

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ НА РАЗВИТИЕ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД

П.В. Николенко

НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: p.nikolenko@misis.ru

Аннотация: На степень поврежденности горных пород влияет множество факторов, важнейшими из которых можно считать температуру и напряженно-деформированное состояние. Одним из подходов к оценке поврежденности пород в натуральных условиях является изучение их акустических свойств, в частности измерение скоростей продольных и поперечных упругих волн. Рассмотрено исследование динамики поврежденности образцов известняка с различной пористостью под воздействием изменяющихся давлений и температур. На основе компьютерного моделирования подтверждена возможность выявления момента достижения термического равновесия между гранями и центром образца по выполаживанию кривой скорости продольной волны. Произведено сравнение результатов моделирования с реальными экспериментальными данными. По результатам лабораторных экспериментов на специально разработанном стенде установлено, что в пористых известняках рост температуры приводит к более интенсивному росту поврежденности, чем в известняках с меньшей пористостью. Рост осевого давления, напротив, приводит к снижению интенсивности дефектообразования. С ростом осевого давления до 9 МПа приращение поврежденности с ростом температуры от 20 до 100 °С для плотных известняков сокращается на 24%, а для пористых — на 48%.

Ключевые слова: горная порода, поврежденность, температура, давление, упругие волны, моделирование.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-05-00152.

Для цитирования: 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.

Experimental studies into temperature and pressure effect on the quality and fracture of rock samples

P.V. Nikolenko

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

Abstract: Quality of rocks can be affected by many factors. The critical factors are the temperature and stress state. One of the approaches to the in-situ estimation of rock quality is investigation of acoustic properties of rocks, in particular, measurement of P- and S-wave velocities. This article studies dynamics of damage accumulation in limestone samples of different porosity.

sity under the action of varied temperatures and pressures. Computer-assisted modeling proves detectability of moment of thermal equilibrium between the faces and center of a sample by flattening of the P-wave velocity curve. The modeling results are compared with the real experimental data. The laboratory-scale tests on a specially designed installation have found that the increasing temperature causes a more intense growth in the amount of damage in porous limestone samples than in less-porous limestone. Alternatively, the increase in the axial pressure reduces intensity of damage process. With increasing axial pressure to 9 MPa, the increment in the amount of damages is reduced in massive and porous limestone by 24% and 48%, respectively, at the temperature being risen from 20 to 100 °C.

Key words: rock, damage, temperature, pressure, elastic waves, modeling.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Grant No. 19-05-00152.

For citation: Nikolenko P. V. Experimental studies into temperature and pressure effect on the quality and fracture of rock samples. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(11):70-78. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-0-70-78.

Введение

Горные породы, залегающие на различных глубинах, подвергаются воздействию повышенных механических напряжений и температур, значительно изменяющих их свойства. Одним из наиболее распространенных методов оценки изменения свойств пород под влиянием различных внешних факторов является изучение акустических свойств геоматериала. Экспериментальное определение скоростей продольных V_p и поперечных V_s волн позволяет оценивать прочность [1–3], анизотропию [4, 5] и даже напряженно-деформированное состояние [6–7]. В [9–11] приводятся результаты исследования акустических свойств пород различного генезиса при высоких температурах и давлениях, и отмечается повышение скоростей ультразвука с ростом механических напряжений. Повышение температуры, напротив, приводит к снижению значений V_p и V_s .

Одновременное измерение V_p и V_s является основой для вычислений динамических модулей упругости [12–14]. Последние можно использовать для оценки степени нарушенности горных пород. Для оценки динамики степени

нарушенности исследуемого материала в [15] предлагается использовать понятие поврежденности Ψ . Очевидно, что модули упругости поврежденного и неповрежденного материалов будут отличаться. Если обозначить модуль упругости неповрежденного материала как E_0 , то модуль Юнга поврежденного материала $E_{эфф}$ можно найти из

$$E_{эфф} = E_0 (1 - \Psi) \quad (1)$$

В данном случае Ψ следует трактовать как относительную оценку степени нарушенности материала (степень трещиноватости, пористости).

Также известно, что модуль Юнга материала зависит от температуры. В первом приближении значения E_0 можно определить из

$$E_0 = E_0^{20^\circ\text{C}} (1 - k_E \Delta T), \quad (2)$$

где $E_0^{20^\circ\text{C}}$ – модуль Юнга при 20 °C; ΔT – изменение температуры; k_E – температурный коэффициент изменения модуля Юнга ($k_E \approx 3 \cdot 10^{-4}$ град $^{-1}$).

Объединяя (1) и (2), можно получить выражение для оценки изменения степени поврежденности материала при изменении его температуры

$$\Psi = 1 - \frac{E_{эфф}}{E_0^{20^\circ\text{C}} (1 - k_E \Delta T)} \quad (3)$$

Целью данной работы является экспериментальное установление характера изменения значения поврежденности Ψ горных пород с разной степенью исходной пористости при росте температуры и давления.

Методы

В исследовании участвовали образцы двух типов известняков. Группы А составляли известняки Касимовского месторождения с относительно низкой пористостью ($K_n = 17,6\%$). В группе В находились известняки Сары-Ташского месторождения с существенно большей пористостью ($K_n = 29,3\%$). Образцы изготавливались методом сухого пиления в виде призм высотой 82 мм и квадратным основанием 42 на 42 мм. Перед экспериментом измерялись все размеры образцов, а также вес каждого образца. Таким образом, производилась оценка объемного веса ρ , усредненное значение которого для группы А составило 2267 кг/м^3 , а для группы В — 1846 кг/м^3 .

Лабораторные исследования образцов горных пород производились на специализированном лабораторном стенде, позволяющем обеспечивать контролируемые нагрев и одноосное сжатие образца горной породы [16]. Одновременно с нагревом и повышением уровня осевого напряжения σ образцы пород

прозвучивались продольными и поперечными упругими волнами ультразвукового частотного диапазона. При этом в качестве основных информативных параметров выступали скорости распространения продольных V_p и поперечных V_s волн.

Нагружение производилось до дискретных уровней 3, 6, 9 МПа. Диапазон задаваемых температур составлял от 20 до 100°C с шагом 10°C . При достижении целевой температуры на поверхности образца эта температура фиксировалась до полного и равномерного прогрева образца. При этом оценка оптимального времени прогрева является нетривиальной задачей. Ранее в [17] предлагалось вычислять момент полного прогрева образца по выполаживанию кривой $V_p(t)$. Для получения такой зависимости в процессе нагрева необходимо производить непрерывное измерение V_p . Для оценки надежности такого подхода в настоящей работе было произведено компьютерное моделирование процесса нагрева образца.

Моделирование производилось в программном пакете Comsol Multiphysics с использованием метода конечных элементов. Модель решалась в двумерной постановке. Образец породы представлялся в виде пластины шириной 42 мм и высотой 82 мм. Отличительной особенностью компьютерной модели было наличие приемного и излучающего преобразователей, закрепленных на торцах образца породы. Указанные преобразо-

Основные характеристики материалов модели

Main characteristics of materials

Материал	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	c , Дж/(кг·К)
Плотный известняк	2260	2,56	920
Мрамор	2700	1,28	420
Ракушечник	1400	0,46	836
Гипс	2350	1,16	1470
Сталь (корпуса преобразователей)	7800	55	460

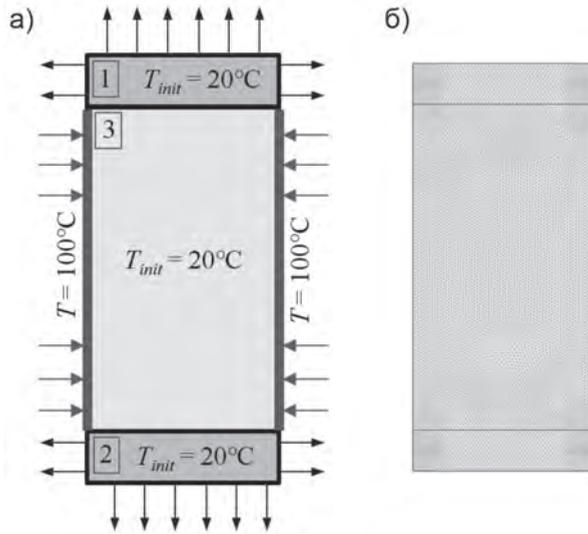


Рис. 1. Общая схема компьютерной модели (а) и модель, разбитая на сетку конечных элементов (б): 1, 2 – акустические преобразователи, 3 – образец горной породы
 Fig. 1. The general scheme of the computer model (a) and the model, broken down into a finite element mesh (b): 1, 2 – acoustic transducers, 3 – rock sample

ватели находятся в массивных стальных корпусах, выдерживающих при необходимости высокие давления. Но с термодинамической точки зрения такие пре-

образователи являются радиаторами, на которых рассеивается часть тепла, передаваемого образцу нагревательными элементами лабораторного стенда.

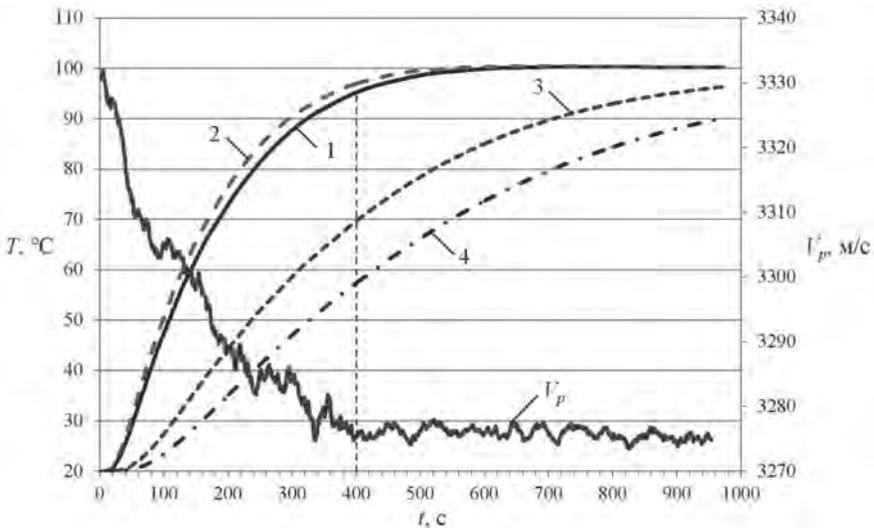


Рис. 2. Расчетные зависимости $T(t)$ для разных типов пород и определенная экспериментально зависимость $V_p(t)$ для образца известняка группы А: 1 – плотный известняк, 2 – мрамор, 3 – ракушечник, 4 – гипс
 Fig. 2. Calculated dependences $T(t)$ for different types of rocks and the experimentally determined dependence $V_p(t)$ for a limestone sample of group A: 1 – dense limestone, 2 – marble, 3 – shell rock, 4 – gypsum

Задача решалась для разных типов пород. При моделировании учитывались объемный вес породы ρ , теплопроводность λ , удельная теплоемкость c . Основные характеристики используемых в модели материалов представлены в таблице [18].

Расчет производился для 1000 с с шагом 1 с. При этом в качестве начальных условий задавалась начальная температура образца и преобразователей $T_{\text{init}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. В качестве граничных условий задавалась температура на боковых гранях образца, равная $100 \text{ }^\circ\text{C}$. На свободных гранях акустических преобразователей задавалось условие излучения температуры в окружающую среду (конвекционное охлаждение не учитывалось). Схема компьютерной модели и пример разбиения на сетку конечных элементов представлен на рис. 1.

На рис. 2 представлены значения температуры для центральной зоны образца, полученные в результате компьютерного моделирования. Также на зависимости $T(t)$ наложена реальная зави-

симость $V_p(t)$, полученная в результате нагрева образца известняка группы А.

Из рис. 2 видно, что формы зависимостей $T(t)$ для плотного известняка и $V_p(t)$ для известняка группы А условно совпадают. При этом выполаживание графика $V_p(t)$ начинается на 150–200 с раньше расчетного графика $T(t)$, что соответствует температуре $95 \text{ }^\circ\text{C}$. Таким образом, метод оценки степени полного прогрева образца по анализу экспериментальной зависимости $V_p(t)$ можно считать работоспособным при уровне абсолютной погрешности $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Для достижения более надежных результатов следует продолжать нагрев образца дополнительно 150–200 с после выполаживания зависимости $V_p(t)$. Именно такой подход был применен при экспериментальном исследовании образцов известняка групп А и В.

Результаты экспериментов и их обсуждение

В результате эксперимента был получен массив данных $V_p(T, \sigma)$ и $V_s(T, \sigma)$

$$\Psi = -0,0698 + 0,0035 \cdot T + 0,0007 \cdot \sigma - 2,3551 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 0,0001 \cdot T \cdot \sigma + 6,8631 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma^2 \quad R^2 = 99,028$$

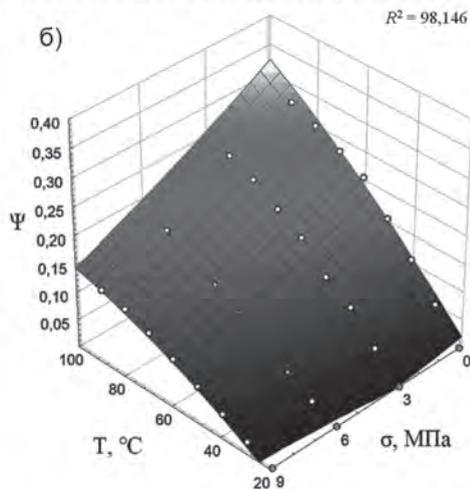
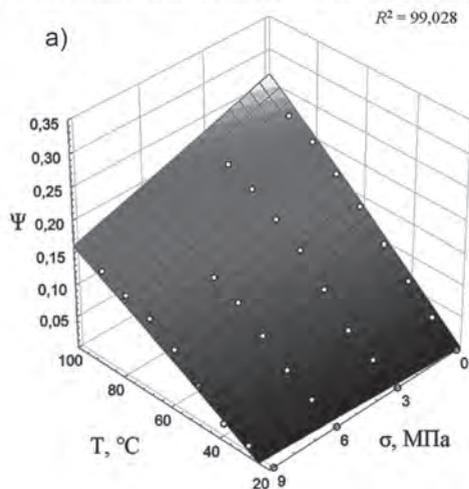


Рис. 3. Результаты экспериментального определения зависимостей $\Psi(T, \sigma)$ для плотного известняка Касимовского месторождения (а) и пористого известняка Сары-Ташского месторождения (б)

Fig. 3. Results of experimental determination of the $\Psi(T, \sigma)$ dependences for dense limestone of the Kasimov deposit (a) and porous limestone of the Sary-Tash deposit (b)

для каждого исследуемого образца. Такой массив данных является достаточным для расчета фактических значений $E_{эфф}$ в соответствие с [19]:

$$E_{эфф} = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2}. \quad (4)$$

Значения $E_{эфф}(T, \sigma)$ были использованы для вычисления значений $\Psi(T, \sigma)$ для всего диапазона исследуемых давлений и температур. Сформированный в результате вычислений массив $\Psi(T, \sigma)$ можно представить в виде трехмерной аппроксимирующей поверхности вида

$$\Psi = a_0 + a_1 T + a_2 \sigma + a_3 T^2 + a_4 T \sigma + a_5 \sigma^2 \quad (5)$$

Качество аппроксимации оценивалось с помощью параметра R^2 .

На рис. 3 представлены примеры зависимостей $\Psi(T, \sigma)$ для известняков Касимовского и Сары-Ташского месторождений.

Из рис. 3 видно, что рост температуры приводит к росту поврежденности горной породы Ψ . При осевом давлении $\sigma = 0$ МПа в плотных известняках группы А прирост поврежденности составляет $\Delta\Psi = 0,25$ при повышении температуры от 20 до 100 °С. В тех же условиях прирост поврежденности известняков группы В составил $\Delta\Psi = 0,31$. Таким образом, можно утверждать, что более пористые горные породы склонны к более интенсивному разрушению с ростом температуры.

Из рис. 3 также видно, что рост осевого давления σ препятствует разрушению породы под действием температуры. Для обеих групп исследованных образцов изменения Ψ при 20 °С практически не наблюдаются с ростом σ . При высокой температуре (100 °С) — напротив, наблюдается значительное снижение Ψ с ростом механической нагрузки. При $T = 100$ °С приращение поврежден-

ности с ростом нагрузки для образцов группы А составило $\Delta\Psi = 0,19$, а для образцов группы В — $\Delta\Psi = 0,16$. Таким образом, осевое давление в значительной степени может противостоять развитию поврежденности вследствие роста температуры, причем этот эффект наблюдается более отчетливо в пористых породах. Это, очевидно, связано с более интенсивным закрытием пор под действием механических напряжений, что, в свою очередь, препятствует развитию термомеханических разрушений. Следует отметить, что максимальные значения осевого давления, достигаемые в процессе эксперимента, не превышают значений 0,5 от прочности пород на одноосное сжатие и не приводят к значительному образованию новых дефектов в образцах.

Заключение

Автор статьи исследовал влияние температуры и осевой нагрузки на изменения степени поврежденности известняков Касимовского и Сарыташского месторождения и пришел к следующим выводам:

- По результатам компьютерного моделирования была подтверждена эффективность подхода к оценке полного прогрева образца горной породы по анализу зависимости $V_p(t)$. Для достижения более надежного результата следует продолжать нагрев после выполаживания зависимости $V_p(t)$ дополнительные 150–200 с.

- Экспериментально показано влияние температуры на рост поврежденности геоматериала. В более пористых породах наблюдается более интенсивное дефектообразование при росте температуры.

- Осевое давление в значительной мере препятствует образованию термомеханических дефектов. С ростом осевого давления до $\sigma = 9$ МПа приращение

поврежденности с ростом температуры от 20 до 100 °С для плотных известняков Касимовского месторождения со-

кращается на 24%, а для пористых известняков Сары-Ташского месторождения — на 48%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kahraman S.* Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2001. Vol. 38. No 7. Pp. 981 – 994. DOI: 10.1016/S1365-1609(01)00039-9.

2. *Karakul H., Ulusay R.* Empirical correlations for predicting strength properties of rocks from P-wave velocity under different degrees of saturation // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2013. Vol. 46. No 5. Pp. 981 – 999.

3. *Хаят М. Б., Али Д., Рехман Ю. А., Салим А., Мустафа Н.* Разработка эмпирических зависимостей оценки предела прочности пород на одноосное сжатие с помощью неразрушающих методов контроля // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. — 2019. — № 6. — С. 25 – 34.

4. *Johnston J. E., Christensen N. I.* Seismic anisotropy of shales // *Journal of Geophysical Research*. 1995. Vol. 100. Pp. 5991 – 6003.

5. *Kim H., Cho J. W., Song I., Min K. B.* Anisotropy of elastic moduli, P-wave velocities, and thermal conductivities of Asan Gneiss, Boryeong Shale, and Yeoncheon Schist in Korea // *Engineering Geology*. 2012. Vol. 147 – 148. Pp. 68 – 77.

6. *Gladwin M. T., Stagey F. D.* Ultrasonic pulse velocity as a rock stress sensor // *Tectonophysics*. 1974. Vol. 21. No 1 – 2. Pp. 39 – 45.

7. *Gladwin M. T.* Ultrasonic stress monitoring in underground mining // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1982. Vol. 19. No 5. Pp. 221 – 228.

8. *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.

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. *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.

11. *Scheu B., Kern H., Spieler O., Dingwell D. B.* Temperature dependence of elastic P- and S-wave velocities in porous Mt. Unzen dacite // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2006. Vol. 153. Pp. 136 – 147.

12. *Christaras B., Auger F., Mosse E.* Determination of the moduli of elasticity of rocks. Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods // *Materials and Structures*. 1994. Vol. 27. No 4. Pp. 222 – 228.

13. *Gurevich B., Makarynska D., Pervukhina M.* Ultrasonic moduli for fluid-saturated rocks: Mavko-Jizba relations rederived and generalized // *Geophysics*. 2009. Vol. 74. No 4. Pp. N25–N30.

14. *Yasar E., Erdogan Y.* Correlating sound velocity with the density, compressive strength and young's modulus of carbonate rocks // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2004. Vol. 41. Pp. 871 – 875.

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

16. *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.

17. Николенко П. В. Методические вопросы установления влияния термобарических воздействий на скорость распространения ультразвуковых колебаний в горных породах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 9. — С. 160–167. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-160-167.
18. Čermak V., Rybach L. Thermal properties: Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks. Berlin: Springer, 1982. 343 p.
19. Jaeger J. C., Cook N. G. W., Zimmerman R. W. Fundamentals of rock mechanics, 4th edn. London: Chapman & Hall, 2007. 475 p. **ИДБ**

REFERENCES

1. Kahraman S. Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2001. Vol. 38. No 7. Pp. 981–994. DOI: 10.1016/S1365-1609(01)00039-9.
2. Karakul H., Ulusay R. Empirical correlations for predicting strength properties of rocks from P-wave velocity under different degrees of saturation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2013. Vol. 46. No 5. Pp. 981–999.
3. Khayat M. B., Ali D., Rekhman Yu. A., Salim A., Mustafa N. Developing empirical models for uniaxial compressive strength prediction by using non-destructive test results. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2019, no 6, pp. 25–34. [In Russ].
4. Johnston J. E., Christensen N. I. Seismic anisotropy of shales. *Journal of Geophysical Research*. 1995. Vol. 100. Pp. 5991–6003.
5. Kim H., Cho J. W., Song I., Min K. B. Anisotropy of elastic moduli, P-wave velocities, and thermal conductivities of Asan Gneiss, Boryeong Shale, and Yeoncheon Schist in Korea. *Engineering Geology*. 2012. Vol. 147–148. Pp. 68–77.
6. Gladwin M. T., Stagey F. D. Ultrasonic pulse velocity as a rock stress sensor. *Tectonophysics*. 1974. Vol. 21. No 1–2. Pp. 39–45.
7. Gladwin M. T. Ultrasonic stress monitoring in underground mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1982. Vol. 19. No 5. Pp. 221–228.
8. 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.
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. 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.
11. Scheu B., Kern H., Spieler O., Dingwell D. B. Temperature dependence of elastic P- and S-wave velocities in porous Mt. Unzen dacite. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2006. Vol. 153. Pp. 136–147.
12. Christaras B., Auger F., Mosse E. Determination of the moduli of elasticity of rocks. Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods. *Materials and Structures*. 1994. Vol. 27. No 4. Pp. 222–228.
13. Gurevich B., Makarynska D., Pervukhina M. Ultrasonic moduli for fluid-saturated rocks: Mavko-Jizba relations rederived and generalized. *Geophysics*. 2009. Vol. 74. No 4. Pp. N25–N30.
14. Yasar E., Erdogan Y. Correlating sound velocity with the density, compressive strength and young's modulus of carbonate rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2004. Vol. 41. Pp. 871–875.
15. Uglov A. L., Erofeev V. I., Smirnov A. N. *Akusticheskiy kontrol' oborudovaniya pri izgotovlenii i ekspluatatsii* [Acoustical control of equipment during manufacture and operation], Moscow, Nauka, 2009. 279 p.

16. 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.

17. Nikolenko P.V. Methodical aspects of determination of thermobaric effects on ultrasonic vibration velocity in rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no 9, pp. 160–167. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-160-167.

18. Čermak V., Rybach L. *Thermal properties: Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks*. Berlin: Springer, 1982. 343 p.

19. Jaeger J.C., Cook N.G.W., Zimmerman R.W. *Fundamentals of rock mechanics*, 4th edn. London: Chapman & Hall, 2007. 475 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Николенко Петр Владимирович — канд. техн. наук, доцент,
e-mail: p.nikolenko@misis.ru, НИТУ «МИСиС».

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

P.V. Nikolenko, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail: p.nikolenko@misis.ru,
National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia.

Получена редакцией 12.08.2020; получена после рецензии 14.09.2020; принята к печати 10.10.2020.

Received by the editors 12.08.2020; received after the review 14.09.2020; accepted for printing 10.10.2020.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ПРОГНОЗА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВЫРАБОТОК ЧЕРЕЗ ЦЕЛИК РАВНЫЙ ТРЕМ ПРОЛЕТАМ ВЫРАБОТКИ (2020, № 6, СВ 22, 16 с. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-22-3-13)

Тхориков Андрей Игоревич¹ — аспирант, e-mail: s175023@stud.spmi.ru,

Сотников Роман Олегович¹ — аспирант, Глинский Виталий Витальевич¹ — аспирант,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

При наращивании мощностей по добыче железной руды необходим прогноз напряженно-деформированного состояния рудного массива и прогноз устойчивости выработок. Для этого используются инструменты компьютерного моделирования, например комплекс «Abaqus CAE». Несмотря на использование допущений, использование моделирования позволяет приблизиться к реальным условиям. Проведено сравнение двух методов проведения выработок через целик равный 1-м и 2-м пролетам с методом проведения через целик равный трем пролетам выработки.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, прогноз, целик, устойчивость, геомеханическое обоснование, вертикальные смещения, метод конечных элементов.

COMPUTER SIMULATION OF GEOMECHANICAL PROCESSES FOR PREDICTION OF STRAIN-STRESS STATE IN FIELD DEVELOPING OF RICH IRON DEPOSITS

A.I. Tkhorikov¹, Graduate Student, e-mail: s175023@stud.spmi.ru,

R.O. Sotnikov¹, Graduate Student, V.V. Glinskiy¹, Graduate Student,

¹ Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

When increasing the capacity for iron ore production, it is necessary to forecast the stress-strain state of the ore mass and forecast the stability of workings. For this purpose, computer modeling tools are used, such as «Abaqus CAE» complex. Despite the use of assumptions, the use of modeling allows you to get closer to real conditions. The comparison of two methods of carrying out workings through a pillar equal to the 1st and 2nd spans with the method of carrying out workings through a pillar equal to three spans is carried out.

Key words: stress-strain state, forecast, pillar, stability, geomechanical justification, vertical displacements, finite element method.