

УДК 622.02:539.2

## АКУСТОЭМИССИОННЫЙ ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ОДНООСНОМ НАГРУЖЕНИИ ОБРАЗЦОВ УГЛЯ

В. Л. Шкуратник, Ю. Л. Филимонов\*, С. В. Кучурин

Московский государственный горный университет, 119991 Москва

\* ООО "Подземгазпром", 123182 Москва

E-mails: ftkp@mail.ru, y.filimonov@mail.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований акустоэмиссионного и деформационного эффектов памяти при циклическом нагружении образцов антрацита. Выявлены особенности и закономерности формирования и проявления акустоэмиссионного эффекта памяти угля при немонотонных одноосных испытаниях.

Ключевые слова: уголь, акустическая эмиссия, эффект Кайзера, эксперимент, циклическое нагружение.

**Введение.** Акустоэмиссионный эффект памяти (эффект Кайзера) наблюдается при циклическом нагружении твердого тела с возрастающей от цикла к циклу амплитудой напряжения. Эффект заключается в невозможности акустической эмиссии (АЭ) вплоть до максимального напряжения предшествующего цикла, когда параметры АЭ скачкообразно восстанавливаются до уровня, соответствующего этому максимальному напряжению. Со времени открытия данного эффекта в начале 50-х годов XX столетия [1] в образцах металлов, древесины и песчаника был накоплен значительный объем экспериментальных данных о закономерностях его проявления в различных конструкционных материалах, а также классических хрупких и пластичных горных породах. Были также предложены теоретические модели, объясняющие природу и механизмы эффекта, обоснованы предпосылки его использования для оценки вида напряженного состояния, направлений и значений главных напряжений в массиве горных пород [2].

Разнообразие структуры и свойств различных типов геоматериалов предопределяет наличие у них специфических особенностей формирования и проявления эффекта Кайзера в зависимости от условий и режимов испытанных механических воздействий [3–6]. Данное обстоятельство подчеркивает необходимость исследования указанного эффекта в природных материалах разных генетических групп и месторождений. В частности, это относится к ископаемым углям, эффект Кайзера в которых изучен в настоящее время только в условиях одноосных испытаний с постоянной скоростью продольного деформирования [7].

Углям присущи повышенная гетерогенность, анизотропия, вязкоупругие свойства, физико-химическая активность, литологическое многообразие и другие характерные черты, что осложняет изучение их акустоэмиссионных и механических свойств. Трудоемкость, а порою и невозможность изготовления образцов с требуемыми параметрами без дополнительного их нарушения, высокие показатели частотно-зависимого затухания упру-

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 04-05-64885) и фонда "Ведущие научные школы России" (грант № НШ-1467.2003.5).

гих волн в угле также являются факторами, сдерживающими изучение АЭ в данном материале. Целенаправленное комплексное исследование ультразвуковой акустической эмиссии в образцах угля при некоторых режимах механических испытаний осуществлено в недавних работах [8–10].

Цель настоящей работы — исследование закономерностей формирования и проявления эффекта Кайзера в угольных образцах при заданных скоростях их циклического одноосного нагружения.

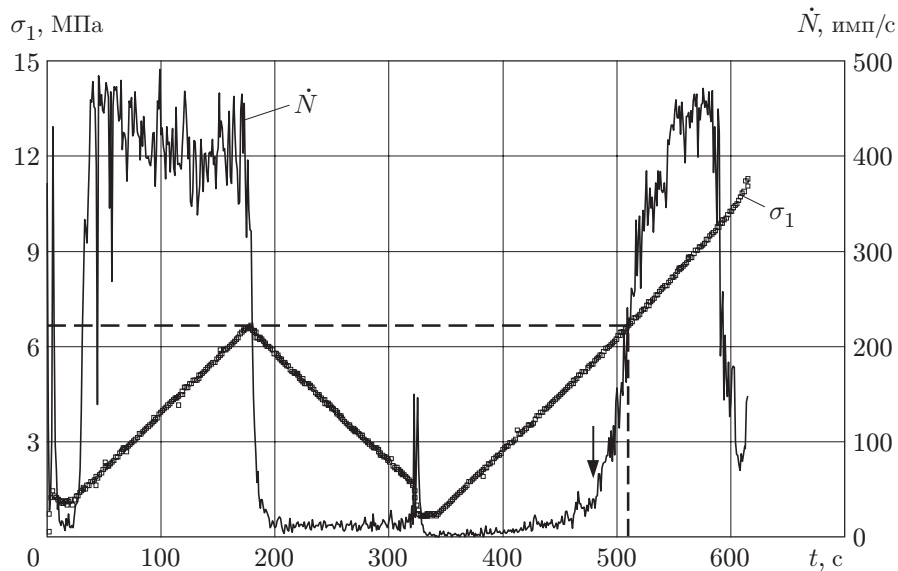
**Постановка экспериментов.** Для изучения акустоэмиссионного эффекта памяти были использованы цилиндрические образцы антрацита пласта  $i_3^H$  “Степановский” бывшей шахты “Западная” (г. Новошахтинск Ростовской области). Образцы диаметром 50 мм и высотой 100 мм изготавливались путем выбуривания из монолитных блоков, отобранных с глубины около 700 м.

Исследуемый антрацит по петрографическому составу принадлежит к смешанным кларенам, дюрено-кларенам, реже — к кларен-дюренам. Для состава угля характерно существенное варьирование содержания практически всех микрокомпонентов, а минеральные примеси представлены в основном глинистым веществом. В образцах присутствуют также эпигенетические минералы образований кварца, карбонатов, сульфида железа, которые отмечены в трещинных полостях.

Исследования закономерностей акустоэмиссионных и механических свойств образцов угля при немонотонном одноосном сжатии проводились с использованием компьютеризированной измерительной системы, состоящей из тензометрической аппаратуры СИИТ-2 и акустоэмиссионного измерительного комплекса A-Line 32D. Эмиссия регистрировалась пьезопреобразователем в диапазоне частот от 30 до 500 кГц. В качестве испытательной машины использовался пресс EU-100 (Германия). В ходе экспериментов измерялись осевое напряжение ( $\sigma_1$ ), продольная ( $\varepsilon_1$ ) и поперечная ( $\varepsilon_2$ ) деформации, активность АЭ ( $\dot{N}$ ). Продольные и поперечные деформации регистрировались тензорезисторами, наклеенными соответственно на индикаторы часового типа и упругие кольца. Регистрация осевой нагрузки осуществлялась посредством тензодинамометра. Производился расчет объемной деформации  $\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_2$  и суммарной акустической эмиссии  $N_\Sigma$ .

Пресс обеспечивал испытания образцов угля с заданной скоростью осевого нагружения. Программа исследований включала проведение экспериментов по циклическому нагружению угольных образцов с возрастающими максимальными значениями напряжения ( $\sigma_1^I, \sigma_1^{II}$  и т. д.; I, II — номера циклов) без временных задержек между последовательными циклами. При этом изменялись скорости нагружения и разгрузки с целью изучения их влияния на проявления эффекта Кайзера. Кроме того, анализировались возможности комплексной оценки деформационного эффекта памяти угля, который нередко проявляется в горных породах совместно с акустоэмиссионным и служит для повышения достоверности распознавания последнего.

**Результаты экспериментов и их обсуждение.** На рис. 1 представлены типичные зависимости параметров  $\sigma_1$  и  $\dot{N}$  от времени  $t$  при двухцикловом нагружении угля. Из рисунка видно, что после достаточно быстрой нагрузки образца до 1–1,5 МПа производилось его монотонное нагружение со скоростью  $\dot{\sigma}_1 = 0,035$  МПа/с до значения  $\sigma_1^I = 6,7$  МПа, после чего осуществлялась разгрузка образца с такой же скоростью приблизительно до 1 МПа. Затем образец повторно нагружался до полного разрушения с той же самой скоростью. При этом  $\sigma_1^{II} = \sigma_c = 11,3$  МПа, где  $\sigma_c$  — предел мгновенной прочности при одноосном сжатии (в данном случае в цикле II). Штриховыми линиями на рис. 1 и далее обозначены максимальный уровень напряжения предшествующего цикла и момент его достижения в последующем цикле нагружения. Стрелками на рисунках обозначаются аномалии, соответствующие проявлению акустоэмиссионного эффекта памяти.

Рис. 1. Зависимости  $\sigma_1(t)$  и  $\dot{N}(t)$  при двухцикловом нагружении угля

Из зависимостей  $\dot{N}(t)$  и  $\sigma_1(t)$  (рис. 1) видно, что возобновление роста значений  $\dot{N}$  происходит при напряжении, меньшем ранее достигнутого его максимального уровня. Однако в момент достижения значения  $\sigma_1^I$  в цикле II происходит резкое возрастание  $\dot{N}$  до значений, близких соответствующему уровню  $\dot{N}$  цикла I нагружения.

Определение в цикле II напряжения, соответствующего максимуму нагрузки цикла I, на зависимости  $\sigma_1(\varepsilon_1)$  для угля не представлялось возможным из-за того, что ввиду неустойчивого поведения деформационной кривой имелось несколько характерных точек уменьшения угла наклона. Это не позволяет отнести однозначно данные аномалии к проявлению деформационного эффекта памяти без знания предварительной истории нагружения образцов. Подобная картина наблюдалась также при анализе зависимости  $\varepsilon_v(\sigma_1)$ . При этом на графике данной зависимости в цикле II невозможно было однозначно выделить максимум, соответствующий достижению максимального напряжения цикла I.

В каменных солях указанные проявления деформационного эффекта памяти четко наблюдались при одноосных испытаниях с постоянной скоростью продольной деформации [11]. В углях при подобном режиме деформирования эффект памяти на зависимостях  $\sigma_1(\varepsilon_1)$  наблюдался в работе [12], где отмечалось, что деформационный эффект памяти проявляется наиболее четко в пластичных горных породах. Однако для крепких осадочных и изверженных пород данный эффект соизмерим с погрешностью регистрирующей аппаратуры, что не позволяет производить надежную оценку напряжений. Поэтому требуется привлечение других методов, например исследования эффекта Кайзера.

Как показали проведенные в настоящей работе эксперименты, однозначная интерпретация результатов деформационных измерений при циклическом испытании угля с заданной скоростью одноосного нагружения невозможна. Это связано с тем, что структурная неоднородность угля обуславливает случайный характер деформирования при детерминированном режиме нагружения.

Для идентификации максимальных значений напряжений и продольных деформаций предыдущего цикла при повторном нагружении могут использоваться также зависимости, представленные на рис. 2, на которых четко выделяются перегибы, соответствующие памяти о предшествовавших максимальных значениях  $\sigma_1$  и  $\varepsilon_1$ . Причем зависи-

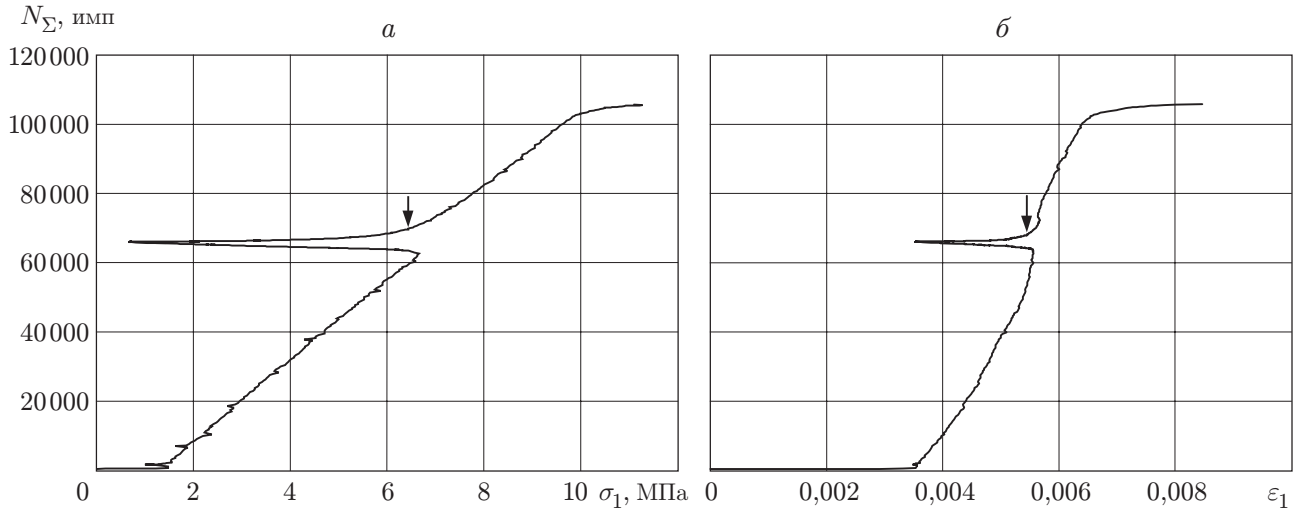


Рис. 2. Зависимости  $N_{\Sigma}(\sigma_1)$  (а) и  $N_{\Sigma}(\varepsilon_1)$  (б) при двухцикловом нагружении угля

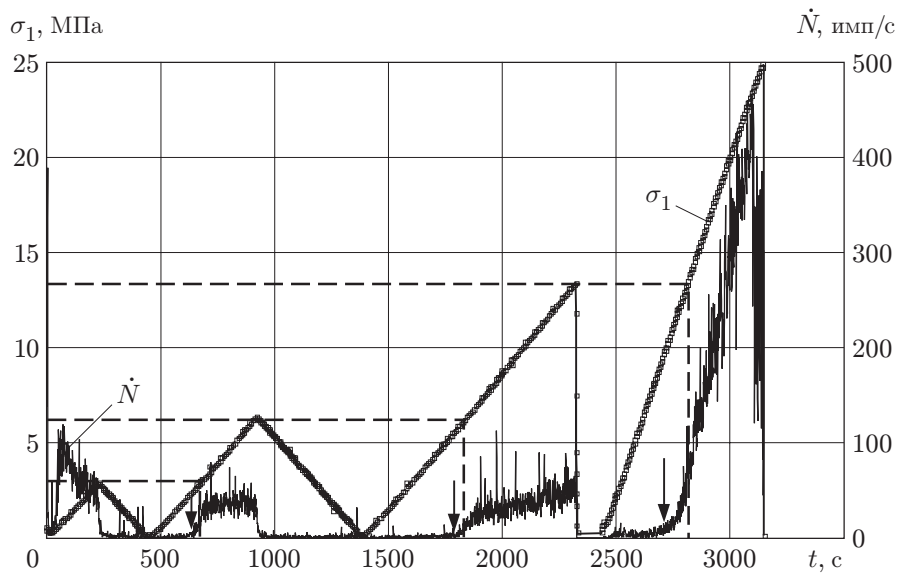


Рис. 3. Зависимости  $\sigma_1(t)$  и  $\dot{N}(t)$  при четырехцикловом нагружении угля

мость  $N_{\Sigma}(\sigma_1)$  позволяет определить величину  $\sigma_1^I$  более надежно, чем совместный анализ зависимостей  $\dot{N}(t)$  и  $\sigma_1(t)$  на рис. 1. Так, показатель сохранности памяти FR (felicity ratio), определенный по зависимости  $N_{\Sigma}(\sigma_1)$  (рис. 2, а), составил 0,96 (в случае идеального эффекта Кайзера FR = 1). Отметим, что показатель FR представляет собой отношение напряжения, при котором возобновляется эмиссия, к ранее достигнутому максимальному напряжению [2].

Было проведено также четырехцикловое нагружение образцов угля. Полученные в результате такого нагружения характерные зависимости  $\dot{N}(t)$  и  $\sigma_1(t)$  для одного из образцов представлены на рис. 3. При этом максимальные напряжения циклов были следующими:  $\sigma_1^I = 2,9$  МПа,  $\sigma_1^{II} = 6,4$  МПа,  $\sigma_1^{III} = 13,4$  МПа,  $\sigma_1^{IV} = \sigma_c = 24,8$  МПа (в цикле IV образец был доведен до разрушения). Скорости нагружения в циклах составляли:  $\dot{\sigma}_1^I = 0,012$  МПа/с,  $\dot{\sigma}_1^{II} = \dot{\sigma}_1^{III} = 0,014$  МПа/с,  $\dot{\sigma}_1^{IV} = 0,036$  МПа/с. В данном эксперименте (несмотря на раз-

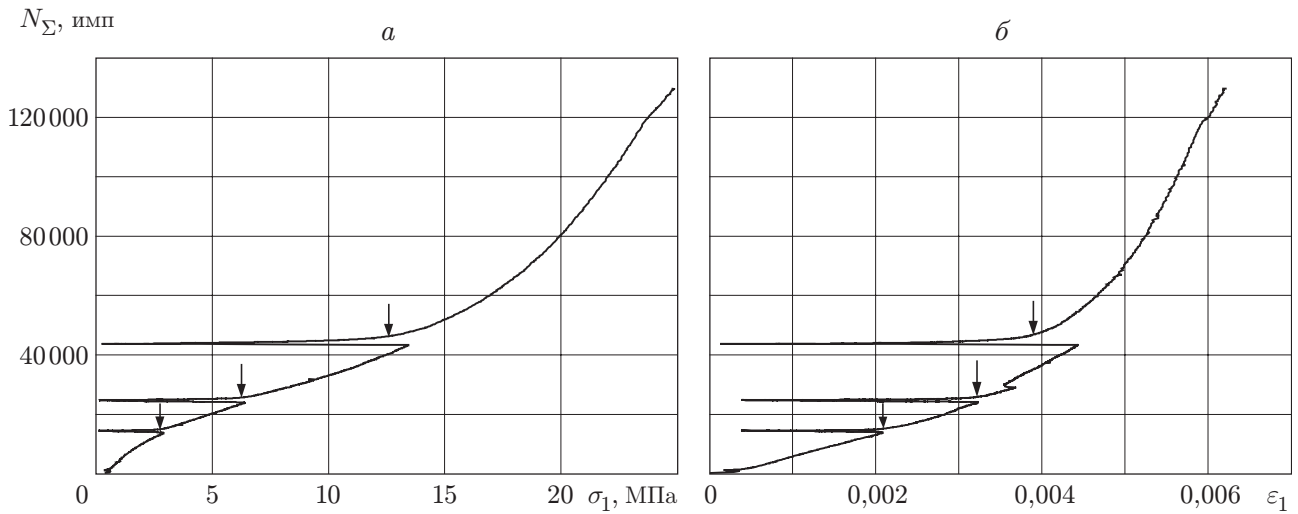


Рис. 4. Зависимости  $N_{\Sigma}(\sigma_1)$  (а) и  $N_{\Sigma}(\varepsilon_1)$  (б) при четырехцикловом нагружении угля

личные значения  $\dot{\sigma}_1$ ) во всех циклах нагрузки — разгрузки наблюдался явный эффект Кайзера, при том что скорость нагружения в последнем цикле примерно в 2,5 раза больше, чем в циклах II и III, и в 3 раза больше, чем в цикле I. Разгрузка в цикле III производилась практически мгновенно. Приблизительно через 120 с осуществлялось нагружение цикла IV. В образце угля запоминается максимум  $\sigma_1$  цикла нагружения, непосредственно предшествующего данному циклу, а предыдущие циклы не проявляются совсем. Как и в случае двухциклового нагружения, при четырехцикловом эффект памяти наиболее четко проявляется в изменении параметров АЭ ( $\dot{N}$  и  $N_{\Sigma}$ ), а не деформаций.

Зависимости  $N_{\Sigma}(\sigma_1)$  и  $N_{\Sigma}(\varepsilon_1)$  при четырехцикловом нагружении угля показаны на рис. 4. Значения FR в циклах II, III и IV, определенные из зависимости  $N_{\Sigma}(\sigma_1)$  на рис. 4, а, составили 0,97, 0,98 и 0,93 соответственно. Наиболее значительное снижение величины FR наблюдается в цикле IV. Это объясняется тем, что в данном цикле был достигнут предел длительной прочности угля, в результате чего нарушилось соответствие между достигнутым уровнем напряжения и развитием дефектности и повысилась фоновая активность АЭ. Однако во всех случаях для показателя FR характерны высокие значения (не менее 0,9). С возрастанием порядкового номера цикла при многоцикловом нагружении угольных образцов увеличивается крутизна зависимостей  $N_{\Sigma}(\sigma_1)$  и  $N_{\Sigma}(\varepsilon_1)$  из-за возрастания значений  $\dot{N}$  последовательных циклов в момент проявления акустоэмиссионного эффекта памяти. Однако процесс выявления оставшихся в памяти значений напряжений и продольных деформаций в последующих циклах нагружения — разгрузки затрудняется повышением фоновой активности АЭ, что приводит к “размыванию” характерных перегибов на графиках.

Необходимо отметить также, что в четырехцикловом испытании максимальное значение напряжения цикла I составляло  $0,12\sigma_c$ , цикла II —  $0,26\sigma_c$  и цикла III —  $0,54\sigma_c$ . При этом эффект Кайзера четко выражен во всех случаях приложения нагрузки. Полученные результаты указывают на то, что в угле память формируется даже при малых значениях одноосного установочного напряжения, в то время как в ряде других типов горных пород отмечается отсутствие акустоэмиссионного эффекта памяти при низких напряжениях в диапазоне от нуля до  $(0,2 \div 0,25)\sigma_c$  [2]. Причем если первые два цикла нагружения — разгрузки производились в упругой области деформирования угольного образца, то в цикле III максимальная нагрузка находилась уже в упругопластической области, что, однако, не искажает проявления эффекта Кайзера. Уровень значений  $\dot{N}$  при разгрузке в цикле II

меньше, чем в цикле I (см. рис. 3). В цикле IV наблюдались постоянное возрастание  $\dot{N}$  вплоть до максимальных после достижения значения  $\sigma_1^{\text{III}}$  и повышение активности АЭ до момента проявления эффекта Кайзера в цикле IV по сравнению с циклами II и III. Это вызвано тем, что цикл IV нагружения проводился в области интенсивного развития дилатансии угля, предвещающей разрушение. Кроме того, в этом цикле нагружение осуществлялось с повышенной скоростью.

**Выводы.** Экспериментальное изучение акустоэмиссионных и деформационных свойств угля при его одноосном циклическом нагружении показало следующее.

1. В угле четко проявляется эффект Кайзера при одноосном нагружении образцов. При этом, как и в других типах горных пород, возобновление АЭ происходит несколько раньше достижения максимального уровня  $\sigma_1$  предыдущего цикла, а восстановление  $\dot{N}$  до значений предшествующего цикла при указанном уровне напряжения в тестовых циклах происходит с некоторым запаздыванием.

2. Влияния скоростей нагружения и разгрузки в исследованных пределах на проявление эффекта Кайзера в угле не наблюдается.

3. При четырехцикловых испытаниях образцов угля с возрастающей амплитудой нагрузки в  $(i + 1)$ -м цикле запоминается максимальное значение  $\sigma_1$  цикла  $i$ . Максимальные нагрузки циклов, предшествующих  $i$ -му, не проявляются какими-либо аномалиями АЭ и деформаций.

4. Формирование акустоэмиссионной памяти об испытанных углем максимальных напряжениях и деформациях происходит как в упругой, так и в упругопластической областях, в частности при чрезвычайно малых значениях одноосного напряжения, не превышающих  $0,2\sigma_c$ .

5. Наиболее отчетливо при испытании с заданной скоростью одноосного нагружения в антраците проявляется акустоэмиссионный эффект памяти. Деформационный эффект памяти проявляется менее явно или вовсе отсутствует. При этом характерные аномалии параметров АЭ позволяют наиболее четко и адекватно определять максимальные значения испытанных ранее напряжений и деформаций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Kaiser J.** Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Geräuschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen // Archiv für das Eisenhüttenwesen. 1953. Bd 24, N 1/2. S. 43–45.
2. **Лавров А. В., Шкуратник В. Л., Филимонов Ю. Л.** Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах. М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2004.
3. **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 Mech. and Rock Engng. 2001. V. 34, N 4. P. 275–291.
4. **Lavrov A.** Kaiser effect observation in brittle rock cyclically loaded with different loading rates // Mech. Mater. 2001. V. 33. P. 669–677.
5. **Filimonov Y. L., Lavrov A. V., Shafarenko Y. M., Shkuratnik V. L.** Experimentelle Untersuchung des Steinsalzes mittels einaxialem Drucktest mit hydrostatischer Vorbelastung // Gluckauf-Forschungshefte. 2000. Bd 61, N 2. S. 80–83.
6. **Filimonov Y. L., Lavrov A. V., Shafarenko Y. M., Shkuratnik V. L.** Observation of post-failure Kaiser effect in a plastic rock // Pure and Appl. Geophys. 2002. V. 159. P. 1321–1331.
7. **Seto M., Vutukuri V. S., Nag D. K.** Possibility of estimating in-situ stress of virgin coal field using acoustic emission technique // Rock Stress. Proc. Symp. on Rock Stress / Ed. by K. Sugawara, Y. Obara. Rotterdam: A. A. Balkema, 1997. P. 463–468.

8. Шкуратник В. Л., Филимонов Ю. Л., Кучурин С. В. Экспериментальные исследования акустической эмиссии в образцах угля при одноосном нагружении // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 2004. № 5. С. 42–49.
9. Шкуратник В. Л., Филимонов Ю. Л., Кучурин С. В. Закономерности акустической эмиссии в образцах угля при трехосном деформировании // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 2005. № 1. С. 53–62.
10. Вознесенский А. С., Тавостин М. Н., Гладкий А. Ю., Мизгин Г. Н. Акустическая эмиссия при ступенчатом деформировании образцов угля // Физическая акустика. Распространение и дифракция волн. Геоакустика. Сб. тр. XV сессии Росс. акуст. о-ва. Т. 1. М.: ГЕОС, 2004. С. 287–290.
11. Лавров А. В., Филимонов Ю. Л., Шафаренко Е. М., Шкуратник В. Л. Экспериментальное исследование эффектов памяти в каменной соли при различных режимах циклического нагружения // Физика и механика геоматериалов. Сер. “Науки о Земле”. М.: Вузовская кн., 2002. С. 73–93.
12. Проскуряков М. Н., Карташов Ю. М., Ильинов М. Д. Эффекты памяти горных пород при различных видах их нагружения // Эффекты памяти в горных породах. М.: Моск. горн. ин-т, 1986. С. 22–37.

*Поступила в редакцию 29/III 2005 г.*

---