ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
GIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2019;5:89-96

УДК 622.02:539.2 DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-89-96

УСТАНОВКА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ОБРАЗЦАХ ГЕОМАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

П.В. Николенко[1], В.Л. Шкуратник[1]

[1] НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: ftkp@mail.ru

Аннотация: Приводится описание лабораторной установки для ультразвуковых измерений на образцах горных пород и искусственных материалов, подвергаемых переменным термобарическим воздействиям. Стенд состоит из основных блоков: термического блока, предназначенного для нагрева и поддержания заданной температуры исследуемого образца, блока одноосного механического нагружения образца и блока ультразвуковых измерений в нем. В основе конструкции термического блока лежит использование полупроводниковых термоэлектрических преобразователей (ТЭП) на основе эффекта Пельтье. Использование последних позволяет производить нагрев образца, находящегося непосредственно под прессом, при этом достигаются сравнительно низкие инерциальность и уровень акустических помех. Контроль за уровнем температуры обеспечивается замкнутой петлей обратной связи с использованием термисторов, расположенный между ТЭП и поверхностью нагреваемого образца. Для эффективного теплообмена ТЭП с окружающей средой применено комбинированное водно-воздушное охлаждение. Управление термическим блоком осуществляется вручную с помощью блока потенциометров, либо посредством управляющих команд с персонального компьютера по интерфейсу USB. В качестве блока механического нагружения использовано серийно выпускаемый малогабаритный пресс ГТ 2.0.8-2. Блок ультразвуковых измерений состоит из генератора зондирующих импульсов, АЦП с частотой дискретизации до 10 МГц, пары акустических преобразователей с несущей частотой 500 кГц и персонального компьютера. Блок позволяет в автоматическом режиме определять скорость распространения упругих волн в образцах, их спектральные и энергетические характеристики в изменяющихся термобарических условиях.

Ключевые слова: лабораторный стенд, термобарические воздействия, образцы горных пород, эффект Пельтье, ультразвук, контроль, напряженное состояние.

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

Для цитирования: *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.

Laboratory setup for ultrasonic testing of rock samples in variable temperature and pressure conditions

P.V. Nikolenko[1], V.L. Shkuratnik[1]

[1] National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia, e-mail: ftkp@mail.ru

© П.В. Николенко, В.Л. Шкуратник. 2019.

Abstract: A description of a laboratory setup for ultrasonic measurements on rock samples and artificial materials subjected to varying temperature and pressure is given. The setup consists of three main units: a thermal unit designed to heat and maintain a predetermined temperature of the sample under study, a unit of uniaxial mechanical loading and an ultrasonic measurement unit. The design of the thermal unit is based on the use of semiconductor thermoelectric converters (TEC) based on the Peltier effect. The use of the latter allows the sample to be heated directly under the loading machine, while achieving relatively low inertia and level of acoustic noise. The temperature level is controlled by a closed feedback loop using thermistors located between the TEC and the surface of the heated sample. For effective heat exchange of TEC with the environment, combined water-air cooling is used. The thermal unit is controlled manually using a potentiometer block, or by means of control commands from a PC via the USB interface. Commercially available compact press GT 2.0.8-2 used as a mechanical loading unit. The ultrasonic measurement unit consists of a probe pulse generator, an ADC with a sampling frequency of up to 10 MHz, a pair of acoustic transducers with a resonant frequency of 500 kHz and a personal computer. The unit provides automatic determination of elastic waves propagation speed in samples, their spectral and energy characteristics in varying temperature and pressure conditions.

Key words: laboratory setup, thermobaric effects, rock samples, Peltier effect, ultrasound, control, stress state.

Acknowledgements: This work was done with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (project No. 19-05-00152\19).

For citation: Nikolenko P. V., Shkuratnik V. L. Laboratory setup for ultrasonic testing of rock samples in variable temperature and pressure conditions. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2019;5:89-96. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-89-96.

Введение

Ультразвуковые (УЗ) время-импульсные измерения на образцах горных пород стали активно применяться для решения широкого спектра задач геоконтроля, начиная со второй половины прошлого века. Среди этих задач наиболее важными явились: определение физико-механических и акустических свойств геоматериалов на основе соответствующих детерминированных и корреляционных зависимостей [1—6], а также оценка разномасштабной структурной неоднородности и поврежденности образцов, в частности, для цензурирования их выборок [7] и др. Особая роль принадлежит УЗ исследованиям при установлении базовых закономерностей, описывающих влияние полей различной физической природы на акустические характеристики геосреды, которые необходимы для интерпретации данных разночастотных акустических измерений непосредственно в массиве [8—10]. Очевидно, что среди таких полей наибольшее значение имеют поля механических напряжений и температур, проявления которых, в той или иной мере, всегда наблюдаются в условиях реального массива. Отметим, что приоритет в исследовании влияния указанных полей на скорости распространения продольных и поперечных волн на образцах горных пород различных генотипов принадлежит отечественной научной школе М.П. Воларовича из института Физики Земли [11].

Имеется ряд разработок аппаратурного обеспечения УЗ измерений на образцах горных пород в условиях термобарических воздействий [12—14]. Как правило, они достаточно сложны, характеризуются значительными габаритами, относительно высокими акустическими помехами, инерционностью термического воздействия и влиянием такого воздействия не только на сам исследуемый

образец, но и на элементы, обеспечивающие механическое нагружение, а также элементы электроакустического измерительного тракта.

В связи с этим в рамках настоящей работы предлагается описание принципов построения и технических характеристик установки для УЗ измерений на образцах геоматериалов в условиях термобарических воздействий, которая во многом лишена указанных недостатков. Последнее достигается за счет использования для термического воздействия на образец термоэлектрических преобразователей (ТЭП) на основе эффекта Пельтье, сущность которого заключается в выделении или поглощении тепла в местах контактов (спаях) разнородных проводников и полупроводников при протекании через образуемую ими цепь постоянного тока [15]. Указанные ТЭП имеют сравнительно небольшие габариты и инерционность, возможность работы на нагревание и охлаждение образцов, не создают акустических шумов. Их главные недостатки — низкий КПД и относительно большая потребляемая мощность для рассматриваемой установки принципиального значения не имеют.

Описание лабораторной установки

Разработанная установка, внешний вид которой представлен на рис. 1, состоит из трех блоков: термического блока, предназначенного для термического нагружения и поддержания заданной температуры исследуемого образца, блока одноосного механического нагружения образца и блока УЗ измерений в нем.

Термический блок, функциональная схема которого приведена на рис. 2, состоит из двух несвязанных контуров — контура электронного управления температурой и контура водяного теплообмена с окружающей средой.

Основными элементами первого контура являются восемь полупроводниковых термоэлектрических преобразователей (ТЭП), работающих на основе эффекта Пельтье. Мощность каждого достигает 60 Вт при напряжении питания 12 В. Уп-

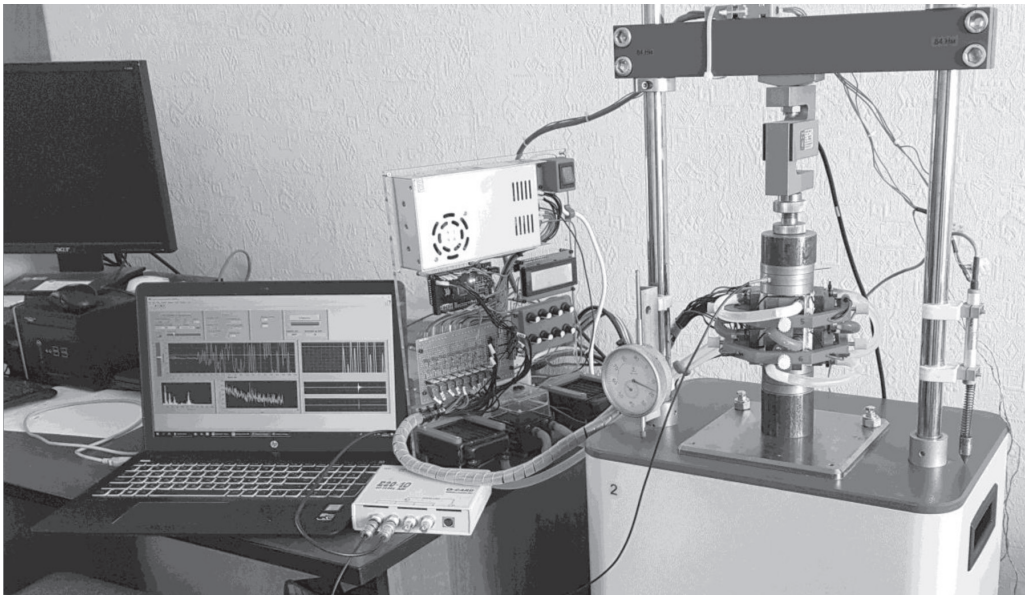

Рис. 1. Внешний вид установки
Fig. 1. Physical configuration

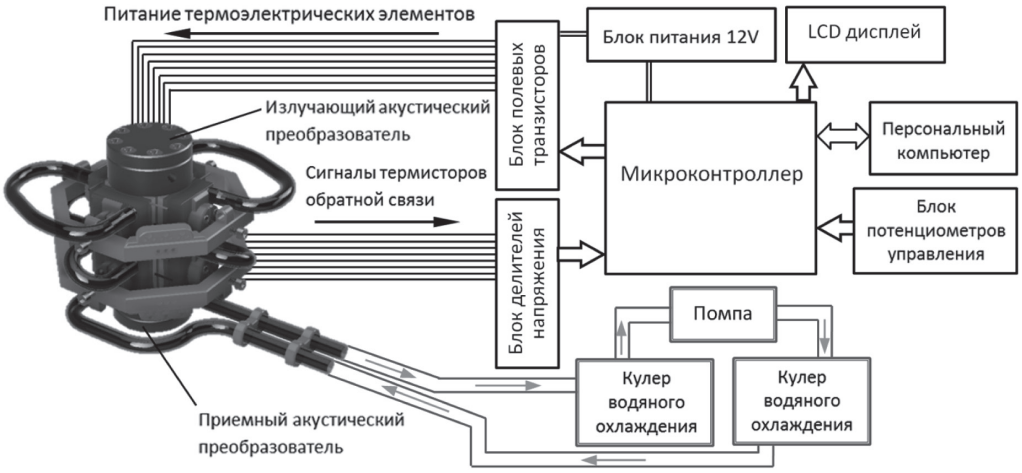

Рис. 2. Функциональная схема термического блока
Fig. 2. Function chart of thermal block

равление каждым ТЭП осуществляется индивидуально посредством низкочастотных широтно-импульсно модулированных сигналов, задаваемых микроконтроллером. При этом для передачи сигналов большой мощности используется блок из полевых транзисторов. Для контроля температуры ТЭП под каждым из них в алюминиевом протекторе закреплен термистор, входящий в цепь делителя напряжения. Переменное и зависящее от температуры напряжение с выхода делителя измеряется встроенными в микроконтроллер 10-bit вольтметрами. Измеренное напряжение конвертируется в температуру на основе тарированных зависимостей. Таким образом, происходит замыкание петли обратной связи в контуре и обеспечивается возможность поддержания заданной температуры.

Одной из особенностей использования ТЭП на основе эффекта Пельтье является то, что при подаче на него разности потенциалов, на его противоположных сторонах образуется разность температур. При этом для работы ТЭП крайне важно обеспечивать для противоположной от «рабочей» стороны ТЭП эффективный теплообмен с окружающей средой. На практике для этого, как правило, используют пассивные и активные системы воздушного охлаждения. В рамках создания лабораторного стенда ставилась задача сделать блок температурного нагружения образца как можно компактнее, поэтому была сконструирована система активного водно-воздушного охлаждения, состоящая из восьми водяных радиаторов (по одному для каждого из ТЭП), соединенных в единую систему с электрической помпой и двумя высокопроизводительными кулерами. Таким образом, вне зависимости от режима работы установки (нагрева или охлаждения) без изменения ее конструкции происходит эффективный теплообмен с окружающей средой и повышается КПД ТЭП.

В качестве блока механического нагружения потенциально может быть использовано любое подходящее прессовое оборудование. В данном случае был использован малогабаритный пресс ГТ 2.0.8-2.

Блок УЗ измерений позволяет получать значения измеряемых информативных параметров контроля и фиксировать их изменения в процессе термобарических испытаний образцов. Он состоит из генератора возбуждающих импульсов (ГВИ), пары специально сконструиро-

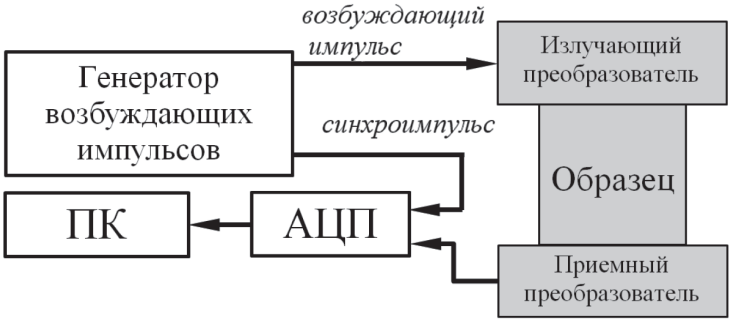

Рис. 3. Функциональная схема блока ультразвуковых измерений
Fig. 3. Function chart of ultrasonic measurement block

ванных силопередающих акустических преобразователей, аналого-цифрового преобразователя Е20-10 с частотой дискретизации до 10 МГц и персонального компьютера. Принципиальная схема блока представлена на рис. 3.

Принцип работы блока следующий. ГВИ генерирует электрический сигнал в виде меандра с максимальной амплитудой до 300 В, который подается на излучающий преобразователь и одновременно на вход АЦП, выполняя роль синхроимпульса. Выходная цепь приемного преобразователя также подключена к входу АЦП, что позволяет по разности прихода синхроимпульса и первого вступления принятого акустического сигнала определять время распространения продольной волны с точностью до 0,2 мкс. Выделение первого вступления производится в автоматизированном режиме. После фильтрации шумов по пороговому принципу, определяется положение первого максимума зарегистрированного сигнала. Для получения времени первого вступления от этой величины отнимается 1/4 длительности первого периода. На рис. 4 представлены пример регистрируемой волновой формы УЗ сигнала и его нормированный спектр. Соотношение сигнал/шум при выделении первого вступления составляет 4 к 1.

Помимо определения времени распространения УЗ сигнала (а значит и его

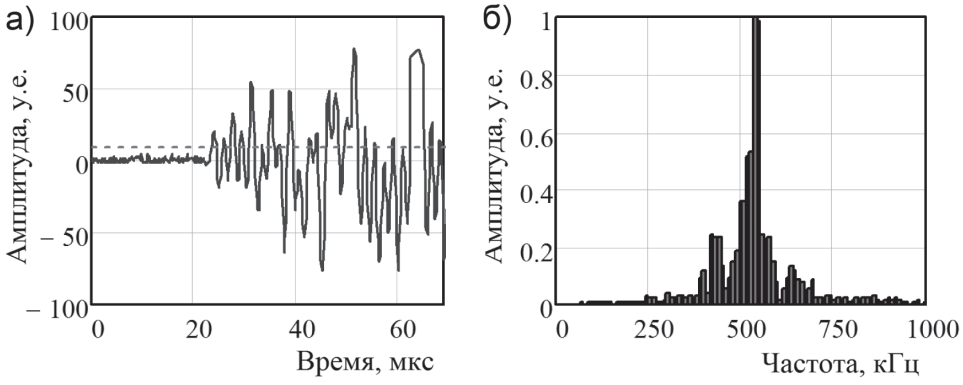

Рис. 4. Волновая форма (а) и нормированный спектр (б) регистрируемого ультразвукового сигнала (пунктиром показан пороговый уровень фильтрации шумов)
Fig. 4. Wave form (a) and normalized spectrum (b) of recorded ultrasonic signal (dashed line shows noise filtering threshold)

Основные технические характеристики установки
Basic specifications of installation

Характеристика	Значение
Диапазон температур	-15 °C ... +130 °C
Скорость нагрева	до 20 град./с.
Скорость охлаждения	до 5 град./с.
Максимальное усилие пресса	до 50 кН
Точность определения времени первого вступления продольной волны	± 0,2 мкс
Длина записи одной волновой формы	до 4096 отсчетов (820 мкс)
Разрядность АЦП	14 бит

скорости на известной базе) блок реализует возможность сохранения полных волновых форм зарегистрированных импульсов для их дальнейшей спектральной, корреляционной и др. обработки.

Основные технические характеристики установки представлены в таблице.

Заключение

Разработанная установка позволяет производить термобарические испытания образцов геоматериалов, а также различных искусственных материалов, выступающих в роли модельных. Основной особенностью установки можно считать возможность производить нагрев или охлаждение и одновременное ультразвуковое прозвучивание образцов в процессе механического нагружения на прессовом оборудовании. Установку отличает малая инерционность и высокая точность контроля за температурой нагрева, а также низкая погрешность определения основных акустических характеристик изучаемых материалов. Благодаря невысокому уровню собственных шумов установки, она может быть использования для проведения не только активных, но и пассивных ультразвуковых измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pervukhina M., Gurevich B., Dewhurst D.N., Siggins A.F.* Applicability of velocity—stress relationships based on the dual porosity concept to isotropic porous rocks // Geophysical Journal International, 2010, Vol. 181, no 3, pp. 1473—1479.

2. *Lokajíček T., Svitek T., Petružálek M.* Laboratory approach to the study of dynamic and static bulk anisotropy in rock under high hydrostatic pressure by simultaneous P. S sounding and sample deformation measurements on spheres / 48th US Rock Mechanics Geomechanics Symposium, 2014, Vol. 2, pp. 988—994.

3. *Pimienta L., Fortin J., Guéguen Y.* Bulk modulus dispersion and attenuation in sandstones // Geophysics, 2015, Vol. 80, no 2, pp. 111—127.

4. *Shkuratnik V.L., Nikolenko P.V., Koshelev A.E.* Stress dependence of elastic p-wave velocity and amplitude in coal specimens under varied loading conditions // Journal of Mining Science, 2016, Vol. 52. no 5. pp. 873—877.

5. *Wei X., Wang S.-X., Zhao J.-G., Tang G.-Y., Deng J.-X.* Laboratory study of velocity dispersion of the seismic wave in fluid-saturated sandstones // Chinese Journal of Geophysics (Acta Geophysica Sinica), 2015, Vol. 58, no 9, pp. 3380—3388.

6. *Li S.H., Zhu W.C., Niu L.L.*, Yu M., *Chen C.F.* Dynamic Characteristics of Green Sandstone Subjected to Repetitive Impact Loading: Phenomena and Mechanisms // Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, Vol. 51, no 6, pp. 1921—1936.

7. *Николенко П.В., Челур М.Д.* Об использовании акустико-эмиссионных эффектов в композиционных материалах для оценки динамики напряженно-деформированного состояния

массива в окрестностях горной выработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 12. — С. 134—141.

8. *Shkuratnik V.L., Nikolenko P.V., Kormnov A.A.* Ultrasonic correlation logging for roof rock structure diagnostics // Journal of Mining Science, 2015, Vol. 51, no 3. pp. 456—461.

9. *Назаров Л.А.* Определение свойств структурированного породного массива акустическим методом // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 1999. — № 3. — С. 36—44.

10. *Feng Z., Mingjie X., Zhonggao M., Liang C., Zhu Z., Juan L.* An experimental study on the correlation between the elastic wave velocity and microfractures in coal rock from the Qingshui basin // Journal of Geophysics and Engineering, 2012, Vol. 9, no 6, pp. 691—696.

11. *Volarovich M.P.* The investigation of elastic and absorption properties of rocks at high pressures and temperatures // Tectonophysics, 1965, Vol. 2, no 2—3, pp. 211—217.

12. *Ostadhassan M., Tamimi N.* Mechanical behavior of salt rock at elevated temperature // 48th US Rock Mechanics Geomechanics Symposium, 2014, Vol. 3, pp. 1473—1480.

13. *Chryssanthakis P., Westerdahl H., Rose E., Rhett D., Pederson S.* High temperature triaxial tests with ultrasonic measurements on Ekofisk chalk / 20th Century Lessons, 21st Century Challenges, 1999, pp. 573—578.

14. *Абдулагатова З.З.*, Эмиров С., *Абдулагатов И.М.* Влияние температуры и давления на теплопроводность и скорость звука в андезитовых горных породах // Ультразвук и термодинамические свойства вещества. — 2006. — № 33. — С. 5—23.

15. *Disalvo F.J.* Thermoelectric cooling and power generation // Science, 1999, Vol. 285, no 5428, pp. 703—706. ГИАБ

REFERENCES

1. Pervukhina M., Gurevich B., Dewhurst D.N., Siggins A.F. Applicability of velocity—stress relationships based on the dual porosity concept to isotropic porous rocks. *Geophysical Journal International*, 2010, Vol. 181, no 3, pp. 1473—1479.

2. Lokajíček T., Svitek T., Petružálek M. Laboratory approach to the study of dynamic and static bulk anisotropy in rock under high hydrostatic pressure by simultaneous P. S sounding and sample deformation measurements on spheres. *48th US Rock Mechanics Geomechanics Symposium*, 2014, Vol. 2, pp. 988—994.

3. Pimienta L., Fortin J., Guéguen Y. Bulk modulus dispersion and attenuation in sandstones. *Geophysics*, 2015, Vol. 80, no 2, pp. 111—127.

4. Shkuratnik V.L., Nikolenko P.V., Koshelev A.E. Stress dependence of elastic p-wave velocity and amplitude in coal specimens under varied loading conditions. *Journal of Mining Science*, 2016, Vol. 52. no 5. pp. 873—877.

5. Wei X., Wang S.-X., Zhao J.-G., Tang G.-Y., Deng J.-X. Laboratory study of velocity dispersion of the seismic wave in fluid-saturated sandstones. *Chinese Journal of Geophysics (Acta Geophysica Sinica)*, 2015, Vol. 58, no 9, pp. 3380—3388.

6. Li S.H., Zhu W.C., Niu L.L., Yu M., Chen C.F. Dynamic Characteristics of Green Sandstone Subjected to Repetitive Impact Loading: Phenomena and Mechanisms. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, Vol. 51, no 6, pp. 1921—1936.

7. Nikolenko P.V., Chepur M.D. Methods and technical solutions for estimation of dynamics of the stress-strain state of the rock massif based on acoustic emission effects in composite materials. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2018, no 12, pp. 134—141. [In Russ].

8. Shkuratnik V.L., Nikolenko P.V., Kormnov A.A. Ultrasonic correlation logging for roof rock structure diagnostics. *Journal of Mining Science*, 2015, Vol. 51, no 3. pp. 456—461.

9. Nazarov L.A. Determination of structured rock mass properties by acoustic method. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 1999, no 3, pp. 36—44. [In Russ].

10. Feng Z., Mingjie X., Zhonggao M., Liang C., Zhu Z., Juan L. An experimental study on the correlation between the elastic wave velocity and microfractures in coal rock from the Qingshui basin. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2012, Vol. 9, no 6, pp. 691—696.

11. Volarovich M.P. The investigation of elastic and absorption properties of rocks at high pressures and temperatures. *Tectonophysics*, 1965, Vol. 2, no 2—3, pp. 211—217.

12. Ostadhassan M., Tamimi N. Mechanical behavior of salt rock at elevated temperature. *48th US Rock Mechanics Geomechanics Symposium*, 2014, Vol. 3, pp. 1473—1480.

13. Chryssanthakis P., Westerdahl H., Rose E., Rhett D., Pederson S. High temperature triaxial tests with ultrasonic measurements on Ekofisk chalk. *20th Century Lessons, 21st Century Challenges*, 1999, pp. 573—578.

14. Abdulagatova Z.Z., Emirov S., Abdulagatov I.M. Effect of temperature and pressure on thermal conductivity and sound velocity in andesitic rocks. *Ul'trazvuk i termodinamicheskie svoystva veshchestva*. 2006, no 33, pp. 5—23. [In Russ].

15. Disalvo F.J. Thermoelectric cooling and power generation. *Science*, 1999, Vol. 285, no 5428, pp. 703—706.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Николенко Петр Владимирович[1] — кандидат технических наук, доцент, e-mail: petrov-87@mail.ru,
Шкуратник Владимир Лазаревич[1] — доктор технических наук, профессор, e-mail: ftkp@mail.ru,
[1] НИТУ «МИСиС».
Для контактов: Шкуратник В.Л., e-mail: ftkp@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

P.V. Nikolenko[1], Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: petrov-87@mail.ru,
V.L. Shkuratnik[1], Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: ftkp@mail.ru,
[1] National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.
Corresponding author: V.L. Shkuratnik, e-mail: ftkp@mail.ru.

РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЕМ И РЕАЛИЗАЦИЕЙ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ

(№ 1182/05—19 от 02.04.2019; 16 с.)

Шогенова Залина Асланбековна — старший преподаватель, e-mail: shogenova.88@mail.ru, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова.

Рассмотрен вопрос использования трехмерных моделей прочностных характеристик массивов горных пород, определяемых в процессе бурения, для совершенствования технологии управления проектированием и реализацией буровзрывных работ.

Ключевые слова: буровзрывные работы, трехмерная модель прочностных характеристик, управление проектированием, открытые горные работы, искусственная трещиноватость.

IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY OF MANAGEMENT OF DESIGN AND REALIZATION OF DRILLING-EXPLOSION WORKS ON THE BASIS OF USING THREE-DIMENSIONAL MODELS OF THE STRENGTH OF THE MASSIFIES OF MOUNTAIN DEFINITIONS, DETERMINED IN THE PROCESS OF CHARACTERISTICS OF THE ARRAY

Z.A. Shogenova, Senior Lecturer, e-mail: shogenova.88@mail.ru,
Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov,
360004, Nalchik, North Caucasian Federal district, Kabardino-Balkarian Republic, Russia.

This article is devoted to the topical issue of using three-dimensional models of the strength characteristics of rock massifs determined in the drilling process to improve the technology for managing the design and implementation of drilling and blasting operations.

Key words: drilling and blasting, three-dimensional model of strength characteristics, design management, open-pit mining, artificial fracturing.