

## НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 622.02:539.2

### ОСОБЕННОСТИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В АНИЗОТРОПНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД

**П. В. Николенко, В. Л. Шкуратник**

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

Экспериментально исследовано влияние направления естественной анизотропии в ряде композиционных материалов на акустико-эмиссионную тензочувствительность, а также установлены закономерности акустической эмиссии в зависимости от угла между приложением нагрузки и направлением слоистости в композите. По результатам циклических испытаний показано, что указанный угол оказывает существенное влияние на проявление акустико-эмиссионного эффекта памяти вплоть до его полного исчезновения. Предложен метод контроля напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов систем разработки на основе выявленных закономерностей.

*Напряженно-деформированное состояние, контроль, композиционные материалы, анизотропия, акустическая эмиссия, акустико-эмиссионный эффект памяти*

Контроль напряженно-деформированного состояния (НДС) конструктивных элементов систем разработки полезных ископаемых является одной из приоритетных задач экспериментальной геомеханики, для решения которой привлекается широкий спектр геологических, геомеханических и геофизических методов. Увеличение глубины и усложнение горно-геологических и горнотехнологических условий ведения горных работ обуславливают повышенные требования к надежности и оперативности контроля НДС, а также определяют возможность реализации последнего в режиме мониторинга.

Существующие в настоящее время геомеханические методы контроля НДС не обеспечивают требуемую точность определения значений напряжений, действующих в приконтурной области массива, являются чрезвычайно трудоемкими и затратными. С другой стороны, известные геофизические методы позволяют получать хотя и экспрессные, но лишь качественные оценки напряжений. Все это подтверждает важность поиска новых решений в области контроля НДС, обеспечивающих возможность реализации такого контроля в непрерывном режиме с повышенной точностью получаемых оценок абсолютных значений напряжений и направления их действия.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (соглашение № 14-05-31201\14).

Одним из подходов к решению данной задачи является использование так называемого акустико-эмиссионного эффекта памяти (АЭЭП) в горных породах. Суть этого эффекта заключается в невоспроизводимости активности акустической эмиссии (АЭ) в процессе циклического нагружения соответствующего объекта исследования при напряжениях, меньших максимально достигнутого ранее значения. При этом в момент достижения указанного значения активность АЭ скачкообразно возрастает [1].

Методы оценки НДС массива, основанные на использовании АЭЭП непосредственно в горных породах, подробно рассмотрены в [2–6]. Накопленный опыт их применения свидетельствует о том, что наряду с достоинствами они обладают одним существенным недостатком — значительным и непредсказуемым влиянием неоднородности геосреды на погрешность измерений напряжений. Исключить указанный недостаток возможно за счет использования АЭЭП в искусственных материалах, размещаемых в массиве и имеющих известные и постоянные свойства. Для формирования и проявления АЭЭП в таких материалах должна иметь место исходная дефектность, необходимая для дальнейшего трещинообразования под действием исследуемых напряжений. По этой причине использование в качестве датчиков напряжений размещаемых в массиве различных металлов и сплавов на их основе неэффективно из-за крайне низкого уровня и относительно высоких частот возникающей акустической эмиссии [7]. По оптимальности сочетания прочности и достаточного уровня исходной дефектности наиболее подходящими для использования при контроле напряжений в массиве можно считать композиционные материалы.

Ранее в работах [8, 9] были представлены методы контроля НДС массива, основанные на использовании АЭЭП в таких композиционных материалах, как эпоксидная смола с кварцевым наполнителем и текстолит марки ПТК. При этом в работе [8] рассматривалась возможность определения напряжений в массиве путем проведения разового измерения. Метод, приведенный в [9], позволяет осуществлять контроль критических напряжений в режиме мониторинга, однако его ограничением является необходимость наличия априорной информации о направлении действия максимального главного напряжения в массиве, с учетом которой в измерительной скважине ориентируется чувствительный элемент. Кроме того, в [9] не учитывается анизотропия свойств применяемого материала — текстолита марки ПТК. Указанное обуславливает актуальность дальнейших исследований проявления АЭЭП в композиционных материалах с целью повышения точности и универсальности контроля НДС в приконтурной области массива на основе методов, использующих указанный эффект.

#### ПОСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящей работе приводится анализ проявления акустико-эмиссионных эффектов в таких распространенных слоистых анизотропных материалах, как гетинакс (марка V), текстолит (марка ПТК) и стеклотекстолит (марка СТЭФ). Особое внимание уделяется влиянию направления анизотропии на акустико-эмиссионную тензочувствительность и проявление АЭЭП в исследуемых материалах. Физико-механические свойства материалов представлены в табл. 1, а микрофотографии аншлифов их поверхностей — на рис. 1.

На рис. 1 показана слоистая структура исследуемых композитов. Расстояние между слоями колеблется в пределах от 20 до 140 мкм, при этом гетинакс (рис. 1б) характеризуется значительно большей степенью однородности структуры, чем стеклотекстолит и текстолит (рис. 1а, в).

Лабораторные исследования проводились на специализированном лабораторном стенде [10], позволяющем регистрировать весь спектр акустико-эмиссионных параметров в функции от времени и прилагаемой нагрузки. Особенностью стенда является полное отсутствие акустических и электромагнитных помех в процессе нагружения и поддержания заданного уровня нагрузки.

ТАБЛИЦА 1. Физико-механические свойства исследуемых композитов

Материал	$E$ , ГПа		$\nu$	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_{сж}$ , МПа
	параллельно слоистости	перпендикулярно слоистости			
Стеклотекстолит	20	15	0.11	1600–1800	300
Текстолит	15	6.5	0.15	1300–1400	250
Гетинакс	9.5	7	0.28	1280–1380	140

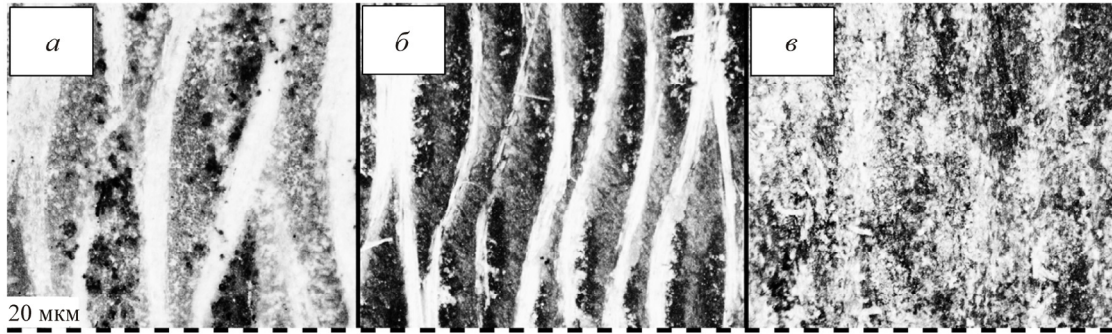


Рис. 1. Микрофотографии шлифов стеклотекстолита (а), текстолита (б) и гетинакса (в)

Суть лабораторных исследований сводилась к следующему: образцы кубической формы со стороной 24 мм, изготовленные из рассматриваемых композиционных материалов, подвергались двухцикловому одноосному нагружению до уровня 20 МПа (в первом цикле) и 30 МПа (во втором цикле). Для разных серий образцов нагружение проводилось под углами 0, 45 и 90° относительно направления расположения слоев композитов. Одновременно с нагружением велась регистрация комплекса акустико-эмиссионных параметров.

В рамках первого цикла нагружения в образцах формировался АЭЭП при максимальных установившихся напряжениях  $\sigma_{уст}$ . Наряду с этим оценивалась так называемая акустико-эмиссионная тензочувствительность  $S_{АЭ}$  — влияние продольной относительной деформации на уровень активности акустической эмиссии в образце. Численно значение АЭ-тензочувствительности можно определить из выражения

$$S_{АЭ} = \frac{\Delta \dot{N}_{\Sigma}}{\Delta \varepsilon}, \quad (1)$$

где  $\Delta \dot{N}_{\Sigma}$  — приращение активности АЭ на участке нагружения;  $\Delta \varepsilon$  — приращение относительных деформаций на участке нагружения.

На рис. 2. приведен пример проявления АЭ-тензочувствительности для образца текстолита в зависимости от направления приложения нагрузки. Качественно близкие закономерности прослеживаются и при испытаниях образцов стеклотекстолита и гетинакса.

Видно, что направление анизотропии в композите оказывает значительное влияние на его АЭ-тензочувствительность. Для удобства сравнения результатов экспериментов функции  $\Delta \dot{N}_{\Sigma}(\varepsilon)$  аппроксимировались линейными зависимостями вида  $y = a_0 + a_1 x$ , для которых были вычислены коэффициенты  $a_1$  при переменной  $x$ , показывающие степень влияния независимой переменной на зависимую. Согласно рис. 2, увеличение деформаций приводит к росту активности АЭ, причем в случае наклонного расположения слоев в композите скорость этого роста максимальна, что, вероятно, связано с преобладанием сдвиговых напряжений. Совершенно иная

картина наблюдается при горизонтальном расположении слоев (рис. 2в). В этом случае с увеличением деформации активность АЭ падает. Такая закономерность связана с тем, что на начальных уровнях нагружения происходит закрытие существующих пор и трещин. Дальнейшее нагружение не приводит к значительному росту дефектов из-за высокой поперечной прочности материала, обусловленной горизонтальным расположением армирующих слоев композита.

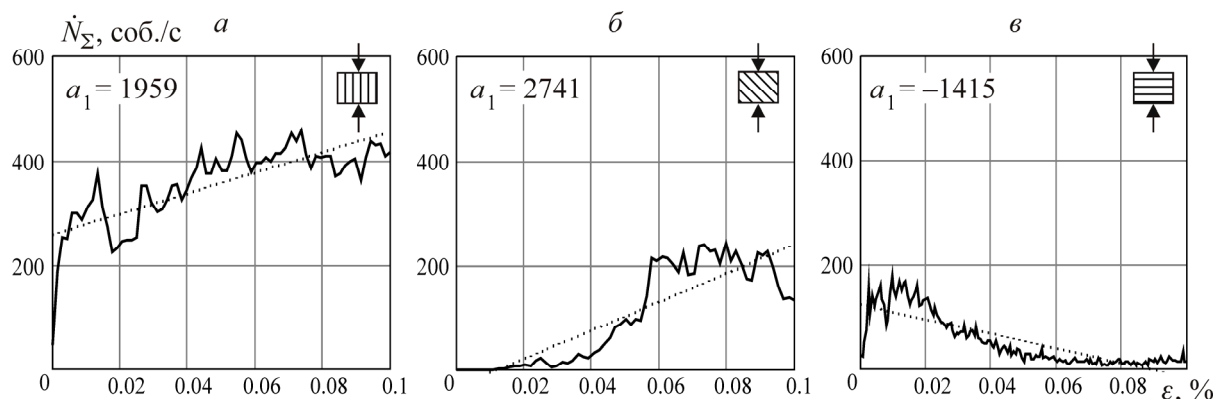


Рис. 2. Пример зависимостей  $\Delta \dot{N}_\Sigma(\varepsilon)$ , характеризующих акустико-эмиссионную тензочувствительность текстолита при направлении одноосного нагружения, составляющем с направлением слоев углы  $0^\circ$  (а),  $45^\circ$  (б) и  $90^\circ$  (в)

Наряду со скоростью нарастания активности АЭ при увеличении деформации важным информативным параметром является уровень акустического сигнала — абсолютное значение величины  $\Delta \dot{N}_\Sigma$ , характеризующее степень интенсивности дефектообразования в материале. Стоит иметь в виду, что на уровень акустического сигнала оказывает существенное влияние тип материала, размер и форма изготовленных из него образцов, поэтому данным параметром можно пользоваться только для сравнения аналогичных образцов.

Во второй части лабораторных исследований рассматривались закономерности проявления акустико-эмиссионного эффекта памяти в исследуемых слоистых композиционных материалах. В рамках первого цикла нагружения все образцы подвергались одноосному установочному нагружению  $\sigma_{уст}$  до уровня 20 МПа. Через 24 ч образцы нагружались повторно до уровня тестовой нагрузки  $\sigma_{тест} > \sigma_{уст}$ . Проявление АЭЭП во втором цикле нагружения показано на рис. 3 на примере образца стеклотекстолита.

Отчетливое проявление эффекта памяти наблюдается только в случае угла между направлением приложения нагрузки и плоскостью слоев композита, равного  $45^\circ$  (рис. 3б). Очевидно, что отсутствие АЭЭП при горизонтальном расположении слоев (рис. 3в) связано с недостаточным образованием дефектов на стадии формирования эффекта памяти в первом цикле нагружения. Отсутствие явного проявления АЭЭП в случае вертикального расположения слоев (рис. 3а) связано с тем, что при таком нагружении происходит процесс активного трещинообразования, связанного с низкой прочностью межслоевого сцепления в композите. Процесс активного дефектообразования иллюстрируется на рис. 2, где в случае вертикального расположения слоев активность акустической эмиссии значительно превосходит соответствующую величину при горизонтальном и наклонном расположении слоев. Во втором цикле нагружения при вертикальном расположении слоев (см. рис. 3а) момент проявления эффекта памяти оказывается “зашумленным” акустической эмиссией, вызванной разрушением межслоевых связей в композите. Сводные результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 2.

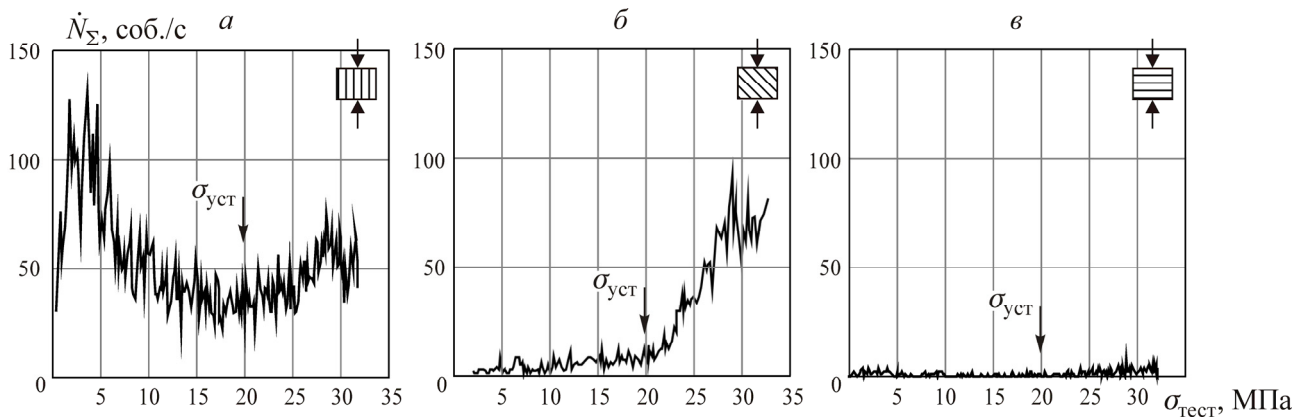


Рис. 3. Пример зависимостей  $\dot{N}_{\Sigma}(\varepsilon)$  для стеклотекстолита во втором цикле одноосного нагружения, направление которого по отношению к направлению слоев композита составляет угол  $0^\circ$  (а),  $45^\circ$  (б) и  $90^\circ$  (в)

В качестве информативных параметров приведены угол  $\gamma$  между направлением нагружения и плоскостью слоев композита, коэффициент  $a_1$  регрессионной прямой для тензочувствительности и относительная погрешность воспроизведения АЭЭП  $\Delta_{ЭП}$ .

ТАБЛИЦА 2. Результаты экспериментальных исследований

Материал	$\gamma$ , град	$a_1$	$\Delta_{ЭП}$ , %
Стеклотекстолит	0	1959	АЭЭП не наблюдался
	45	2741	4.1
	90	-1415	АЭЭП не наблюдался
Текстолит	0	2148	» »
	45	2654	3.7
	90	-1027	АЭЭП не наблюдался
Гетинакс	0	2341	» »
	45	3049	7.4
	90	-421	АЭЭП не наблюдался

Из табл. 2 видно, что установленные закономерности справедливы для всех исследованных материалов. Низкое значение коэффициента  $a_1$  для гетинакса в случае горизонтального расположения слоев связано с его низкой прочностью на растяжение вдоль слоев, а также более однородным строением (см. рис. 1в).

#### МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ НДС МАССИВА НА ОСНОВЕ УСТАНОВЛЕННЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ

Установленные закономерности возможно использовать при контроле НДС в конструктивных элементах систем разработки, в первую очередь при оценке направления действия максимального напряжения в ленточных целиках. Суть метода заключается в следующем. В измерительном шпуре, пробуренном в целике в направлении перпендикулярном оси горной выработки, жестко закрепляются диски, изготовленные из стеклотекстолита. При этом каждый последующий диск ориентируют так, чтобы направление слоев отличалось от предыдущего на определенный угол ( $15-30^\circ$ ). Количество дисков и угол между направлением слоев в композите в конечном итоге задают угловую разрешающую способность определения направления максимального напряжения. Схема реализации метода представлена на рис. 4.

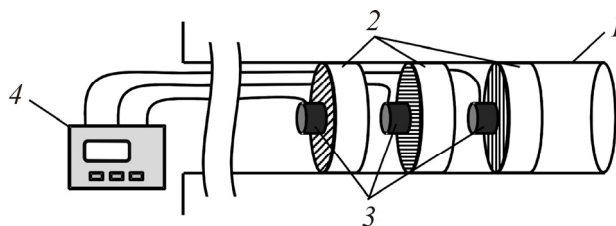


Рис. 4. Схема реализации контроля направления максимального напряжения: 1 — измерительный шпур; 2 — диски из стеклотекстолита; 3 — преобразователи АЭ; 4 — измерительный блок

Под действием напряжений в массиве размещенные в шпуре диски начинают деформироваться, что приводит к росту активности акустической эмиссии, регистрируемой многоканальным акустико-эмиссионным измерительным комплексом. При этом характер эмиссии будет изменяться в зависимости от расположения диска. Из всех дисков выбирают тот, которому соответствует активность АЭ, характеризующаяся отрицательным коэффициентом  $a_1$ , и по углу между наклоном слоев в этом диске и горизонталью судят о направлении действия максимального напряжения в целике.

Одним из основных недостатков сформулированного в [9] метода контроля НДС было ограничение длительности проявления акустико-эмиссионного эффекта памяти в композите, которая не превышала 30 сут. Метод, описанный выше, лишен этого недостатка. Кроме того, использование стеклотекстолита, обладающего повышенной прочностью и модулем упругости, позволяет расширить диапазон типов горных пород, в которых возможно проведение контроля.

Другой вариант метода контроля подразумевает развитие идеи оценки изменения напряженного состояния породного массива, изложенной в [11]. Суть предлагаемого метода заключается в следующем. Из стеклотекстолита изготавливаются диски и подвергаются одноосному установочному нагружению до уровня  $\sigma_{уст}$  в стальных пуансонах так, чтобы направление нагружения составляло угол  $\gamma = 45^\circ$  по отношению к направлению слоев в композите. Подготовленные таким образом диски снабжаются преобразователями акустической эмиссии и размещаются на заданной глубине в параллельных измерительных шпурах, находящихся в зоне контроля. Каждый из дисков поворачивают на некоторый фиксированный угол и жестко закрепляют в шпуре. Преобразователи АЭ подключают к блоку регистрации и анализа акустической эмиссии. Общая схема реализации контроля напряжений в массиве представлена на рис. 5.

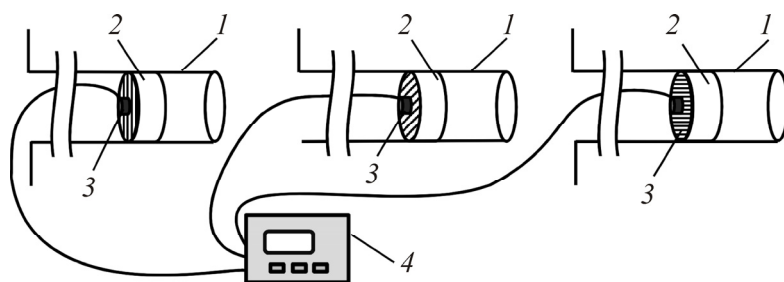


Рис. 5. Схема реализации контроля НДС: 1 — измерительные шпуры; 2 — диски из стеклотекстолита; 3 — преобразователи АЭ; 4 — измерительный блок

При достижении в массиве по одному из направлений напряжения, равного  $\sigma_{уст}$ , в диске, направление слоистости которого отличается от направления действия максимального напряжения в массиве на  $45^\circ$ , проявляется АЭЭП, регистрируемый измерительным блоком. Во всех остальных дисках происходит рост активности АЭ, но не проявляется эффект памяти (см. рис. 3). Таким образом, по номеру диска, в котором отмечен АЭЭП, определяют направление

действия максимального напряжения. При этом факт “срабатывания” такого диска-сигнализатора является признаком того, что максимальным напряжением в массиве превышен порог приращений напряжений, равный  $\sigma_{уст}$ .

### ВЫВОДЫ

Применение размещаемых в контрольных скважинах композиционных материалов с известными и постоянными свойствами для контроля напряженно-деформированного состояния породного массива является перспективным направлением экспериментальной геомеханики. В рамках развития этого направления особый интерес представляет использование естественной анизотропии в композиционных материалах, размещаемых в породном массиве. Эта анизотропия оказывает существенное влияние на проявление акустической эмиссии при линейном одноосном нагружении образцов, а также на акустико-эмиссионный эффект памяти в них.

Экспериментально установленные закономерности такого влияния позволяют создать методы контроля НДС массива, обеспечивающие получение информации об изменении как направления, так и приращений напряжений в режиме мониторинга. Реализация данных методов станет одним из факторов увеличения безопасности ведения горных работ и оперативности принятия технологических решений, повышающих эффективность подземной разработки полезных ископаемых.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ямщиков В. С., Шкуратник В. Л., Лавров А. В. Эффекты памяти в горных породах (обзор) // ФТПРПИ. — 1994. — № 5.
2. Holcomb D. J. Using acoustic emission to determine in situ stress: problems and promise. In: Geomechanics, 1983, Vol. 57, ASME, AMD.
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. Yoshikawa S., Mori K. A new method for estimation of the crustal stress from rock samples: laboratory study in the case of uniaxial compression, Technophysics, 1981; 74:323-39.
5. 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 rock mass, Rock Mechanics and Rock Engineering, 2001, Vol. 34.
6. Ямщиков В. С., Шкуратник В. Л., Лыков К. Г. Измерение напряжений в массиве горных пород на основе эмиссионных эффектов памяти // ФТПРПИ. — 1990. — № 2.
7. Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса / В. М. Баранов, А. И. Гриценко, А. М. Красевич и др. — М.: Наука, 1998.
8. Шкуратник В. Л., Николенко П. В. Об использовании эффекта Кайзера в эпоксидной смоле с кварцевым наполнителем для оценки напряжений в массиве горных пород: сб. ст. // Отд. вып. ГИАБ. — М.: Горная книга, 2012.
9. Шкуратник В. Л., Николенко П. В. Об использовании акустико-эмиссионного эффекта памяти в композиционном материале для контроля критических напряжений в массиве горных пород // ФТПРПИ. — 2013. — № 4.
10. Николенко П. В., Цариков А. Ю. Лабораторный стенд для механических и акустико-эмиссионных испытаний образцов композиционных материалов // ГИАБ. — М.: Горная книга, 2013. — № 4.
11. Пат. 2485314 РФ. Способ определения изменения напряженного состояния горного массива / В. Л. Шкуратник, П. В. Николенко, А. В. Корчак. — № 2011147713/03; заявл. 24.11.11; опубл. 20.06.13, Бюл. № 17.

Поступила в редакцию 13/V 2014