

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАГРЕВА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОРОДНОМ МАССИВЕ

П.В. Николенко<sup>1</sup>, В.Л. Шкуратник<sup>1</sup>, М.Д. Чепур<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: p.nikolenko@misis.ru

**Аннотация:** Точность традиционных ультразвуковых методов контроля напряженно-деформированного состояния часто оказывается недостаточной из-за малой акустической тензочувствительности горных пород — параметра, описывающего изменение скорости продольной волны при деформировании образцов. Полученные ранее экспериментальные данные указывают на то, что нагрев горных пород может значительно увеличить указанную тензочувствительность. На основании полученных закономерностей разработан метод контроля напряженно-деформированного состояния приконтурного массива, позволяющего с повышенной точностью определять величину механического напряжения, действующего вдоль заданного направления. В лабораторных условиях проведена оценка эффективности и границ применения предлагаемого метода. Исследования проводились на 7 видах горных пород, отличающиеся по структуре, плотности и пористости, а также на модельном образце из дюралюминия Д16Т с нулевым уровнем дефектности. Каждый образец подвергался ультразвуковому прозвучиванию в заданных условиях температурного (от 25 до 100 °С) и механического (от 0 до 10 МПа) воздействий. По полученным информативным параметрам был определен показатель тензочувствительности геоматериала. Установлено, что наибольшее изменение тензочувствительности в условиях повышенных температур характерно для пород с высокими модулями упругости и низким коэффициентом пористости. Анализ затухания ультразвуковых показал, что основной причиной роста акустической тензочувствительности является образование микротрещин под действием температуры.

**Ключевые слова:** термобарическое воздействие, горные породы, тензочувствительность, ультразвук, контроль, напряженное состояние.

**Благодарность:** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-05-00152).

**Для цитирования:** Николенко П. В., Шкуратник В. Л., Чепур М. Д. Использование нагрева для повышения чувствительности ультразвукового метода контроля напряжений в породном массиве // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11. – С. 159–168. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_11\_0\_159.

### Sensitization of ultrasonic stress control in rock mass by heating

P.V. Nikolenko<sup>1</sup>, V.L. Shkuratnik<sup>1</sup>, M.D. Chepur<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia,  
e-mail: p.nikolenko@misis.ru

---

**Abstract:** Conventional ultrasonic stress–strain behavior control often lacks precision due to low acoustic strain sensitivity—the characteristic of change in P-wave velocity in rocks during deformation. The previous experimental evidence implies that heating of rocks can enhance essentially their strain sensitivity. Using the obtained patterns, a method is developed for the stress–strain behavior control in adjacent rocks at the extended precision of determination of mechanical stresses along a preset direction. The method efficiency and application range are estimated at a laboratory scale. The tests were carried out on 7 types of rocks, with different structure, density and porosity, as well as on the model duralumin D16T sample with no defects (zero imperfection). Each sample was subjected to ultrasonic sounding at the assigned temperature (from 25 to 100 °C) and mechanical effect (from 0 to 10 MPa). The obtained informative parameters were used to determine the strain sensitivity index of a sample material. The largest variation in the strain sensitivity under higher temperatures is typical of rocks possessing high modulus of elasticity and low ratio of porosity. The ultrasound attenuation analysis shows that the main cause of the increasing acoustic strain sensitivity is the temperature-induced micro-fissuring.

**Key words:** thermobaric effect, rocks, strain sensitivity, ultrasound, control, stress state.

**Acknowledgements:** This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 19-05-00152).

**For citation:** Nikolenko P. V., Shkuratnik V. L., Chepur M. D. Sensitization of ultrasonic stress control in rock mass by heating. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11):159-168. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_11\_0\_159.

---

## Введение

Инженерные решения, обеспечивающие безопасную эксплуатацию подземных месторождений полезных ископаемых, должны основываться на надежной информации о состоянии нетронутого породного массива и конструктивных элементов систем разработки. На основе анализа публикаций можно выделить основные направления получения подобной информации и работы с ней. Одно из направлений — геофизические исследования, которые, в основном, используются для поиска структурных неоднородностей в массиве. В частности, они позволяют выявлять зоны повышенной трещиноватости в целиках и отработываемых пластах [1, 2], определять области высоких напряжений и отслеживать как тектонические разломы и выработанное пространство влияют на изменение напряженно-деформированного со-

стояния (НДС) [3], выявлять полости в заобделочном пространстве выработок [4, 5] и пр. Другое направление — исследования НДС, производимые как разрушающими, так и неразрушающими методами, непосредственно в массиве и на образцах [6]. Третий подход — модельные исследования, показывающие, как могут вести себя выработки и массив с учетом информации об их структуре и свойствах [7, 8]. Стоит отметить, что исследования, связанные с термическим воздействием, как на образцы, так и на массив встречаются довольно часто [9–11], однако они редко касаются вопросов оценки НДС, поэтому эту тему стоит оценить как слабо разработанную.

Важнейшим фактором, определяющим конфигурацию будущих выработок, а также безопасное ведение горных работ в существующих выработках, является НДС породного массива. Оценка

величины и направления действия главных напряжений, а также динамики изменения возможна с применением целого ряда геомеханических и геофизических методов. При этом существенно различаются как точность и надежность результатов применения методов, так и сочетание их трудоемкости и стоимости. К методам, обладающим наибольшими возможностями и относительно высокой точностью получаемых оценок, относятся методы разгрузки [12–15] и гидроразрыва скважин [16–19]. Однако высокие трудоемкость и стоимость измерений препятствуют их широкому применению. В ряде случаев при реализации мониторинговых измерений нет необходимости в получении всех параметров тензора напряжений, а достаточно регулярно измерять один заданный параметр, например, величину приращения главного напряжения или положение зоны максимума опорного давления.

Для решения подобных задач возможно использование менее трудоемких

и дорогостоящих методов, основанных на ультразвуковом прозвучивании [20–23] участка массива. Однако, точность таких методов при реализации традиционных подходов часто оказывается низкой из-за малой акустической тензочувствительности многих пород. Повышение тензочувствительности возможно при локальном нагреве породы. Так в [24] указывается на то, что в металлах зависимости скоростей продольных волн  $V_p(\sigma, T)$  от температуры  $T$  и напряжений  $\sigma$  оказываются более информативными, чем просто  $V_p(\sigma)$ . Аналогичные закономерности справедливы и для горных пород. В [25] был исследован ряд осадочных горных пород и показано, что приращения  $V_p$  с ростом  $\sigma$  при  $T = 100\text{ }^\circ\text{C}$  в несколько раз превышают таковые при комнатной температуре. На основе полученных закономерностей был разработан метод контроля НДС приконтурного массива, позволяющий с повышенной точностью измерять величину приращений вертикальных напряжений в целиках

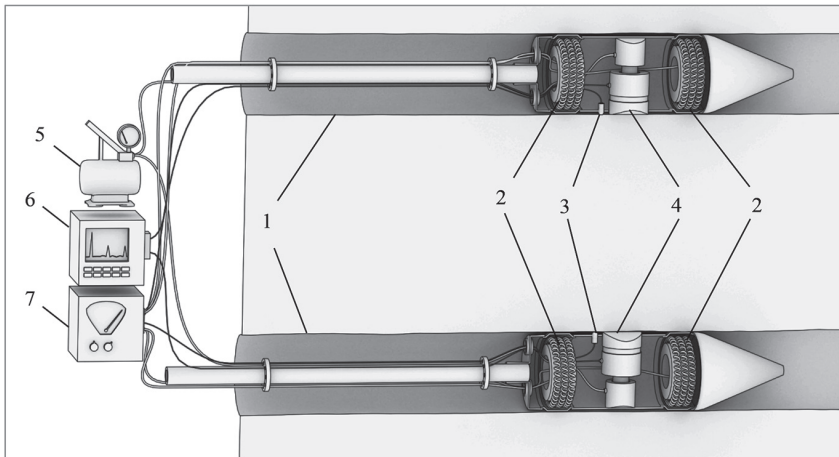


Рис. 1. Схема скважинных измерений: 1 – измерительные скважины; 2 – нагревательные элементы; 3 – термодатчики; 4 – ультразвуковые преобразователи; 5 – насос для пневмоприжима преобразователей; 6 – блок ультразвуковых измерений; 7 – блок контроля температуры

Fig. 1. Layout of borehole measurements: 1 – measurement boreholes; 2 – heating elements; 3 – heat-sensing devices; 4 – ultrasonic transducers; 5 – pumps for air pressure of transducers; 6 – ultrasonic measurement instrumentation 7 – temperature control instrumentation

(а при проведении дополнительных лабораторных испытаний и их абсолютные значения).

Суть метода заключается в следующем. На выбранном участке массива бурятся измерительные скважины, из которых отбирается керн. В лабораторных условиях керн подвергается ультразвуковому прозвучиванию при различных значениях осевого напряжения и заданной температуре  $T^*$ . Таким образом получают экспериментально установленную зависимость  $V_p(\sigma, T^*)$ . В натуральных условиях производят измерения скорости распространения продольных волн в ультразвуковом диапазоне частот на участке пород между скважинами, при этом массив локально нагревают до температуры  $T$  специально сконструированными скважинными ультразвуковыми зондами. Предварительные исследования показывают, что заметный рост чувствительности  $V_p$  к изменениям  $\sigma$  начинается в большинстве пород при температуре 60–70 °С [25]. Истинные значения  $\sigma$  вдоль направления прозвучивания получают по зарегистрированным in-situ значениям  $V_p$  и определенной экспериментально зависимости  $V_p(\sigma, T^*)$ . Схематически реализация метода пред-

ставлена на рис. 1. Описанный выше принцип контроля возможно также реализовать в виде каротажных измерений [26].

Для оценки границ применимости предлагаемого метода, а также степени его эффективности было проведено экспериментальное исследование ряда горных пород и модельных материалов, подвергаемых термобарическим воздействиям.

### Методы

В рамках экспериментов исследовались породы различных генотипов, а также модельный образец с нулевым уровнем дефектности, изготовленный из дюралюминия Д16Т. Характеристики материалов представлены в таблице.

Для экспериментальных исследований изготавливались образцы призматической формы с квадратным основанием шириной 42 мм и высотой 82 мм. В каждой группе было по три однотипных образца. Испытания производились на специально разработанном лабораторном стенде, позволяющем в контролируемых термобарических условиях производить прозвучивание образцов вдоль оси ультразвуковыми им-

### Физико-механические свойства исследованных материалов Physical and mechanical properties of test materials

Материал	Группа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$K_n$	$E_d$ , ГПа
Пористые известняки Сары-Ташского месторождения	И1	1847	29,3%	15,7
Плотные известняки Касимовского месторождения	И2	2266	17,6%	28,3
Доломиты нефтегазоконденсатного месторождения «Жанажол»	Д1	1974	22,7%	19,15
Плотные доломиты Новомосковского гипсового месторождения	Д2	2554	4%	37,9
Мрамор Кибик-Кордонского месторождения	М1	2695	0,37%	35,1
Серпентинит Баженовского месторождения	С1	2532	0,38%	46,1
Гранит Балтийского месторождения	Г1	2890	1,7%	49,7
Модельный материал — дюралюминий марки Д16Т	ДА	2770	0%	74

$\rho$  — объемный вес;  $K_n$  — коэффициент пористости;  $E_d$  — динамический модуль упругости.

пульсами [27]. Диапазон изменения температур составлял от 25 до 100 °С, диапазон значений одноосного нагружения — от 0 до 10 МПа.

### Анализ результатов экспериментов

Основной целью исследований было установление степени эффективности нагрева как фактора, увеличивающего акустическую тензочувствительность геоматериала  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \frac{V_{\max}^T - V_{\min}^T}{\sigma}, \quad (1)$$

где  $V_{\max}^T$  и  $V_{\min}^T$  — максимальные и минимальные значения скоростей продольных волн зависимости  $V_p(\sigma)$  при фиксированной температуре.

Параметр  $\varepsilon$  показывает на сколько изменяется значение  $V_p$  при возрастании нагрузки на 1 МПа при заданной температуре. Результаты вычисления  $\varepsilon$  для  $T = 25\text{ °C}$  и  $T = 100\text{ °C}$  приведены на рис. 2.

Результаты экспериментов можно разделить на две части. Выше пунктирной

линии применение нагрева приводит к повышению чувствительности скорости продольных волн к изменениям нагрузки. Вблизи пунктирной линии и ниже использование нагрева не оказывает существенного влияния на увеличение тензочувствительности пород. Как видно из рис. 2 наибольшее влияние температура оказывает на плотные породы с высокими значениями модулей упругости. Выделяют два основных механизма влияния температуры на скорость продольных волн: образование микротрещин при нагреве [28] и изменение модуля упругости материала [24]. Для изучения влияния второго механизма был исследован образец дюралюминия (материал с отсутствием дефектов). В нем приращение  $V_p$  в диапазоне от 0 до 10 МПа оказывается на уровне погрешности измерительной аппаратуры, в то время как с ростом температуры до 100 °С  $V_p$  изменяется на 9 м/с на каждый 1 МПа нагрузки. Поскольку  $\varepsilon^{100\text{ °C}}$  для образцов дюралюминия относительно невелико, можно предположить, что для остальных исследованных

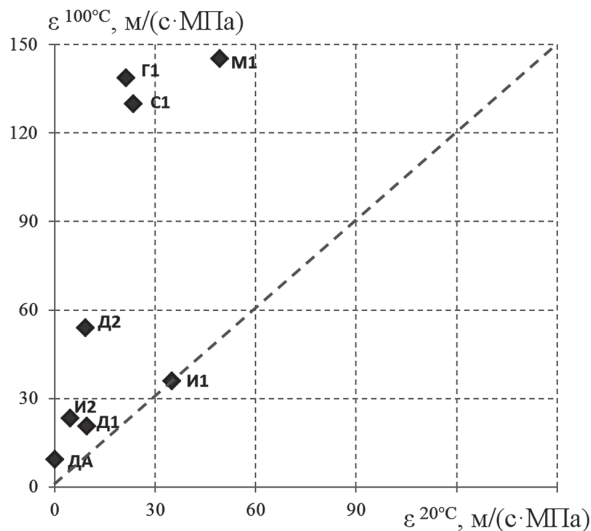


Рис. 2. Результаты определения  $\varepsilon^{20\text{ °C}}$  и  $\varepsilon^{100\text{ °C}}$  для всех групп образцов

Fig. 2. Resultant  $\varepsilon^{20\text{ °C}}$  and  $\varepsilon^{100\text{ °C}}$  determined for all groups of samples

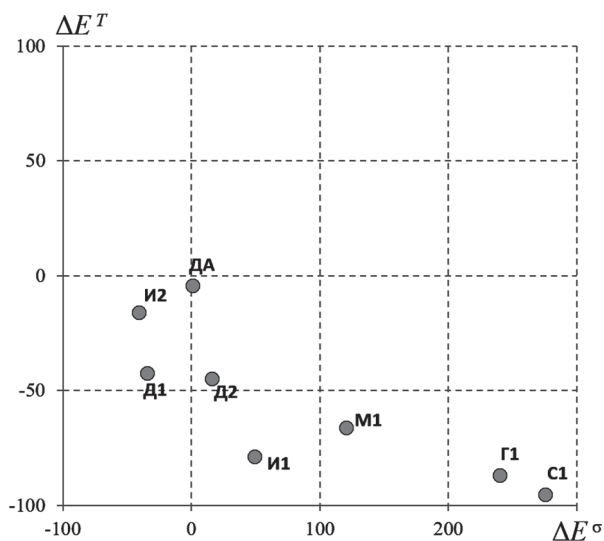


Рис. 3. Результаты расчета  $\Delta E^\sigma$  и  $\Delta E^T$  для всех групп образцов  
 Fig. 3. Calculated  $\Delta E^\sigma$  and  $\Delta E^T$  for all groups of samples

пород преобладающим механизмом изменения  $\varepsilon$  является образование микротрещин.

Для более детального изучения влияния температуры и давления на трещинообразование было исследовано затухание сигналов, оценка которого производилась на основе вычисления потерь энергии колебаний из выражения

$$\Delta E = \frac{E - E_{\text{исх}}}{E_{\text{исх}}} \cdot 100\% \quad (2)$$

где  $E_{\text{исх}}$  и  $E$  — энергии зарегистрированных сигналов до и после воздействия (температурного или механического), вычисленные из выражения

$$E = \int_0^{t_s} A^2(t) dt \quad (3)$$

где  $t_s$  и  $A$  — длительность и амплитуда сигнала.

На рис. 3 представлены результаты расчета  $\Delta E^\sigma$  (изменение энергии сигналов при росте осевого напряжения от 0 до 10 МПа) и  $\Delta E^T$  (изменение энергии сигналов при росте температуры от 25 до 100 °С).

Из рис. 3 видно, что рост температуры во всех образцах приводит к потерям энергии сигналов, а, следовательно, и к росту затухания (отрицательная область вертикальной шкалы).

Подобная закономерность объясняется образованием микротрещин, на которых происходит частичное рассеяние ультразвуковых импульсов. При этом рост затухания более заметен в менее нарушенных породах с высокими модулями упругости.

Механическое нагружение может привести как к росту, так и к снижению затухания. Для прочных пород повышение  $\sigma$  приводит к их консолидации и уменьшению затухания (положительная область горизонтальной шкалы). Пористые породы с низкими значениями  $E_d$ , напротив, демонстрируют рост затухания, что, очевидно, связано с заметным повышением их дефектности под действием механической нагрузки.

### Заключение

Разработанный метод контроля напряженного состояния породного мас-

сива базируется на экспериментально установленной взаимосвязи между температурой горных пород и их акустической тензочувствительностью.

Результаты лабораторных исследований указывают, что наиболее заметное повышение тензочувствительности с ростом температуры наблюдается в горных породах с низкими показателями пористости и относительно высокими упругими модулями. Анализ затухания

ультразвуковых импульсов указывает на то, что основным механизмом роста тензочувствительности является рост микротрещиноватости.

Разработанный метод обладает повышенной чувствительностью и может быть особенно востребован при контроле изменения параметров НДС в целиках и других конструктивных элементах систем разработки подземных месторождений полезных ископаемых.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Voznesenskii A. S., Nabatov V. V.* Estimate of crack formation in gypsiferous rock mass by the method of electromagnetic radiation recording // *Journal of Mining Science*. 2003, vol. 39, pp. 207–215.

2. *Tian M., Han L., Meng Q., Jin Y., Meng L.* In situ investigation of the excavation-loose zone in surrounding rocks from mining complex coal seams // *Journal of Applied Geophysics*. 2019, vol. 168, pp. 90–100.

3. *Chen T., Wang X., Mukerji T.* In situ identification of high vertical stress areas in an underground coal mine panel using seismic refraction tomography // *International Journal of Coal Geology*. 2015, vol. 149, pp. 55–66.

4. *Tang H., Long S., Li T.* Quantitative evaluation of tunnel lining voids by acoustic spectrum analysis // *Construction and Building Materials*. 2019, vol. 228.

5. *Voznesenskii A. S., Nabatov V. V.* Identification of filler type in cavities behind tunnel linings during a subway tunnel surveys using the impulse-response method // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2017, vol. 70, pp. 254–261.

6. *Ljunggren C., Chang Y., Janson T., Christiansson R.* An overview of rock stress measurement methods // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2003, vol. 40, no. 7–8, pp. 975–989.

7. *Meguid M. A., Dang H. K.* The effect of erosion voids on existing tunnel linings // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2009, vol. 24, no. 3, pp. 278–286.

8. *Yasuda N., Tsukada K., Asakura T.* Three-dimensional seismic response of a cylindrical tunnel with voids behind the lining // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019, vol. 84, pp. 399–412.

9. *Vil'yaminov S. V., Voznesensky A. S., Nabatov V. V., Shkuratnik V. L.* Regularities and mechanisms of thermal acoustic emission in gypseous rocks // *Journal of Mining Science*. 2009, vol. 45, pp. 533–540.

10. *Menéndez B., David C.* The influence of environmental conditions on weathering of porous rocks by gypsum. A non-destructive study using acoustic emissions // *Environmental Earth Sciences*. 2013, vol. 68, no. 6, pp. 1691–1706.

11. *Zhang Z., Liu X., Zhang Y., Qin X., Khan M.* Comparative study on fracture characteristics of coal and rock samples based on acoustic emission technology // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2021, vol. 111.

12. *Han J., Zhang H., Liang B., Rong H., Liu Y., Ren T.* Influence of Large Syncline on In Situ Stress Field: A Case Study of the Kaiping Coalfield, China // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016, vol. 49, no. 11, pp. 4423–4440.

13. *Teufel L. W.* Determination of in-situ stress from partial anelastic strain recovery measurements of oriented cores from deep boreholes / 34th US Symposium on Rock Mechanics. Lec-

ture notes of the short course in modern in situ stress measurement methods. Madison, 1993, pp. 19.

14. *Matsuki K., Takeuchi K.* Three-dimensional in situ stress determination by anelastic strain recovery of a rock core // *Proceedings of the 34th US Symposium on Rock Mechanics*. Madison, 1993.

15. *Асанов В. А., Токсаров В. Н., Самоделкина Н. А., Бельтюков Н. Л., Ударцев А. А.* Оценка напряженно-деформированного состояния нетронутого массива на месторождении «Жаман-Айбат» // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. — 2014. — Т. 13. — № 12. — С. 56–66.

16. *Леонтьев А. В., Попов С. Н.* Опыт практического применения измерительного гидроразрыва // *Горный журнал*. — 2003. — № 3. — С. 37–43.

17. *Hubbert M. K., Willis D. G.* Mechanics of hydraulic fracturing // *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*. 1957, vol. 957, pp. 153–168.

18. *Cornet F. H., Li L., Hulin J. P., Ippolito I., Kurowski P.* The hydromechanical behaviour of a fracture: an in situ experimental case study // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2003, vol. 40, no. 7, pp. 1257–1270.

19. *Lakirouhani A., Detournay E., Bungler A. P.* A reassessment of in-situ stress determination by hydraulic fracturing // *Geophysical Journal International*. 2016, vol. 205, pp. 1859–1873.

20. *Sun Y. L., Peng S. S.* Development of in-situ stress measurement technique using ultrasonic wave attenuation method — a progress report / *Proceedings of the 30th US Symposium on Rock Mechanics*. Morgantown, Rotterdam: Balkema, 1989, pp. 477–484.

21. *Lovchikov A. V.* Comparison of efficiency of in-situ methods for controlling the stress state of pillars under ultimate loads // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. 2020, vol. 1.2, pp. 491–502.

22. *Liu Y., Li Y., Qiao L., Fan D.* Dry coupled ultrasonic testing technology and its application in testing rock dynamic and static parameters // *Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society*. 2019, vol. 44, no. 5, pp. 1465–1472.

23. *Liu Y., Qiao L., Li Y., Ma G., Golosov A. M.* Ultrasonic spectrum analysis of granite damage evolution based on dry-coupled ultrasonic monitoring technology // *Advances in Civil Engineering*. 2020, vol. 5, pp. 1–13.

24. *Углов А. Л., Ерофеев В. И., Смирнов А. Н.* Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации. — М.: Наука, 2009. — 279 с.

25. *Николенко П. В., Шкуратник В. Л., Чепур М. Д.* Особенности изменения скоростей продольных и поперечных волн в образцах осадочных горных пород, подвергаемых термобарическим воздействиям // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2021. — № 7. — С. 5–13.

26. *Николенко П. В., Шкуратник В. Л.* Патент РФ № RU2704086 С1, 23.10.2019. Способ определения напряженного состояния массива горных пород. 2019. Бюл. № 30.

27. *Николенко П. В., Шкуратник В. Л.* Установка для ультразвуковых измерений на образцах геоматериалов в условиях термобарических воздействий // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2019. — № 5. — С. 89–96.

28. *Kern H.* Elastic wave velocities and constants of elasticity of rocks at elevated pressures and temperatures. *Landolt-Boernstein*, 1982, pp. 99–140. **ПЛАБ**

## REFERENCES

1. *Voznesenskii A. S., Nabatov V. V.* Estimate of crack formation in gypsiferous rock mass by the method of electromagnetic radiation recording. *Journal of Mining Science*. 2003, vol. 39, pp. 207–215.

2. *Tian M., Han L., Meng Q., Jin Y., Meng L.* In situ investigation of the excavation-loose zone in surrounding rocks from mining complex coal seams. *Journal of Applied Geophysics*. 2019, vol. 168, pp. 90–100.



3. Chen T., Wang X., Mukerji T. In situ identification of high vertical stress areas in an underground coal mine panel using seismic refraction tomography. *International Journal of Coal Geology*. 2015, vol. 149, pp. 55–66.
4. Tang H., Long S., Li T. Quantitative evaluation of tunnel lining voids by acoustic spectrum analysis. *Construction and Building Materials*. 2019, vol. 228.
5. Voznesenskii A. S., Nabatov V. V. Identification of filler type in cavities behind tunnel linings during a subway tunnel surveys using the impulse-response method. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2017, vol. 70, pp. 254–261.
6. Ljunggren C., Chang Y., Janson T., Christiansson R. An overview of rock stress measurement methods. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2003, vol. 40, no. 7–8, pp. 975–989.
7. Meguid M. A., Dang H. K. The effect of erosion voids on existing tunnel linings. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2009, vol. 24, no. 3, pp. 278–286.
8. Yasuda N., Tsukada K., Asakura T. Three-dimensional seismic response of a cylindrical tunnel with voids behind the lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019, vol. 84, pp. 399–412.
9. Vil'yaminov S. V., Voznesensky A. S., Nabatov V. V., Shkuratnik V. L. Regularities and mechanisms of thermal acoustic emission in gypseous rocks. *Journal of Mining Science*. 2009, vol. 45, pp. 533–540.
10. Menéndez B., David C. The influence of environmental conditions on weathering of porous rocks by gypsum. A non-destructive study using acoustic emissions. *Environmental Earth Sciences*. 2013, vol. 68, no. 6, pp. 1691–1706.
11. Zhang Z., Liu X., Zhang Y., Qin X., Khan M. Comparative study on fracture characteristics of coal and rock samples based on acoustic emission technology. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2021, vol. 111.
12. Han J., Zhang H., Liang B., Rong H., Liu Y., Ren T. Influence of Large Syncline on In Situ Stress Field: A Case Study of the Kaiping Coalfield, China. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016, vol. 49, no. 11, pp. 4423–4440.
13. Teufel L. W. Determination of in-situ stress from partial anelastic strain recovery measurements of oriented cores from deep boreholes. *34th US Symposium on Rock Mechanics. Lecture notes of the short course in modern in situ stress measurement methods*. Madison, 1993, pp. 19.
14. Matsuki K., Takeuchi K. Three-dimensional in situ stress determination by anelastic strain recovery of a rock core. *Proceedings of the 34th US Symposium on Rock Mechanics*. Madison, 1993.
15. Asanov A. V., Toksarov V. N., Samodelkina N. A., Bel'tiukov N. L., Udartsev A. A. Evaluation of stressed-deformed state of virgin rock at Zhaman-Aibat deposit. *Bulletin of Perm University. Geology*. 2014, vol. 13, no. 12, pp. 56–66. [In Russ].
16. Leontiev A. V., Popov S. N. Experience of practical application of measuring hydraulic fracturing. *Gornyi Zhurnal*. 2003, no. 3, pp. 37–43. [In Russ].
17. Hubbert M. K., Willis D. G. Mechanics of hydraulic fracturing. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*. 1957, vol. 957, pp. 153–168.
18. Cornet F. H., Li L., Hulin J. P., Ippolito I., Kurowski P. The hydromechanical behaviour of a fracture: an in situ experimental case study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2003, vol. 40, no. 7, pp. 1257–1270.
19. Lakirouhani A., Detournay E., Bungler A. P. A reassessment of in-situ stress determination by hydraulic fracturing. *Geophysical Journal International*. 2016, vol. 205, pp. 1859–1873.
20. Sun Y. L., Peng S. S. Development of in-situ stress measurement technique using ultrasonic wave attenuation method – a progress report. *Proceedings of the 30th US Symposium on Rock Mechanics*. Morgantown, Rotterdam: Balkema, 1989, pp. 477–484.

21. Lovchikov A. V. Comparison of efficiency of in-situ methods for controlling the stress state of pillars under ultimate loads. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. 2020, vol. 1.2, pp. 491 – 502.

22. Liu Y., Li Y., Qiao L., Fan D. Dry coupled ultrasonic testing technology and its application in testing rock dynamic and static parameters. *Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society*. 2019, vol. 44, no. 5, pp. 1465–1472.

23. Liu Y., Qiao L., Li Y., Ma G., Golosov A. M. Ultrasonic spectrum analysis of granite damage evolution based on dry-coupled ultrasonic monitoring technology. *Advances in Civil Engineering*. 2020, vol. 5, pp. 1 – 13.

24. Uglov A. L., Erofeev V. I., Smirnov A. N. *Akusticheskiy kontrol' oborudovaniya pri izgotovlenii i ekspluatatsii* [Acoustic control of equipment during manufacture and operation], Moscow, Nauka, 2009, 279 p.

25. Nikolenko P. V., Shkuratnik V. L., Chepur M. D. Velocity variations of P- and S-waves in sedimentary rock samples under thermobaric effects. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 7, pp. 5–13. [In Russ].

26. Nikolenko P. V., Shkuratnik V. L. *Patent RU 2704086 S1*, 23.10.2019. [In Russ].

27. Nikolenko P. V., Shkuratnik V. L. Laboratory setup for ultrasonic testing of rock samples in variable temperature and pressure conditions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 5, pp. 89 – 96. [In Russ].

28. Kern H. *Elastic wave velocities and constants of elasticity of rocks at elevated pressures and temperatures*. Landolt-Boernstein, 1982, pp. 99 – 140.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Николенко Петр Владимирович<sup>1</sup> – канд. техн. наук,  
доцент, e-mail: p.nikolenko@misis.ru,

Шkuratnik Владимир Лазаревич<sup>1</sup> – д-р техн. наук,  
профессор,

Чепур Мария Дмитриевна<sup>1</sup> – аспирант,  
e-mail: chepur-1995@mail.ru,

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС».

**Для контактов:** Николенко П.В., e-mail: p.nikolenko@misis.ru.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

P.V. Nikolenko<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,  
e-mail: p.nikolenko@misis.ru,

V.L. Shkuratnik<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

M.D. Chepur<sup>1</sup>, Graduate Student,

e-mail: chepur-1995@mail.ru,

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISiS»,  
119049, Moscow, Russia.

**Corresponding author:** P.V. Nikolenko, e-mail: p.nikolenko@misis.ru.

Получена редакцией 19.07.2021; получена после рецензии 01.09.2021; принята к печати 10.10.2021.

Received by the editors 19.07.2021; received after the review 01.09.2021; accepted for printing 10.10.2021.

