УДК 622.02:539.2

П.В. Николенко, М.Д. Чепур

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА В ОКРЕСТНОСТЯХ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ*

Аннотация. Предлагается обоснование способов оценки динамики напряженно-деформированного состояния массива в окрестностях горных выработокна основе эмиссионных эффектов в композиционных материалах. Подробно представлены требования к акустическим свойствам таких композитов, в том числе к их акустико-эмиссионной тензочувствительности. Приводится сравнительный анализ тензочувствительности для некоторых композитов и горных пород. Предложен новый эффективный алгоритм цензурирования образцов, основанный на прозвучивании композитов ультразвуковым шумовым сигналом и корреляционной обработке зарегистрированных импульсов. Алгоритм позволяет выявлять дефекты структуры, которые невозможно выявить традиционными время-импульсными методами. Рассматриваются методы и аппаратурное обеспечение, позволяющие производить мониторинг изменения во времени таких параметров, как расстояние зоны опорного давления относительно контура выработки, а также величина приращения максимального главного напряжения в этой зоне. Отмечается возможность применения способов для сигнализации о превышении указанными параметрами заранее заданных критических уровней, характерных для потери выработками их устойчивости.

Ключевые слова: эффект Кайзера, напряженно-деформированное состояние, массив горных пород, контроль, ультразвук, цензурирование.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-134-141

Введение

Наличие надежной информации о параметрах и динамике напряженно-деформированного состояния (НДС) массива в окрестностях горных выработок является необходимым условием прогноза их устойчивости [1]. Получение такой информации осуществляется сегодня с использованием разнообразных геологических, механических и геофизических методов, каждый из которых имеет свои достоинства, недостатки и приоритетные области применения. Так геологические методы относительно просты, но используются только для приближенного предварительного изучения НДС. Механические методы (например, методы разгрузки) позволяют получать относительно точные оценки НДС, но только в локальных не значительных по размерам участках геологической среды. Кроме того, они чрезвычайно трудоемки и не могут быть реализованы в режиме мониторинга. Геофизические методы обеспечивают от-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-77-10009).

© П.В. Николенко, М.Д. Чепур. 2018.

носительно высокую производительность контроля, нопозволяют лишь качественно оценивать параметры и пространственное распределение поля напряжений в массиве на различных масштабных уровнях [2—6].

Отмеченное определяет актуальность поиска принципиально новых методических подходов для получения количественной информации о НДС массива в окрестностях выработок. Один из таких подходов заключается в использовании акустико-эмиссионных эффектов в композиционных материалах различного состава и строения, размещаемых в контролируемых объектах в виде датчиков-сигнализаторов [7]. Необходимым шагом в развитии такого подхода является обоснование конкретных способов его реализации и требований к соответствующим композиционным материалам. Именно этим вопросам посвящена настоящая работа, в которой обсуждаются необходимые свойства указанных материалов и предлагаются способы контроля изменения во времени расстояния от контура выработки до зоны опорного давления, а также величины приращения максимального главного напряжения в этой зоне.

Выбор композиционных материалов для контроля напряжений

Одним из важных требований к композиционным материалам является необходимость обеспечения их высокой акустико-эмиссионной тензочувствительности S_{AE}. Последняя отражает степень влияния продольной относительной деформации ε образца на уровень активности акустической эмиссии N. Экспериментально для различных композиционных материалов были установлены следующие значения S_{AE}: текстолит ПТК — 1941; пьезокерамика ЦТС-19 — 1536; эпоксидная смола с наполнителем из кварцевого песка — 945. Для сравнения была проведена оценка S_{AE} для мрамора Кибик-Кордонского месторождения, для которого оно составило 18,7. На рис. 1 представлены зависимости $N(\varepsilon)$ для текстолита ПТК и указанного мрамора.

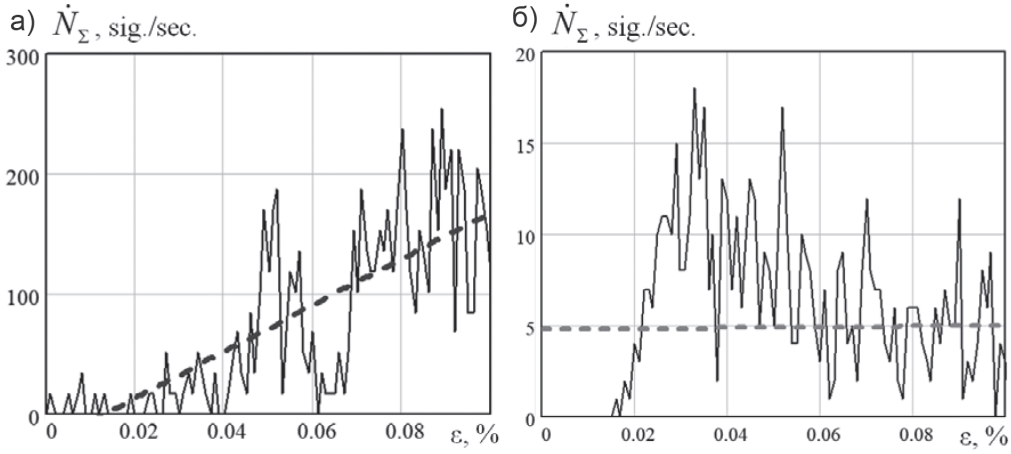

Рис. 1. Пример зависимостей $\dot{N}_\Sigma(\varepsilon)$, характеризующих акустико-эмиссионную тензочувствительность текстолита (а) и мрамора Кибик-Кордонского месторождения (б) при одноосном нагружении (пунктиром отмечена линия регрессии)

Fig. 1. An example of the dependencies characterizing the acoustic-emission tenosensitivity of PCB (a) and marble of the Kibik-Kordonskoye deposit (b) under uniaxial loading (the regression line was marked with a dashed line)

Следует отметить, что для образцов из анизотропных композиционных материалов тензочувствительность сильно зависит не только от значений продольных деформаций, но и от направления приложенной нагрузки, как это имеет место, например, для стеклотекстолита марки СТЭФ. Подобное свойство может быть использовано для определения направления и величины главного максимального главного напряжения в массиве [7].

Применение композитов для оценки напряженно-деформированного состояния пород не ограничивается использованием промышленно выпускаемых материалов. Современный уровень развития компонентов позволяет синтезировать новые материалы с заранее прогнозируемыми механическими и акустическими свойствами. При этом на первый план выходит необходимость первичного контроля однородности свойств образцов, а значит цензурирования их выборок. Ниже приводятся результаты подобной операции с использованием активного ультразвукового прозвучивания.

В лабораторных условиях была подготовлена серия из 5 образцов, предназначенных для оценки величин приращений напряжений в массиве на основе АЭП. Образцы представляли собой цилиндры диаметром 45 мм и высотой 90 мм, изготовленные из эпоксидной смолы с наполнителем из дисперсно распределенных углеродных волокон толщиной 15 мкм и длиной 3 мм. Для цензурирования выборки все образцы прозвучивались вдоль диаметра импульсными ультразвуковыми (УЗ) сигналами с целью определения скорости V_p распространения продольных волн в них, а также шумовыми широкополосными сигналами по методике, описанной в [8]. При этом основным информативным параметром такого прозвучивания являлся интервал корреляции τ_{cor} принятого сигнала

$$\tau_{cor} = \frac{1}{B(0)} \int_0^{\infty} B(\tau)\, d\tau, \qquad (1)$$

где $B(\tau)$ — автокорреляционная функция принятого сигнала.

На рис. 2 результаты прозвучивания всех 5 образцов представлены в виде процентного изменения информативных параметров V_p и τ_{cor} относительно первого образца серии. Видно, что при прозвучивании последнего образца было зарегистрировано более чем 25% (относительно среднего) возрастание τ_{cor}, которое свидетельствует об увеличении степени гармоничности сигнала, что связано с потерей части высокочастотных спектральных составляющих шумового

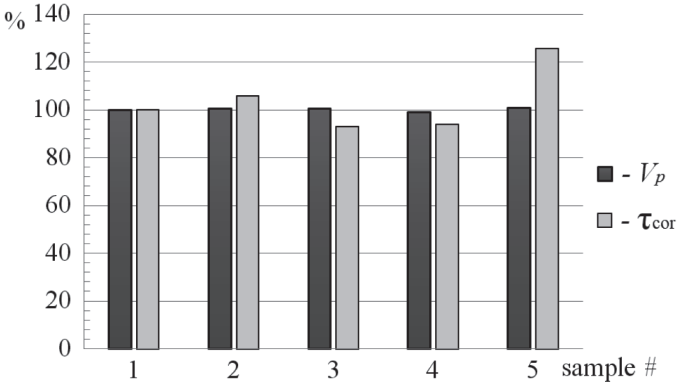

Рис. 2. Результаты цензурирования образцов композиционных материалов УЗ методом
Fig. 2. Results of composite materials samples censoring by ultrasound method

сигнала. Подобная потеря характерна для сигналов, проходящих по трещиноватым и пористым областям среды, которые проявляют себя как фильтры низких частот.

Для подтверждения результатов цензурирования образец № 5 был разрезан вдоль оси и в нем была обнаружена зона скопления воздушных пузырьков, что связано с нарушением технологи получения материала. Представленные на рис. 2 результаты свидетельствуют также о том, что шумовое корреляционное прозвучивание более эффективно для цензурирования, чем традиционное время-импульсное прозвучивание. В качестве критерия отбраковки следует принимать уровень отклонения информативного параметра за пределы одного среднеквадратического отклонения.

Другое требование, предъявляемое к композиционным материалам, заключается в проявлении в них так называемого акустико-эмиссионного эффекта памяти (АЭП). АЭП или эффект Кайзера заключается вне воспроизводимости параметров акустической эмиссии (АЭ) при циклическом нагружении материала [9, 10]. В частности, при двух циклах его одноосного нагружения во втором из них будет наблюдаться скачкообразныйрост параметров АЭ только при достижении напряжением максимального значения первого цикла. Другими словами, материал, обладающий исходной дефектностью, может «запоминать» информацию о ранее испытанном уровне механических напряжений, сохранять ее в течение некоторого времени и затем воспроизводить при повторном нагружении. Образец из подобного материала можно нагружать в лабораторных условиях до определенного критического уровня, а затем размещать в измерительной скважине в массиве. В момент, когда напряжения в массиве в области размещения такого сигнализатора сравняются с заданным критическим уровнем, в образце проявится АЭП, который может быть зарегистрирован эмиссионной измерительной аппаратурой по пороговому принципу.

При контроле напряжений на основе АЭП должен учитываться ряд специфических требований, предъявляемых к используемым композиционным материалам. Так, подобные материалы должны обладать относительно высокой степенью однородности акустических и физико-механических свойств.

Действительно, опыт использования АЭП для определения напряжений в образцах горных пород, свидетельствует о том, что неоднородность последних существенно снижает достоверность соответствующих результатов измерений [11].

В [12] показано, что при трехосном осесимметричном нагружении образца геоматериала в I цикле и одноосном — во II, АЭП во II цикле проявляется при напряжении

$$\sigma_{1*}^{II} = \sigma_2^{I} - (k+1)\sigma_2^{I}, \qquad (2)$$

где σ_1 и σ_2 — осевое и боковое напряжения, соответственно; k — коэффициент, индивидуальный для каждого геоматериала и изменяющийся в зависимости от его типа и однородности в пределахот 0 до 4. Очевидно, что соотношение (2) справедливо и для композитов, а значит, требование к их однородности является принципиально важным для постоянства характерного для конкретного композита коэффциента k, тем более, что трудоемкость его определения чрезвычайно высока.

Использование промышленно изготавливаемых или лабораторно синтезированных композитов с постоянными свойствами позволяет, единожды определив коэффициент k для конкретного материала, использовать его в дальнейшем для соответствующих расчетов.

Способы контроля пространственно-временной динамики напряжений в окрестностях горной выработки

Сущность первогоиз предлагаемых способов заключается в следующем. На полом металлическом волноводе длиной *l* и известной скоростью распространения продольных упругих волн в нем V_p последовательно с равным шагом закрепляют диски, изготовленные из текстолита. На торцах волновода закрепляют пьезоэлектрические приемники (ПЭП) акустической эмиссии, подключаемые к акустико-эмиссионному измерительному комплексу. Подготовленный таким образом волновод помещают и жестко закрепляют в измерительной скважине, пробуренной вглубь массива перпендикулярно контуру выработки. С течением времени текстолитовые кольца начинают воспринимать нагрузку σ от стенок деформирующейся скважины. С момента установки волновода в скважине начинается регистрация акустической эмиссии на обоих торцах волновода. Наибольшие деформации будет испытывать кольцо, находящееся в области максимума σ_a зоны опорного давления и, соответственно, оно же будет источником сигналов акустической эмиссии с наибольшей амплитудой *A*. Со време-

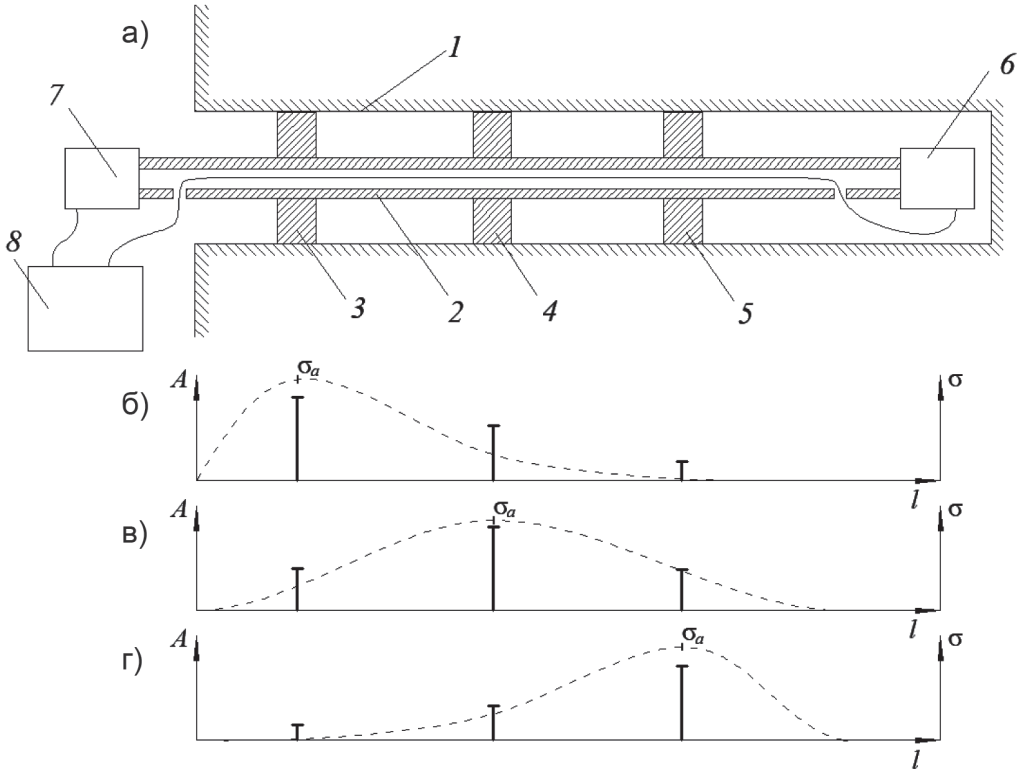

Рис. 3. Схема контроля зоны опорного давления (а) и варианты зависимостей A(l) для трех дисков при различных вариантах пространственного положения зоны опорного давления (b, c, d): 1 — измерительная скважина; 2 — полый металлический волновод; 3—5 — текстолитовые кольца; 6, 7 — приемные преобразователи; 8 — акустико-эмиссионный измерительный комплекс

Fig. 3. Control scheme of the principalstress zone (a) and variants of dependencies A(l) for three disks with different variants of the spatial position of the principalstress zone. (b, c, d): 1 — measuring well; 2 — hollow metal waveguide; 3—5 — PCB rings; 6, 7 — receiving transducers; 8 — acoustic-emission measuring system

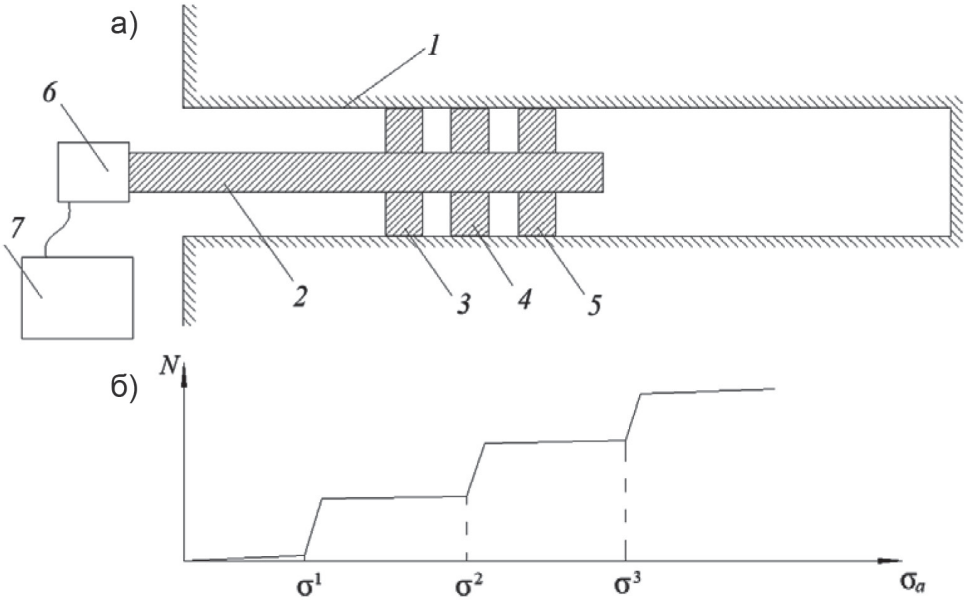

Рис. 4. Схема контроля напряжений (а) и зависимость N(σ_a) для трех дисков и трех уровней напряжений (b): 1 — измерительная скважина; 2 — металлический волновод; 3—5 — текстолитовые кольца; 6 — приемный преобразователь; 8 — акустико-эмиссионный измерительный комплекс

Fig. 4. The stress control scheme(a) and the N(σ_a) dependence for three disks and three stress levels (b): 1 — measuring well; 2 — metallic waveguide; 3—5 — PCB rings; 6 — receiving transducer; 8 — acoustic-emission measuring system

нем по мере развития нарушений приконтурной области массива зона опорного давления будет смещаться вглубь массива, что приведет к перераспределению давлений на кольца, и, в свою очередь, вызовет снижение величины *A* на одних кольцах и ее увеличение на других, находящихся на большей глубине. Расстояние *L* от контура выработки до максимума зоны опорного давления определяют по формуле

$$L = \frac{l - \Delta t \cdot V_p}{2}, \qquad (3)$$

где Δt — разность времен прихода АЭ событий с максимальной амплитудой на приемные ПЭП.

На рис. 3 представлена схема контроля и примеры зависимостей *A*(*l*) для различных расстояний от контура выработки до σ_a. Следует также отметить, что увеличить пространственное разрешение метода возможно путем увеличения количества колец на волноводе.

Другой способ является логическим продолжение первого. Основное отличие заключается в том, что каждый текстолитовый диск перед помещением в скважину в лабораторных условиях нагружается вдоль диаметра до определенного критического уровня. Таким образом, формируется серия дисков с акустико-эмиссионной памятью разных уровней σ_i (где *i* — номер диска). Подготовленные таким образом диски, закрепленные на волноводе с акустическим преобразователем, помещаются в скважину и закрепляются в зоне опорного давления, местоположение которой определяют первым способом. Со временем стенки скважины деформируются, и нагрузка от массива передается на диски. В момент достижения значением σ_a уровня σ_1 в первом кольце проявляется АЭП, выра-

жающийся в резком изменении крутизны графика суммарного счета АЭ *N*. При дальнейшем росте σ_a будут последовательно «срабатывать» остальные кольца, формируя дискретное представление об абсолютных значениях приращений напряжений в исследуемой приконтурной области массива. Схема измерений и пример зависимости $N(\sigma_a)$ представлены на рис. 4.

Использование акустико-эмиссионных эффектов в композиционных материалах, размещаемых в контрольных скважинах исследуемого массива, является перспективным направлением исследования динамики НДС в нем. В рамках этого направления могут быть решены задачи контроля изменений положения зоны опорного давления в окрестностях горных выработок и величины напряжения в этой зоне. Эффективность решения указанных задач во многом определяется правильным выбором композиционных материалов и возможностью управления их свойствами. Дальнейшие исследования должны быть направлены на установление закономерностей проявления акустико-эмиссионных эффектов в композитах в условиях сложного напряженного состояния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баклашов И. В.* Геомеханика. Т.1. Основы геомеханики. — М.: МГГУ, 2004. — 208 с.
2. *Шкуратник В. Л.*, *Николенко П. В.* Методы определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород. — М.: МГГУ, 2012. — 113 с.
3. *Espada M., Lamas L.* Back Analysis Procedure for Identification of Anisotropic Elastic Parameters of Overcored Rock Specimens // Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, Vol. 50, Issue 3, Pp. 513—527.
4. *Petr W., Lubomir S., Jan N., Petr K., Tomas K.* Determination of stress state in rock mass using strain gauge probes CCBO // Procedia Engineering, 2016, Vol. 149, Pp. 544—552.
5. *Огильви А. А.* Основы инженерной геофизики. — М.: Недра, 1990. — 501 с.
6. *Li Q., He J.-J., Li C.-X.* Relationship between the ultrasonic velocities and strata pressure of the coalbed methane reservoir in qinshui basin by rock physical testing // Wutan Huatan Jisuan Jishu, 2013, Vol. 35, Iss. 4, pp. 382—386.
7. *Nikolenko P. V.*, *Shkuratnik V. L.* Acoustic emission in composites and applications for stress monitoring in rock masses // Journal of Mining Science, 2014, Vol. 50, Issue 6, Pp. 1088—1093.
8. *Shkuratnik V. L.*, *Nikolenko P. V.*, *Kormnov A. A.* Change in the correlation characteristics of acoustic noise in sonic testing of rocks under uniaxial mechanical loading // Gornyi Zhurnal, 2016, Vol. 2016, Issue 6, Pp. 60—63.
9. *Lavrov A.* The Kaiser effect in rocks: Principles and stress estimation techniques, International // Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, Vol. 40, Issue 2, pp. 151—171.
10. *Li C.* A theory for the Kaiser effect and its potential applications / Proc. 6th Conf. AE/MA in Geologic Structures and Materials. Clausthal-Zellerfeld, Trans Tech Publications, 1998, Pp. 171—185.
11. *Holcomb D. J.*, *Costin L. S.* Detecting damage surfaces in brittle materials using acoustic emissions // Journ. Appl. Mech. Trans. ASME, 1986, Vol. 53, No. 3, Pp. 536—544.
12. *Шкуратник В. Л.*, *Лавров А. В.* Эффект Кайзера в горных породах, испытавших трехосное нагружение // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2002. — № 1. — С. 52—61. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Николенко Петр Владимирович[1] — кандидат технических наук, доцент,
Чепур Мария Дмитриевна[1] — студент,
[1] МГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: ftkp@mail.ru.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 12, pp. 134–141.

Using acoustic emission phenomena in composites for the stress–strain analysis of rocks surrounding an underground excavation

Nikolenko P.V.[1], Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Chepur M.D.[1], Student,
[1] Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia, e-mail: ftkp@mail.ru.

Abstract. The article substantiates the methods for the dynamic stress–strain analysis of rocks around an underground excavation based on emission phenomena in composite materials. The detailed requirements to the acoustic properties of such composites, including strain sensitivity for acoustic emission, are presented. Strain sensitivities of some composites and rocks are compared. The new efficient algorithm of censoring proposed in the article includes ultrasonic scanning of composites and correlation processing of recorded noise pulses. The algorithm enables revealing structural defects undetectable using conventional time–impulse methods. The scope of the article also encompasses the methods and equipment for monitoring temporal variation in such parameters as distance between the abutment pressure zone and the excavation boundary, or major principal stress increment in the abutment pressure zone. It is emphasized that the proposed methods are applicable for warning when the mentioned parameters exceed the preset critical levels characterizing instability of underground excavations.

Key words: Kaiser effect, stress–strain analysis, rock mass, control, ultrasound, censoring.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-134-141

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 17-77-10009.

REFERENCES

1. Baklashov I.V. *Geomekhanika*. T.1. Osnovy geomekhaniki [Geomechanics. Vol. 1. Fundamentals of geomechanics], Moscow, MGGU, 2004, 208 p.

2. Shkuratnik V.L., Nikolenko P.V. *Metody opredeleniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massiva gornykh porod* [Methods of stress–strain analysis of rock mass], Moscow, MGGU, 2012, 113 p.

3. Espada M., Lamas L. Back Analysis Procedure for Identification of Anisotropic Elastic Parameters of Overcored Rock Specimens. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, Vol. 50, Issue 3, Pp. 513—527.

4. Petr W., Lubomir S., Jan N., Petr K., Tomas K. Determination of stress state in rock mass using strain gauge probes CCBO. *Procedia Engineering*, 2016, Vol. 149, Pp. 544—552.

5. Ogil'vi A.A. *Osnovy inzhenernoy geofiziki* [Fundamentals of engineering geophysics], Moscow, Nedra, 1990, 501 p.

6. Li Q., He J.-J., Li C.-X. Relationship between the ultrasonic velocities and strata pressure of the coalbed methane reservoir in qinshui basin by rock physical testing. *Wutan Huatan Jisuan Jishu*, 2013, Vol. 35, Iss. 4, pp. 382—386.

7. Nikolenko P.V., Shkuratnik V.L. Acoustic emission in composites and applications for stress monitoring in rock masses. *Journal of Mining Science*, 2014, Vol. 50, Issue 6, Pp. 1088—1093.

8. Shkuratnik V.L., Nikolenko P.V., Kormnov A.A. Change in the correlation characteristics of acoustic noise in sonic testing of rocks under uniaxial mechanical loading. *Gornyi Zhurnal*, 2016, Vol. 2016, Issue 6, Pp. 60—63.

9. Lavrov A. The Kaiser effect in rocks: Principles and stress estimation techniques, International. *Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, Vol. 40, Issue 2, pp. 151—171.

10. Li C. A theory for the Kaiser effect and its potential applications. *Proc. 6th Conf. AE/MA in Geologic Structures and Materials*. Clausthal-Zellerfeld, Trans Tech Publications, 1998, Pp. 171—185.

11. Holcomb D.J., Costin L.S. Detecting damage surfaces in brittle materials using acoustic emissions. *Journ. Appl. Mech. Trans. ASME*, 1986, Vol. 53, No. 3, Pp. 536—544.

12. Shkuratnik V.L., Lavrov A.V. Effekt Kayzera v gornykh porodakh, ispytavshikh trekhosnoe nagruzhenie [Kaiser effect in rocks subjected to triaxial compression]. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2002, no 1, pp. 52—61. [In Russ].