП в композиционном материале схематично представлена на рис. 4.

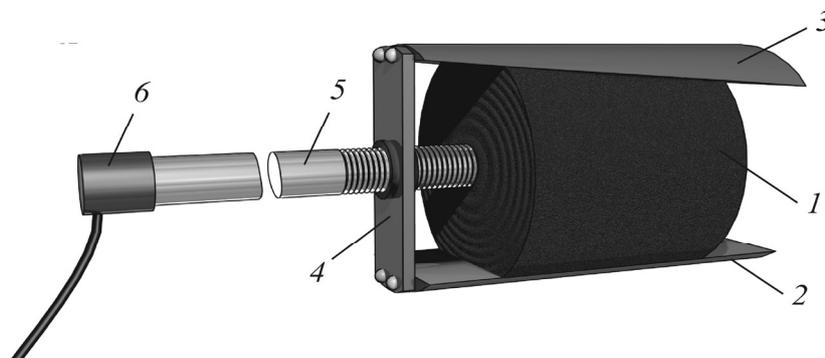


Рис. 4. Конструкция скважинного датчика: 1 — первичный преобразователь из текстолита, 2, 3 — нижняя и верхняя стальные накладки; 4 — перемычка; 5 — стальной волновод; 6 — преобразователь АЭ

Первичный преобразователь 1 указанного датчика изготавливается из цилиндрического образца текстолита марки ПТК диаметром 42 мм и высотой 30 мм, на боковых диаметрально противоположных поверхностях которого фрезеруются верхняя и нижняя параллельные площадки. Через эти площадки с помощью прессы образец подвергается установочному нагружению до заданного критического напряжения σ_{set} , поддерживаемого постоянным в течение времени $t_{set} \geq 1$ ч. Затем верхняя площадка образца подвергается дополнительному фрезерованию так, чтобы угол ее наклона по отношению к нижней площадке составлял от 3 до 5°. Таким образом, исходный образец текстолита в результате проделанных с ним операций приобретает свойства нелинейного преобразователя напряжений в сигнал АЭ с пороговой чувствительностью σ_{set} . При этом форма образца обеспечивает возможность его жесткого закрепления в скважине с помощью расклинивания нижней 2 и верхней 3 стальными накладками, которые своими торцевыми поверхностями закреплены на перемычке 4. В ее центральной части имеется снабженное резьбой отверстие, через которое проходит также снабженный резьбой стальной волновод 5. Последний с одной стороны имеет надежный акустический контакт с первичным преобразователем 1, являющимся источником сигнала АЭ, а с другой — с акустическим пьезо-преобразователем 6, преобразующим указанный сигнал в электрический.

Для минимизации потерь и искажений АЭ сигнала в волноводе его диаметр d выбирается из соотношения [12]

$$\frac{fd}{c_0} \leq 0.4, \quad (3)$$

где f — условно максимальная частота спектра АЭ; c_0 — скорость распространения упругих волн в стержневом волноводе, определяемая модулем упругости E и плотностью ρ материала, из которого он изготовлен ($c_0 = \sqrt{E/\rho}$). Учитывая, что f в текстолите составляет 145 кГц, значение c_0 в волноводе из стали 5200 м/с, оптимальный диаметр волновода не должен превышать 14.6 мм. При этом экспериментально установлено, что при длине волновода до 4 м значимых изменений информативных параметров сигналов АЭ в нем не происходит.

Контроль критических напряжений с использованием описанного датчика предполагает наличие априорной информации о направлении максимального главного напряжения в исследуемой области массива. В этой области бурится измерительный шпур, в котором датчик размещается таким образом, чтобы направление максимального главного напряжения совпадало с направлением σ_{set} с точностью до 15°. К первичному преобразователю АЭ подключается электронный блок анализа АЭ данных, осуществляющий регистрацию счета \dot{N} АЭ в функции от времени t .

Под действием факторов природного или техногенного характера в исследуемой области породного массива происходит изменение напряженно-деформированного состояния. Примером такого изменения может служить смещение зоны опорного давления, вызванное разрушением приконтурной области массива, а также увеличение напряжений в столбчатом целике при потере несущей способности соседних целиков. В результате возникает приращение напряжений в области расположения первичного преобразователя. При этом в момент превышения дополнительными напряжениями значения σ_{set} в образце текстолита проявляется АЭЭП в виде всплеска счета \dot{N} АЭ, инициирующего срабатывание сигнального устройства электронного блока анализа АЭ данных.

С целью подтверждения работоспособности разработанного метода контроля проведены его натурные испытания на руднике СКРУ-3 ОАО “Уралкалий” (панель № 10, блок 9).

Суть испытаний сводилась к предварительному нагружению подготовленного образца из текстолита в лабораторных условиях до уровня установочных напряжений $\sigma_{set}=8$ МПа и его последующему тестовому нагружению в подземных условиях после размещения датчика в измерительном шпуре.

Для ускорения процессов деформации массива вокруг измерительного шпура, а также обеспечения контроля параметров испытаний проводилось натурное моделирование изменения напряжений вблизи контура выработки с помощью гидроцилиндра с максимальным усилием 1000 кН. Контроль усилия, развиваемого гидроцилиндром, осуществлялся с помощью встроенного манометра. Схема проведения испытаний приведена на рис. 5.

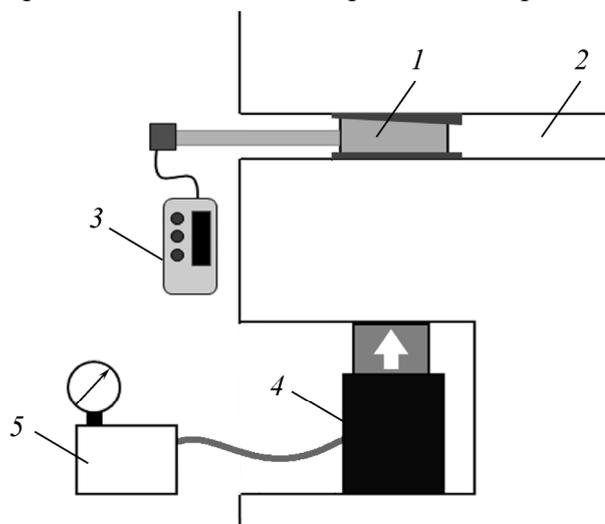


Рис. 5. Схема натурных испытаний: 1 — датчик критических напряжений с первичным преобразователем из текстолита; 2 — измерительный шпур; 3 — электронный блок анализа АЭ данных; 4 — гидроцилиндр; 5 — маслостанция

По результатам испытаний зафиксирована сигнализация о превышении заданного порога по напряжениям. Момент сигнализации совпал с моментом достижения в исследуемой области массива приращения напряжений, равных 8.3 МПа, что подтверждает возможность использования описанных метода и средств для контроля критических напряжений в окрестностях горных выработок с относительной погрешностью, не превышающей 5%.

ВЫВОДЫ

Датчик критических приращений напряжений относится к классу нелинейных систем с пороговой чувствительностью. Являясь одним из возможных вариантов таких систем, датчик на основе АЭЭП в текстолите отличается простотой изготовления и относительной дешевизной. Это является принципиально важным, если учесть, что после срабатывания его первичный преобразователь не может быть извлечен из массива и вновь использован по назначению. Кроме того, такой датчик не требует для своей работы энергии от дополнительного источника питания, что имеет первостепенное значение в условиях скважинных мониторинговых измерений.

Авторы выражают благодарность профессору д.т.н. А. А. Баряху и доценту к.т.н. В. Н. Токсарову за полезное обсуждение работы и помощь в проведении экспериментальных исследований в натурных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ямщиков В. С.** Контроль процессов горного производства: учебник для вузов. — М.: Недра, 1989.
2. **Ямщиков В. С., Шкуратник В. Л., Лавров А. В.** Эффекты памяти в горных породах (обзор) // ФТПРПИ. — 1994. — № 5.
3. **Hardy H. R. jr., Zhang D., Zelanko J. C.** Recent studies of the Kaiser effect in geological materials. In: Proceedings of the Fourth Conference, AE/MA in Geologic Structures and Materials, Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 1989.
4. **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 measurement in rock mass, Rock Mechanics and Rock Engineering, 2001, Vol. 34, No. 4.
5. **Ямщиков В. С., Шкуратник В. Л., Лыков К. Г.** Измерение напряжений в массиве горных пород на основе эмиссионных эффектов памяти // ФТПРПИ. — 1990. — № 2.
6. **Ямщиков В. С., Шкуратник В. Л., Лыков К. Г., Фарафонов В. М.** Оценка напряженного состояния массива на основе эмиссионных эффектов памяти горных пород окколоскважинного пространства // ФТПРПИ. — 1991. — № 2.
7. **Справочник по композиционным материалам / под ред. Дж. Любина; пер. с англ. А. Б. Геллера, М. М. Гельмонта.** — М.: Машиностроение, 1988.
8. **Николенко П. В., Цариков А. Ю.** Лабораторный стенд для механических и акустико-эмиссионных испытаний образцов композиционных материалов // ГИАБ. — 2013. — № 4.
9. **Шкуратник В. Л., Николенко П. В.** Методика интерпретации акустико-эмиссионных измерений при использовании эффекта Кайзера для оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Горн. журн. — 2012. — № 9.
10. **Hardy H. R. jr.** Application of Kaiser effect for the evaluation of in-situ stresses in salt, Proceedings 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Ecole Polytechnique, Palaseau, France, September 1993, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany.
11. **Li C., Nordlund E.** Ultrasonic verification of the Kaiser effect in rocks, Rock Mech. Rock Engng, 1993, Vol. 26, No. 4.
12. **Баранов В. М., Гриценко А. И., Карасевич А. М. и др.** Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса. — М.: Наука, 1998..

Поступила в редакцию 20/VI 2013