

## ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН В ОБРАЗЦАХ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД, ПОДВЕРГАЕМЫХ ТЕРМОБАРИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

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:** Статья посвящена исследованию изменения параметров распространения продольных и поперечных волн в осадочных горных породах в функции от температуры, давления, а также специфики их строения. В экспериментальных исследованиях образцы пяти групп осадочных пород с различными значениями пористости и плотности подвергались одноосному нагружению с одновременным нагревом. На каждом этапе термобарического нагружения производилось ультразвуковое прозвучивание продольными и поперечными волнами. По полученным данным вычислялись показатели, описывающие приращение скорости упругих волн с увеличением осевой нагрузки, а также оценивалось влияние температуры на указанные приращения. Установлено, что рост нагрузки приводит к увеличению скорости распространения упругих волн пропорционально пористости образцов и обратно пропорционально их плотности. Нагрев породы приводит к повышению чувствительности ультразвуковых параметров к изменениям величины осевого давления. В результате спектрального анализа зарегистрированных сигналов было выявлено смещение максимума спектра продольных волн с увеличением температуры, что свидетельствует об образовании трещин. При этом интенсивность трещинообразования выше в более плотных породах. Полученные закономерности могут быть использованы для разработки эффективных методов ультразвукового контроля напряженно-деформированного состояния приконтурного массива горных пород.

**Ключевые слова:** термобарические воздействия, осадочные горные породы, пористость, 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. Особенности изменения скоростей продольных и поперечных волн в образцах осадочных горных пород, подвергаемых термобарическим воздействиям // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 7. – С. 5–13. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_7\_0\_5.

### Velocity variations of P- and S-waves in sedimentary rock samples under thermobaric effects

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:** The article describes studies into variation of propagation parameters of P- and S-waves in sedimentary rocks versus temperature, pressure and structural features. In the tests, samples from five groups of sedimentary rocks were subjected to uniaxial loading with simultaneous heating. At each stage of thermobaric treatment, ultrasonic P- and S-wave measurements were performed. Using the obtained data, the incremental velocities of elastic waves with increasing axial load were calculated, and the temperature effect on the increments was assessed. It is found that the increasing load results in the increased velocities of elastic waves proportionally with the porosity of the samples and inversely proportionally to the density of the samples. Heating elevates sensitivity of ultrasound parameters relative to the change in the axial pressure value. The spectrum analysis of the recorded signals reveals that the spectrum maximum shifts with increasing temperature, which is reflective of crack formation. The rate of cracking is higher in denser rocks. The resultant patterns can be used in development of efficient ultrasonic methods for the stress-strain monitoring in rock mass.

**Key words:** thermobaric effects, sedimentary rocks, porosity, 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. Velocity variations of P- and S-waves in sedimentary rock samples under thermobaric effects. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(7):5-13. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_7\_0\_5.

---

## Введение

Многие месторождения полезных ископаемых расположены в толщах осадочных горных пород. При подземной разработке таких месторождений на первый план выходит необходимость обеспечения безопасности горных работ, которая должна основываться на результатах мониторинга состояния основных конструктивных элементов — целиков, кровли. На устойчивость последних в равной степени влияют строение и уровень поврежденности пород (трещиноватость, пористость), а также напряженно-деформированное состояние (НДС).

Ключевые методы контроля строения и состояния приконтурного массива основаны на использовании ультразвуковых сигналов в режиме межскважинного прозвучивания или каротажа. Взаимосвязи между скоростями  $V$  упругих волн и строением осадочных пород известны и широко используются для

определения их плотности, пористости и трещиноватости [1–5]. Ультразвуковые скважинные измерения возможны для оценки параметров напряженно-деформированного состояния пород [6–8], однако на практике часто возникает низкая чувствительность информативных параметров к приращению напряжений (граничащая с погрешностями используемой приемной аппаратуры). Одним из возможных подходов к увеличению эффективности ультразвуковых методов контроля динамики НДС может быть повышение температуры, что позволит увеличить чувствительность скоростей продольных и поперечных волн к изменениям напряженного состояния.

В настоящий момент исследования параметров распространения ультразвуковых колебаний в термобарических условиях в основном сконцентрированы на воссоздании условий залегания по-

род на больших глубинах [9–11] при характерных давлениях в сотни МПа и температурах свыше 500 °С. Очевидно, что локальный нагрев пород до таких температур для повышения чувствительности ультразвукового контроля НДС массива является избыточным и чрезвычайно энергозатратным. Поэтому актуальной является задача определения влияния температуры (в диапазоне до 100 °С), давления и особенностей строения наиболее распространенных осадочных пород на параметры распространения в них продольных и поперечных волн.

### Методы

В лабораторных условиях исследовались образцы осадочных горных пород с различными значениями плотности  $\rho$  и пористости  $K_n$ . Образцы представляли собой правильные параллелепипеды с основанием 40×40 мм и высотой 80 мм. Всего было испытано 15 образцов, разбитых на 5 групп по три однотипных образца. Распределение пород по группам было следующее: группа И1 – пористые известняки Сары-Ташского месторождения ( $\rho = 1847 \text{ кг/м}^3$ ,  $K_n = 29,3\%$ ); Д1 – доломиты нефтегазоконденсатного месторождения Жанажол ( $\rho = 1974 \text{ кг/м}^3$ ,  $K_n = 22,7\%$ ); И2 – плотные известняки Касимовского месторождения ( $\rho = 2266 \text{ кг/м}^3$ ,  $K_n = 17,6\%$ ); Д2 – плотные доломиты Новомосковского гипсового месторождения ( $\rho = 2554 \text{ кг/м}^3$ ,  $K_n = 4\%$ ); М – мрамор Кибик-Кордонского месторождения ( $\rho = 2695 \text{ кг/м}^3$ ,  $K_n = 0,37\%$ ). Перед испытанием все образцы выдерживались при комнатной температуре и относительной влажности воздуха 30% для удаления излишков влаги.

Испытания проводились на специализированном стенде, позволяющем производить одноосное нагружение образцов с одновременным нагревом [12].

Термобарическое нагружение образцов проводилось ступенчато по следующей программе: на каждой ступени значения осевой нагрузки  $\sigma$  и температуры  $T$  фиксировались до полного прогрева образца, после чего было ультразвуковое прозвучивание. Дискретный шаг термического нагружения составлял 30 °С, а шаг механического нагружения – 3 МПа. Основными информативными параметрами выступали скорости продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$  волн. Сохранение полных волновых форм сигналов позволило проводить их спектральный анализ.

### Анализ результатов экспериментов

Для каждого типа пород был получен массив информации  $V(\sigma, T)$ . Оценка влияния температуры на зависимость  $V(\sigma)$  для всех образцов определялась из показателя  $\Delta V^{20^\circ\text{C}}$

$$\Delta V^{20^\circ\text{C}} = \frac{\Delta V_{\text{max}}^{20^\circ\text{C}}}{\Delta V_{\text{min}}^{20^\circ\text{C}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $\Delta V_{\text{max}}^{20^\circ\text{C}}$  и  $\Delta V_{\text{min}}^{20^\circ\text{C}}$  – максимальное и минимальное значения скорости продольной или поперечной волны при температуре  $T = 20^\circ\text{C}$ .

Показатель  $\Delta V^{20^\circ\text{C}}$  описывает относительное приращение скорости упругих волн с увеличением осевой нагрузки. На рис. 1, а представлены свойства пород, а на рис. 1, б – определенные экспериментально значения  $\Delta V^{20^\circ\text{C}}$  для продольных и поперечных волн.

Из рис. 2 видно, что значения  $\Delta V^{20^\circ\text{C}}$  пропорциональны пористости образцов и обратно пропорциональны их плотности; это хорошо согласуется с исследованиями на разных типах пород [13–15]. Для осадочных пород основной вклад в увеличение скорости продольных волн вносит частичное или полное закрытие пор под действием внешнего давления. Большой объем порового пространства известняков группы И1 позволяет обес-

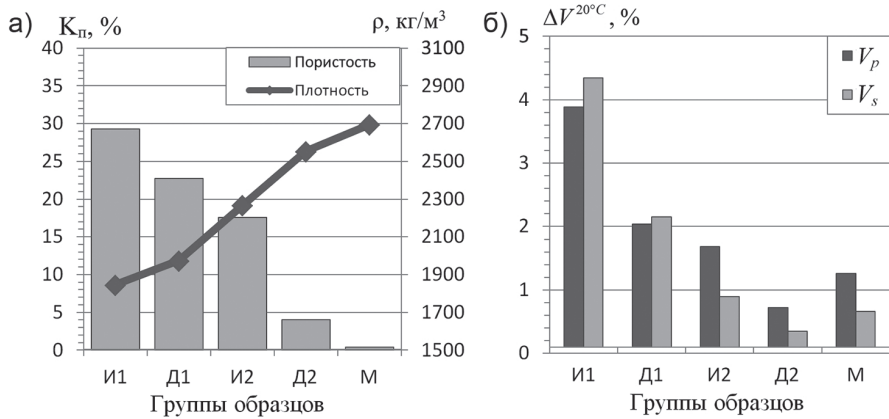


Рис. 1. Свойства пород (а) и определенные экспериментально значения  $\Delta V^{20^{\circ}\text{C}}$  для продольных и поперечных волн (б)

Fig. 1. Properties of rocks (a) and test values  $\Delta V^{20^{\circ}\text{C}}$  for P- and S-waves (b)

печить довольно высокую чувствительность скорости упругих колебаний к изменению напряженно-деформированного состояния образца. В более плотных образцах групп Д2 и М приращения скоростей оказываются менее значительными.

В [16] показано, что рост температуры приводит к увеличению уровня поврежденности геоматериала, что может повысить чувствительность скоростей упругих волн к изменениям параметров

напряженно-деформированного состояния. Оценить увеличение такой чувствительности предлагается при помощи определения показателя эффективного приращения скорости  $\Delta V_{\text{эфф}}$  для каждого типа породы и степени термического нагружения

$$\Delta V_{\text{эфф}} = \frac{\Delta V^T}{\Delta V^{20^{\circ}\text{C}}} \cdot \quad (2)$$

Для этого предварительно определены приращения скоростей на каждой из ступеней температур  $\Delta V^T$

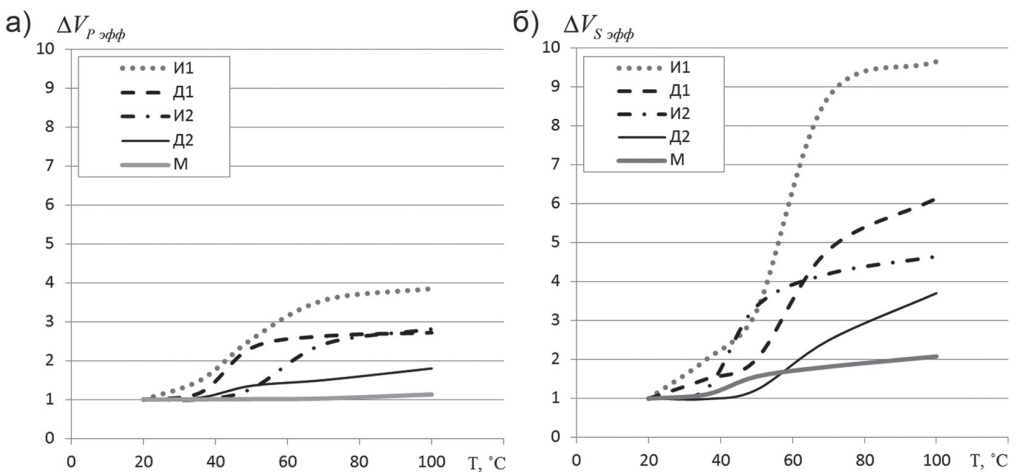


Рис. 2. Экспериментально определенные значения  $\Delta V_{\text{эфф}}$  для продольных (а) и поперечных (б) волн

$$\Delta V^T = \frac{\Delta V_{\max}^T}{\Delta V_{\min}^T} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $\Delta V_{\max}^T$  — максимальное значение скорости продольной или поперечной волны при температуре  $T$ ;  $\Delta V_{\min}^T$  — минимальное значение скорости продольной или поперечной волны при температуре  $T$ .

Показатель  $\Delta V_{\text{эфф}}$  характеризует степень эффективности нагрева породы в качестве фактора, увеличивающего чувствительность скоростей упругих волн к изменению осевого давления. Значения  $\Delta V_{\text{эфф}}$  больше 1 свидетельствуют об эффективности нагрева в качестве фактора повышения чувствительности  $V_p$  и  $V_s$  к изменениям напряженного состояния образцов. На рис. 2 представлены результаты расчета  $\Delta V_{\text{эфф}}$  для продольных и поперечных волн в диапазоне температур от 20 до 100 °С.

Из рис. 2 видно, что рост температуры приводит к увеличению чувствительности скоростей упругих волн к изменениям осевого давления. Причем наибольшее увеличение чувствительности наблюдается в пористых породах групп И1, Д1 и И2. Рост  $\Delta V_{\text{эфф}}$  можно объяснить образованием множества микротрещин [17] в результате температурного воздействия. Различия в значениях  $\Delta V_{\text{Рэфф}}$  и  $\Delta V_{\text{Сэфф}}$  объясняется различиями в механизмах взаимодействия продольных и поперечных волн с трещинами. Снижение  $V_p$ , как правило, связано с увеличением раскрытия трещин, ориентированных ортогонально направлению распространения продольной волны ( $V_p$  в заполнителе трещин обычно значительно меньше, чем в основной породе). Поперечные волны более чувствительны к наличию трещин, ортогональных плоскости поляризации S-волн. При этом величина раскрытия трещин не оказывает существенного влияния на  $V_s$ , т.к. поперечные волны не распро-

раняются в жидкостях и газах (типичных заполнителях трещин). Учитывая вышесказанное, можно предположить, что рост температуры приводит к образованию множества трещин различной ориентации и с малым раскрытием. Также из рис. 2 можно заметить, что для большинства пористых пород наблюдается постепенное выполаживание графика  $\Delta V_{\text{эфф}}(T)$  после температуры 75 °С.

Дополнительную информацию о механизмах дефектообразования под воздействием термического нагружения может дать спектральный анализ зарегистрированных импульсов. Спектральному анализу подвергались сигналы продольных волн (выделить в волновом пакете исключительно поперечные волны даже при использовании сдвиговых преобразователей без существенного искажения спектрального состава не представляется возможным, поэтому спектральный анализ S-волн не производился). Информацию о степени нарушенности образца несут продольные волны, прошедшие через образец. Многократные отражения от границ образца могут существенно исказить спектр сигналов, поэтому преобразование Фурье необходимо производить на начальном участке сигнала. Длина участка сигнала выбиралась равной длительности однократного пробега продольной волны от излучателя к приемнику. Для минимизации влияния краевых эффектов использовалось оконное преобразование Хеннинга [18]. В качестве основного информативного параметра спектра была выбрана частота максимума  $f_{\max}$ , снижение которой обусловлено изменением частотно-зависимого затухания и обычно свидетельствует об увеличении трещиноватости образца [19].

Усредненные по группам образцов значения  $f_{\max}$  в функции от температуры представлены на рис. 3. Из рис. 3 видно, что увеличение температуры приво-

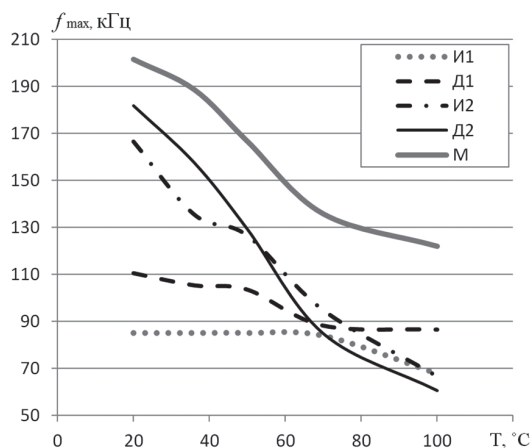


Рис. 3. Зависимости  $f_{\max}(T)$  для всех исследованных групп образцов

Fig. 3. Functions  $f_{\max}(T)$  for all test groups of samples

дит к смещению максимума спектра в область низких частот, что согласуется с результатами, полученными при нагревании бетонов [20]. Наиболее значительное снижение  $f_{\max}$  наблюдается в плотных породах групп М и Д2. В пористых породах снижение менее выражено, что, очевидно, связано с более высоким начальным уровнем дефектности. Термические напряжения в рассмотренном диапазоне температур являются недостаточными для возникновения больших по размеру нарушений в образцах. Следует отметить, что изменение  $f_{\max}$  при использовании продольных волн, как правило, связано с ростом трещин, ориентированных ортогонально направлению распространения колебаний. В этом случае давление, направленное вдоль оси прозвучивания, может воспрепятствовать росту таких трещин.

Это может служить объяснением низких значений  $\Delta V_{\text{эфф}}$  в плотных осадочных породах.


### Заключение

Проведенные экспериментальные исследования показали, что рост температуры в образцах осадочных пород приводит к увеличению приращения скоростей продольных и поперечных волн при повышении осевого давления. Наиболее отчетливо эффект наблюдается в образцах пористых пород (известняков и доломитов) в температурном диапазоне 75–100 °С. Полученные результаты могут стать теоретическим базисом для разработки новых высокочувствительных методов контроля НДС приконтурного массива, основанных на ультразвуковом прозвучивании локального предварительно нагретого участка породы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назарова Л. А., Назаров Л. А., Голиков Н. А. Оценка реологических свойств пород-коллекторов пластов Баженовской свиты по данным термобарических испытаний // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2017. — № 3. — С. 22–28.
2. Takato T., Masanobu O. Changes in crack density and wave velocity in association with crack growth in triaxial tests of Inada granite // Journal of Geophysical Research. 2005. vol. 110, no. 5, pp. 1–14.



3. Li H., Dong Z., Yang Y., Chen M., Jing W. Experimental study of damage development in salt rock under uniaxial stress using ultrasonic velocity and acoustic emissions // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2018. vol. 8, pp. 1 – 14.
4. Garia S., Pal A. K., Ravi K., Nair A. M. Laboratory assessment on factors controlling the acoustic properties of carbonates. A case study from Bombay off-shore // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. vol. 203.
5. Sarout J. Impact of pore space topology on permeability, cut-off frequencies and validity of wave propagation theories // *Geophysical Journal International*. 2012. vol. 189, no. 1, pp. 481 – 492.
6. Tian J., Wang E. Ultrasonic method for measuring in-situ stress based on acoustoelasticity theory // *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2006. vol. 25, pp. 3719 – 3724.
7. Gladwin M. T., Stagey F. D. Ultrasonic pulse velocity as a rock stress sensor // *Tectonophysics*. 1974, vol. 21, no. 1-2, pp. 39 – 45.
8. Wang Y., Li C. H. Investigation of the P- and S-wave velocity anisotropy of a Longmaxi formation shale by real-time ultrasonic and mechanical experiments under uniaxial deformation // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2017, vol. 158, pp. 253 – 267.
9. Punturo R., Kern H., Cirrincione R., Mazzoleni P., Pezzino A. P- and S-wave velocities and densities in silicate and calcite rocks from the Peloritani Mountains, Sicily (Italy): The effect of pressure, temperature and the direction of wave propagation // *Tectonophysics*. 2005, vol. 409, no. 1-4, pp. 55 – 72.
10. Scheu B., Kern H., Spieler O., Dingwell D. B. Temperature dependence of elastic P- and S-wave velocities in porous Mt. Unzendacite // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2006, vol. 153, no. 1-2 spec. iss., pp. 136 – 147.
11. Motra H. B., Zertani S. Influence of loading and heating processes on elastic and geomechanical properties of eclogites and granulites // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2018. vol. 10, no. 1, pp. 127 – 137.
12. 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. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-89-96.
13. Zheng G. P., Zhao X. D., Liu J. P., Li Y. H. Experimental study on change in acoustic wave velocity when rock is loading // *Journal of Northeastern University*. 2009. vol. 30, no. 8, pp. 1197 – 1200.
14. Katsuki D., Gutierrez M., Almrabat A. Stress-dependent elastic wave velocity of microfractured sandstone // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2014. vol. 38, no. 5, pp. 441 – 456.
15. Chen X., Xu Z. The ultrasonic P-wave velocity-stress relationship of rocks and its application // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2017. vol. 76, no. 2, pp. 661 – 669.
16. Николенко П. В. Экспериментальное исследование влияния температуры и давления на развитие поврежденности в образцах горных пород // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2020. – № 11. – С. 70 – 78. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-0-70-78.
17. Kern H. Elastic wave velocities and constants of elasticity of rocks at elevated pressures and temperatures. *Landolt-Boernstein*, 1982, pp. 99 – 140.
18. He W., Wang C., Shi W.-F., Ning J.-G., Zhao K. Evaluation of anchorage quality of rock bolts using ultrasonic guided wave // *Transaction of Beijing Institute of Technology*. 2017, vol. 37, no. 6, pp. 567 – 572.
19. Remy J. M., Bellanger M., Homand-Etienne F. Laboratory velocities and attenuation of P-waves in limestones during freeze-thaw cycles // *Geophysics*. 1994, vol. 59, no. 2, pp. 245 – 251.
20. Ren W., Xu J, Zhang Z., Liu Y. Wavelet packet analysis on acoustic spectral characteristics of geopolymeric concrete after elevated temperature // *Journal of Building Materials*. 2014, vol. 17, no. 2, pp. 284 – 290. 

## REFERENCES

1. Nazarova L. A., Nazarov L. A., Golikov N. A. Evaluation of the rheological properties of reservoir rocks of the Bazhenov formation according to the data of thermobaric tests. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2017, no. 3, pp. 22 – 28. [In Russ].
2. Takato T., Masanobu O. Changes in crack density and wave velocity in association with crack growth in triaxial tests of Inada granite. *Journal of Geophysical Research*. 2005. vol. 110, no. 5, pp. 1 – 14.
3. Li H., Dong Z., Yang Y., Chen M., Jing W. Experimental study of damage development in salt rock under uniaxial stress using ultrasonic velocity and acoustic emissions. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2018. vol. 8, pp. 1 – 14.
4. Garia S., Pal A. K., Ravi K., Nair A. M. Laboratory assessment on factors controlling the acoustic properties of carbonates. A case study from Bombay off-shore. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. vol. 203.
5. Sarout J. Impact of pore space topology on permeability, cut-off frequencies and validity of wave propagation theories. *Geophysical Journal International*. 2012. vol. 189, no. 1, pp. 481 – 492.
6. Tian J., Wang E. Ultrasonic method for measuring in-situ stress based on acoustoelasticity theory. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2006. vol. 25, pp. 3719 – 3724.
7. Gladwin M. T., Stagey F. D. Ultrasonic pulse velocity as a rock stress sensor. *Tectonophysics*. 1974, vol. 21, no. 1-2, pp. 39 – 45.
8. Wang Y., Li C. H. Investigation of the P- and S-wave velocity anisotropy of a Longmaxi formation shale by real-time ultrasonic and mechanical experiments under uniaxial deformation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2017, vol. 158, pp. 253 – 267.
9. Punturo R., Kern H., Cirrincione R., Mazzoleni P., Pezzino A. P- and S-wave velocities and densities in silicate and calcite rocks from the Peloritani Mountains, Sicily (Italy): The effect of pressure, temperature and the direction of wave propagation. *Tectonophysics*. 2005, vol. 409, no. 1-4, pp. 55 – 72.
10. Scheu B., Kern H., Spieler O., Dingwell D. B. Temperature dependence of elastic P- and S-wave velocities in porous Mt. Unzendacite. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2006, vol. 153, no. 1-2 spec. iss., pp. 136 – 147.
11. Motra H. B., Zertani S. Influence of loading and heating processes on elastic and geomechanical properties of eclogites and granulites. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2018. vol. 10, no. 1, pp. 127 – 137.
12. 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]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-89-96.
13. Zheng G. P., Zhao X. D. Liu J. P., Li Y. H. Experimental study on change in acoustic wave velocity when rock is loading. *Journal of Northeastern University*. 2009. vol. 30, no. 8, pp. 1197 – 1200.
14. Katsuki D., Gutierrez M., Almrabat A. Stress-dependent elastic wave velocity of microfractured sandstone. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2014. vol. 38, no. 5, pp. 441 – 456.
15. Chen X., Xu Z. The ultrasonic P-wave velocity-stress relationship of rocks and its application. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2017. vol. 76, no. 2, pp. 661 – 669.
16. Nikolenko P. V. Experimental studies into temperature and pressure effect on the quality and fracture of rock samples. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 11, pp. 70 – 78. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-0-70-78.
17. Kern H. *Elastic wave velocities and constants of elasticity of rocks at elevated pressures and temperatures*. Landolt-Boernstein, 1982, pp. 99 – 140.
18. He W., Wang C., Shi W.-F., Ning J.-G., Zhao K. Evaluation of anchorage quality of rock bolts using ultrasonic guided wave. *Transaction of Beijing Institute of Technology*. 2017, vol. 37, no. 6, pp. 567 – 572.



19. Remy J. M., Bellanger M., Homand-Etienne F. Laboratory velocities and attenuation of P-waves in limestones during freeze-thaw cycles. *Geophysics*. 1994, vol. 59, no. 2, pp. 245 – 251.

20. Ren W., Xu J, Zhang Z., Liu Y. Wavelet packet analysis on acoustic spectral characteristics of geopolymeric concrete after elevated temperature. *Journal of Building Materials*. 2014, vol. 17, no. 2, pp. 284 – 290.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Николенко Петр Владимирович*<sup>1</sup> – канд. техн. наук, доцент,

e-mail: p.nikolenko@misis.ru,

*Шкуратник 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 22.04.2021; получена после рецензии 14.05.2021; принята к печати 10.06.2021.

Received by the editors 22.04.2021; received after the review 14.05.2021; accepted for printing 10.06.2021.



---

## РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

### ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТРЕХСТАДИЙНОГО ПРОЦЕССА ДРОБЛЕНИЯ КОНУСНЫМИ ДРОБИЛКАМИ

(№ 1244/07-21 от 17.05.2021; 8 с.)

*Деревнин Игорь Андреевич*<sup>1</sup> – магистрант, e-mail: igor\_derevnin121@mail.ru,

*Бабокин Геннадий Иванович*<sup>1</sup> – д-р техн. наук, профессор, e-mail: babokinginov@yandex.ru,

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС».

Дана оценка энергоэффективности процесса подготовки руды крупностью –12 мм по трехстадийной схеме дробления конусными дробилками и с замкнутым режимом работы грохота с дробилкой мелкого дробления. Показано что применение конусных дробилок взамен шаровой мельницы позволяет снизить удельный расход электрической на процесс подготовки руды на 21–27%.

Ключевые слова: конусная дробилка, рудоподготовка, энергоэффективность, дробление, удельный расход электрической энергии

### ENERGY EFFICIENCY ASSESSMENT OF A THREE-STAGE CONE CRUSHER CRUSHING PROCESS

*I.A. Derevnin*<sup>1</sup>, Magister, *G.I. Babokin*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: babokinginov@yandex.ru,

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

An assessment of the energy efficiency of the process of preparing ore with a size of –12 mm according to a three-stage crushing scheme with cone crushers and with a closed mode of operation of a screen with a fine crushing crusher is given. It is shown that the use of cone crushers instead of a ball mill makes it possible to reduce the specific consumption of electric power for the ore preparation process by 21–27%.

Key words: cone crusher, ore preparation, energy efficiency, crushing, specific consumption of electrical energy.