ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(4-1):41–51
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.023.2+622.335 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_41

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АНТРАЦИТА ПРИ ТЕМПЕРАТУРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

П. Н. Иванов[1], Д. И. Блохин[1,2], И. М. Закоршменный[2]

[1] Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС»
Горный институт, Москва, Россия;
[2] Институт проблем комплексного освоения недр им. академика
Н. В. Мельникова РАН, Москва, Россия

Аннотация: В данной работе представлены экспериментальные данные лабораторных термомеханических испытаний образцов антрацита Горловского угольного бассейна (Новосибирская область). В работе подтверждено, что физико-механические свойства геоматериалов претерпевают значительные изменения при температурных воздействиях. Результаты экспериментов демонстрируют достаточно существенное уменьшение значений предела прочности при одноосном сжатии σ_c и статического модуля упругости E испытываемых образцов антрацита. Показаны обусловленные наличием анизотропии механических свойств относительно направления напластования различия в температурных зависимостях прочностных и деформационных параметров подвергаемых нагреву образцов антрацита. Уделено внимание такому принципиально значимому аспекту экспериментальной геомеханики, как повышение достоверности результатов лабораторных испытаний геоматериалов. Особенностью проведенных экспериментальных исследований является использование неразрушающих методов лазерно-ультразвуковой диагностики, которые применялись для качественной оценки нарушенности внутренней структуры образцов антрацита, что позволяло провести их последующую отбраковку («цензурирование»). Это позволило создать статистически значимую выборку образцов, которые обладали слабой степенью изменчивости физико-механических свойств. Таким образом, был сделан вывод о перспективности комплексирования разрушающих и неразрушающих (интроскопических) методов исследования геоматериалов для повышения эффективности количественных оценок их прочностных и деформационных характеристик.

Ключевые слова: геоматериалы, антрацит, структура, анизотропия, напластование, физико-механические свойства, лазерно-ультразвуковая диагностика, температурное воздействие, предел прочности при одноосном сжатии, модуль упругости.

Для цитирования: *Иванов П. Н., Блохин Д. И., Закоршменный И. М.* Экспериментальное исследование изменения физико-механических свойств антрацита при температурном воздействии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 4-1. — С. 41–51. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_41.

© П. Н. Иванов, Д. И. Блохин, И. М. Закоршменный. 2021

Experimental study of change in physical and mechanical properties of anthracite under temperature exposure

P. N. Ivanov[1], D. I. Blokhin[1,2], I. M. Zakorshmennyy[2]

[1] National Research Technological University «MISiS», Moscow, Russia;
[2] Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract: The paper presents the experimental data of laboratory thermomechanical tests of anthracite specimens from the Gorlovsky Coal Basin (Novosibirsk Region). It is confirmed that the physical and mechanical properties of geomaterials undergo significant changes under conditions of higher temperature. The experimental results demonstrate a quite significant decrease in the ultimate uniaxial compressive strength σc and the static modulus of elasticity E of the anthracite samples. It is shown that anisotropy of mechanical properties accounts for differences in the temperature dependences of the strength characteristics and deformation behavior of the anthracite specimens subjected to heating. Consideration is given to such a fundamentally significant aspect of experimental geomechanics as the reliability of the results of laboratory tests of geomaterials. Importantly, our experimental investigation involved non-destructive laser ultrasonic diagnostics to qualitatively assess the degree of disturbances of the internal structure of anthracite specimens; subsequently some specimens were rejected («censored»). As a result, a statistically significant sample of specimens is created, having low variability in the physical and mechanical properties. Thus, it can be concluded that the efficiency of quantitative assessment of the strength characteristics and deformation behavior of geomaterials can be increased if both destructive and non-destructive (introscopic) methods are employed.

Key words: geomaterials, anthracite, structure, anisotropy, stratification, physical and mechanical properties, laser-ultrasonic diagnostics, temperature effect, ultimate strength in uniaxial compression, elastic modulus.

For citation: Ivanov P. N., Blokhin D. I., Zakorshmennyy I. M. Experimental study of change in physical and mechanical properties of anthracite under temperature exposure. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(4-1):41–51. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_41.

Введение

Исследования влияния температурных воздействий на физико-механические свойства геоматериалов, в т. ч. и углей, проводятся во всем мире уже не одно десятилетие, но по-прежнему остаются актуальными и практически значимыми [1—5]. При этом для оценки значений прочностных и деформационных характеристик горных пород, подвергаемых указанным воздействиям, в настоящее время используется солидный «арсенал» как разрушающих, так и неразрушающих методов механических и геофизических испытаний [6—11].

Следует отметить, что лабораторные испытания на одноосное сжатие горных пород являются общепризнанными и до сих пор остаются наиболее эффективным способом определения их прочностных и деформационных характеристик. Однако, несмотря на наличие у исследователей современного прецизионного прессового и измерительного оборудования, результаты таких испытаний для слабых скальных пород и углей зачастую оказываются неоднозначными [12]. Причинами таких результатов измерений для указанных типов геоматериалов может быть как невозможность изготовления образцов

правильной формы, так и затруднения при формировании статистически значимой выборки образцов, обладающих слабой степенью изменчивости физико-механических свойств. Если первая проблема может быть решена с использованием высококлассных отрезных и шлифовальных станков, то стандартизированных методик, регламентирующих отбор («цензурирование») образцов, обладающих физико-механическими характеристиками, количественные значения которых лежат в одном диапазоне, в настоящее время не существует.

Основная цель настоящей работы — получение экспериментальных зависимостей, характеризующих динамику изменений механических параметров образцов антрацита при температурных воздействиях. Вторая, не менее важная задача, ставившаяся в описываемом исследовании, — разработка методического подхода к эффективному обеспечению достоверности результатов механических и термических испытаний посредством комплексирования стандартных способов измерений со средствами современной неразрушающей структуроскопии.

Методы и материалы

Объектом исследования являются антрациты Горловского угольного бассейна, расположенного в 100 км от города Новосибирска. На фотографии отобранных проб антрацита (рис. 1) достаточно четко прослеживается их слоисто-пластинчатая структура.

Фотография изготовленных образцов антрацита представлена на рис. 3.

Подготовка образцов антрацита для испытаний (кубики с геометрическими размерами 30x30x30 мм) осуществлялась с помощью отрезного станка «Struers — Labotom-15»

Рис. 1. Внешний вид отобранных проб антрацита
Fig. 1. Appearance of anthracite samples

(рис. 2, *а*). Грани образцов полировались на автоматическом шлифовальном станке «Struers — Tegramin-25» (рис. 2, *б*).

Для получения достоверных результатов механических и термических испытаний, как было сказано выше, необходима реализация процедуры отбора образцов антрацита, принадлежащих к одной статистической совокупности, т. е. образцов со схожими структурными особенностями, а значит и близкими значениями их основных физико-механических характеристик. Очевидная связь структурной нарушенности геоматериалов со значениями их прочностных и деформационных параметров обуславливает привлечение для решения такой задачи неразрушающих методов диагностики, позволяющих по крайней мере косвенно оценивать степень дефектности [13—16].

Одним из активно развиваемых методов неразрушающей диагностики материалов является лазерно-ультразвуковая структуроскопия, чья эффективность для оценки нарушенности горных пород различных типов продемонстри-

(а)

(б)

Рис. 2. Фотографии станков: а — отрезного «Struers — Labotom-15»; б — автоматического шлифовального полировального «Struers — Tegramin-25»
Fig. 2. Photo of the machines: a — Photo of the cutting machine «Struers — Labotom-15», b — Photo of the automatic grinding polishing machine «Struers — Tegramin-25»

рована в многочисленных исследованиях [17—19]. Поэтому для соблюдения ранее выдвинутых требований к проведению описываемых экспериментов перед проведением термомеханических испытаний была проведена указанная неразрушающая диагностика образцов антрацита с помощью прибора «УДЛ-2М» [17—19].

Принципиальная схема установки лазерно-ультразвуковой структуроскопии представлена на рис. 4.

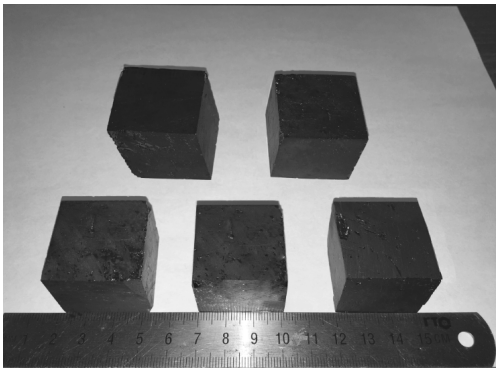


Рис. 3. Подготовленные для испытаний образцы антрацита
Fig. 3. Anthracite samples prepared for testing

Принцип измерений заключается в следующем: сгенерированный лазером *1* короткий наносекундный оптический импульс по оптоволоконному кабелю *2* направляется на одну из свободных поверхностей закрепленного образца антрацита *5*. В результате поглощения оптического импульса антрацитом и последующего расширения нагретой области образца происходит термооптическое возбуждение зондирующих акустических импульсов *4* длительностью 70 нс и амплитудой давления 0,1 МПа. Прошедшие через образец акустические импульсы регистрируются широкополосным пьезоприемником *6*, расположенным на противоположной стороне образца. По оцифрованным с помощью АЦП *7* записям сигналов определяется время их распространения в теле образца, и далее, с учетом известного значения его толщины, рассчитывается скорость акустических продольных волн V_p [20—22]. Измерения значений скоростей V_p проводятся в 10-ти произвольно выбранных точках на свободной поверхности каждого из испытываемых образцов.

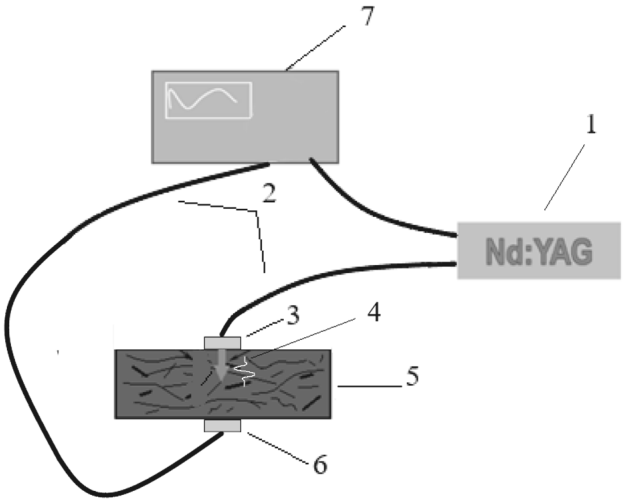


Рис. 4. Принципиальная схема лазерно-ультразвукового структуроскопа: 1 — Nd:YAG лазер; 2 — оптоволоконный кабель; 3 — пьезопреобразователь; 4 — ультразвуковой импульс; 5 — исследуемый образец; 6 — пьезопреобразователь; 7 — АЦП
Fig. 4. Schematic diagram of a laser-ultrasonic structuroscopy: 1 — Nd:YAG laser; 2 — fiber optic cable; 3 — piezoelectric transducer; 4 — ultrasonic pulse; 5 — test sample; 6 — piezoelectric transducer; 7 — ADC

По результатам акустических измерений отбирались образцы антрацита, значения скоростей распространения акустических волн в которых принадлежат диапазону от 2600 до 2900 м/с. Таким образом, была сформирована выборка предназначенных для дальнейших испытаний образцов с близкими значениями физико-механических характеристик.

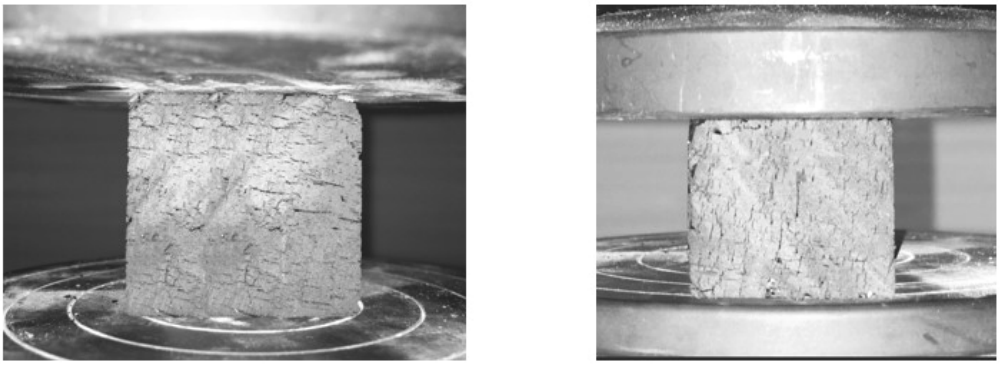
Далее эта выборка была разделена на 5 групп по 10 образцов в каждой. Первая группа образцов, отобранных для механических испытаний, не подвергалась первичному термическому воздействию, т. е. их температура принималась равной 20 °С. Каждая последующая группа была подвержена нагреву до определенной температуры 90 °С, 120 °С, 150 °С и 180 °С соответственно. Нагрев образцов указанных групп осуществлялся с использованием сушильного шкафа ШС-80-01 СПУ. Образцы помещались в сушильный шкаф при начальной температуре 20 °С, и после достижения в рабочей камере выбранного значения температуры выдерживались при ней в течение 1 ч.

После термического воздействия на образцах из каждой группы были проведены механические испытания на одноосное сжатие на электромеханической испытательной машине LFM-50 с максимальной силовой нагрузкой 50 кН.

Результаты

В каждой из групп пять образцов подвергались одноосному сжатию перпендикулярно направлению слоистости (рис. 5, *а*), а оставшиеся пять образцов таким же образом нагружались параллельно направлению слоистости (рис. 5, *б*).

Для всех испытанных образцов были построены зависимости осевого напряжения σ_1 от продольной деформации ε_1.



(а) (б)

Рис. 5. Испытание на одноосное сжатие образцов антрацита: а — перпендикулярно направлению слоистости; б — параллельно направлению слоистости
Fig. 5. Test for uniaxial compression of anthracite specimens: а — perpendicular to the direction of bedding; б — parallel to the direction of lamination

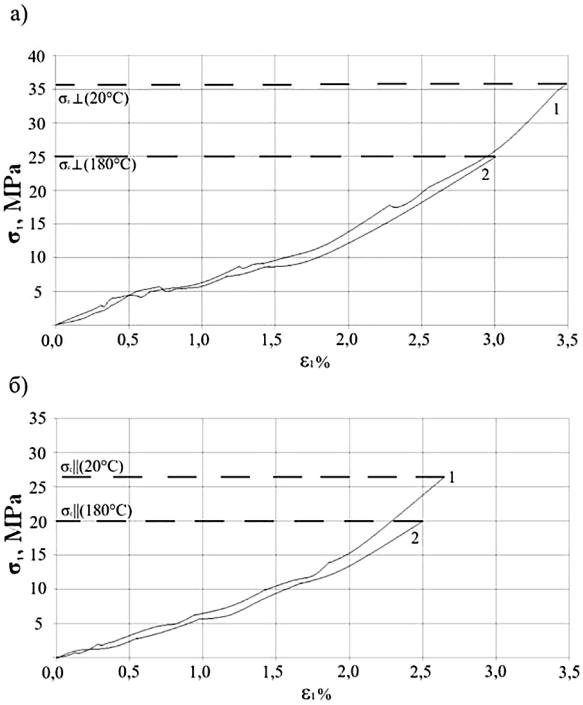


Рис. 6. Зависимости $\sigma_1(\varepsilon_1)$ при нагружении образцов антрацита:
а — перпендикулярно направлению слоистости для двух значений их температуры (1 — для T = 20 °C, 2 — для T = 180 °C); б — параллельно направлению слоистости для двух значений их температуры (1 — для T = 20 °C, 2 — для T = 180 °C)
Fig. 6. Dependences $\sigma_1(\varepsilon_1)$ under loading of anthracite samples: а — perpendicular to the direction of lamination for two values of their temperature (1 — for T = 20 °C; 2 — for T = 180 °C); б — parallel to the direction of lamination for two values of their temperature (1 — for T = 20 °C, 2 — for T = 180 °C

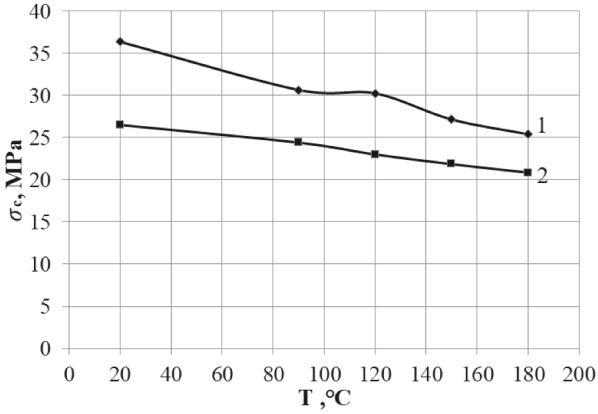


Рис. 7. Зависимости средних значений предела прочности образцов антрацита от температуры: 1 — при нагружении перпендикулярно направлению слоистости $\sigma_{C_\perp}(T)$; 2 — при нагружении параллельно направлению слоистости $\sigma_{C_\parallel}(T)$

Fig. 7. Dependences of the average values of the ultimate strength of anthracite specimens on temperature: 1 — under loading perpendicular to the direction of layering $\sigma_{C_\perp}(T)$; 2 — under loading parallel to the direction of lamination $\sigma_{C_\parallel}(T)$

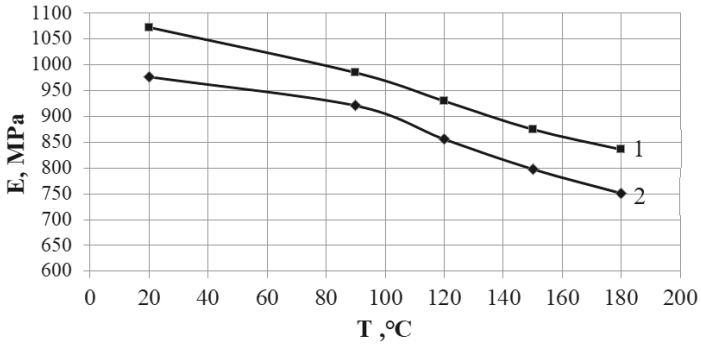


Рис. 8. Зависимости модуля упругости образцов антрацита от температуры E(T): 1 — при нагружении перпендикулярно направлению слоистости $E_\perp(T)$; 2 — при нагружении параллельно направлению слоистости $E_\parallel(T)$

Fig. 8. Dependences of the elastic modulus of anthracite samples on temperature E(T): 1 — under loading perpendicular to the direction of lamination $E_\perp(T)$; 2 — under loading parallel to the lamination direction $E_\parallel(T)$

В качестве примера на рис. 6, *а* представлены диаграммы $\sigma_1(\varepsilon_1)$ для образцов, имевших температуры 20 °С (график 1) и 180 °С (график 2), нагружавшихся перпендикулярно направлению слоистости. На рис. 6, *б* представлены зависимости $\sigma_1(\varepsilon_1)$ для образцов, нагретых до тех же значений температур, но нагружавшихся параллельно направлению слоистости.

Как видно из представленных на рис. 6, *а* графиков, значение предела прочности образца антрацита при его температуре T = 20 °С, нагружавшегося перпендикулярно направлению слоистости $\sigma_{C_\perp}$, составило 36,5 МПа, а для второго образца, испытанного в тех же условиях, но нагретого до 180 °С, это значение уменьшается до $\sigma_{C_\perp}$ = 25,1 МПа, т. е. снижение прочности на одноосное

сжатие составило более 30 %. В случае же нагружения образцов антрацита параллельно направлению слоистости (рис 6, *б*) значение предела прочности $\sigma_{C_{\parallel}}$ снижается примерно на 20 %.

На рис. 7 в виде графиков приведены полученные средние значения пределов прочности образцов антрацита σ_C для всех интервалов теплового воздействия, реализованных в описываемых экспериментах.

По построенным деформационным кривым $\sigma_1(\varepsilon_1)$ были также рассчитаны значения модуля упругости *E*. Динамика изменений средних значений модуля упругости от температуры *E*(*T*) показана на графиках (рис. 8). Как видно из приведенных кривых, значения модуля упругости антрацита плавно уменьшаются с увеличением температуры нагрева образцов. Так, для образцов, нагружавшихся перпендикулярно направлению слоистости, максимальное значение модуля упругости $E_{\perp}$, соответствующее комнатной температуре (T = 20 °C), равняется 1070 МПа, а для образцов, испытанных на сжатие параллельно направлению слоистости, значение аналогичной величины $E_{\perp}$ составило 977 МПа. При испытаниях образцов, нагретых до температуры 180 °C, средние значения модуля упругости $E_{\perp}$ уменьшились до 840 МПа, а средние значения $E_{\parallel}$ — до 750 МПа.

Заключение

1) Механические свойства антрацита претерпевают значительные изменения при термическом воздействии. Так, полученные зависимости предела прочности образцов антрацита и их модуля упругости от температуры показали существенное снижение (до 30 %) этих параметров при повышении значений аргумента на 150—160 °C.

2) Продемонстрированные различия в температурных зависимостях прочностных и деформационных параметров подвергаемых нагреву образцов антрацита, обусловленные наличием анизотропии их механических свойств относительно направления напластования, указывают на необходимость учета этих особенностей при анализе результатов лабораторных и натурных испытаний геоматериалов рассматриваемого типа.

3) Предложенная методология цензурирования проб антрацита, основанная на использовании лазерно-ультразвуковой диагностики, позволяет сформировать предназначенный для дальнейших испытаний набор образцов, обладающих близкими показателями структурной нарушенности, а значит и принадлежащих к одной статистической совокупности. Указанный подход позволяет получить более качественные результаты при лабораторных исследованиях прочностных и деформационных свойств испытываемых геоматериалов, что говорит о перспективности комплексного использования стандартных (разрушающих) и неразрушающих методик механических и физических измерений в такого рода экспериментах.

Благодарности

Авторы признательны д.т.н проф. Е. Б. Черепецкой (НИТУ «МИСиС») за внимание к работе и помощь при проведении лазерно-ультразвуковых исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Опарин В. Н.*, *Киряева Т. А.*, *Усольцева О. М.*, *Цой П. А.*, *Семенов В. Н.* Об особенностях развития нелинейных деформационно-волновых процессов в угольных образцах различной стадии метаморфизма при их нагружении до разрушения в изме-

няющемся поле температур // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2015. — № 4. — С. 3—24.

2. *Yin T. B.*, *Wang P.*, *Li X. B.*, *Shu R. H.*, *Ye Z. Y.* Effects of thermal treatment on physical and mechanical characteristics of coal rock // Journal of Central South University, 2016, Vol. 23, pp. 2336—2345. DOI: 10.1007/s11771—016—3292—9.

3. *Федоров В. А.*, *Ушаков И. В.*, *Шелохвостов В. П.* Влияние температуры на морфологические особенности повреждения кальцита при оптическом пробое // Физика и химия обработки материалов. — 1998. — № 1. — С. 37—40.

4. *Kong B.*, *Li Z.*, *Wang E.* Fine characterization rock thermal damage by acoustic emission technique // Journal of Geophysics and Engineering, 2018, Vol. 15 (1), pp. 1—12. DOI: 10.1088/1742—2140/aa9a54.

5. *Hosseini M.* Effect of temperature as well as heating and cooling cycles on rock properties // Journal of Mining and Environment, 2017, Vol. 8, Issue 4, pp. 631—644. DOI: 10.22044/jme.2017.971.

6. *Иванов Б. М.*, *Фейт Г. Н.*, *Яновская М. Ф.* Механические и физико-химические свойства углей выбросоопасных пластов. — М.: Наука, 1979 — 195 с.

7. *Коссович Е. Л.*, *Эпштейн С. А.*, *Шкуратник В. Л.*, *Минин М. Г.* Перспективы и проблемы использования современной техники микро- и наноиндентирования для диагностики механических свойств углей // Горный журнал. — 2017. — № 12. — С. 25—30. DOI: 10.17580/gzh.2017.12.05.

8. *Дудченко О. Л.*, *Федоров Г. Б.*, *Андреев А. А.* Инновационный способ виброакустической классификации угольных пульп // Уголь. — 2018. — № 6. — С. 67—71. DOI: 10.18796/0041—5790—2018—6-67—71.

9. *Melnikov N. N.*, *Mesyats S. P.*, *Ostapenko S. P.*, *Cherepetskaya E. B.*, *Shibaev I. A.*, *Morozov N. A.*, *Kravcov A.* N, *Konvalinka A.* Investigation of disturbed rock zones in open-pit mine walls by seismic tomography // Key Engineering Materials, 2017, Vol. 755, pp. 147—152. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.147.

10. *Дудченко О. Л.*, *Федоров Г. Б.* Виброакустическая техника для интенсификации обогащения угля // Уголь. — 2019. — № 4. — pp. 62—66. DOI: 10.18796/0041—5790—2019—4-62—66.

11. *Shkuratnik V. L.*, *Novikov E. A.* Physical modeling of the grain size influence on acoustic emission in the heated geomaterials // Journal of Mining Science, 2012, Vol. 48, № 1, pp. 9—14. DOI: https://doi.org/10.1134/S1062739148010029.

12. *Берон А. И.*, *Ватолин Е. С.*, *Койфман М. И.*, *Мохначев М. П.*, *Чирков С. Е.* Свойства горных пород при разных видах и режимах нагружения. — М.: Недра. 1984. — 276 с.

13. *Захаров В. Н.*, *Малинникова О. Н.* Исследование структурных особенностей углей выбросоопасных пластов // Записки Горного института. — 2014. — № 210. — С. 43.

14. *Коссович Е. Л.*, *Эпштейн С. А.*, *Добрякова Н. Н.*, *Минин М. Г.* Структурные особенности и механические свойства антрацита, метаантрацита и графита // Горный журнал. — 2020. — № 4. — С. 25—29. DOI: 10.17580/gzh.2020.04.05.

15. *Victorov S. D.*, *Kochanov A. N.*, *Pachezhertsev A. A.* Experimental study of the microstructural characteristics of the surfaces and volumes of granite samples // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2018, Vol. 82, pp. 786—788. DOI: 10.3103/S1062873818070444.

16. *Han Y.*, *Wang J.*, *Dong Y.*, *Hou Q.*, *Pan J.* The role of structure defects in the deformation of anthracite and their influence on the macromolecular structure // Fuel, 2017, Vol. 206, pp. 1—9. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.05.085.

17. *Shibaev I. A.*, *Morozov D. V.*, *Dudchenko O. L.*, *Pavlov I. A.* Estimation of local elastic moduli of carbon-containing materials by laser ultrasound // Key Engineering Materials, 2018, Vol. 769, pp. 96—101. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.769.96.

18. *Bychkov A. S.*, *Cherepetskaya E. B.*, *Karabutov A. A.*, *Makarov V. A.* Laser optoacoustic tomography for the study of femtosecond laser filaments in air // Laser Physics Letters, 2016, Vol. 13 (8), Article 085401. DOI: 10.1088/1612—2011/13/8/085401.

19. *Zarubin V.*, *Bychkov A.*, *Simonova V.*, *Zhigarkov V.*, *Karabutov A.*, *Cherepetskaya E.* A refraction-corrected tomographic algorithm for immersion laser-ultrasonic imaging of solids

with piecewise linear surface profile // Applied Physics Letters, 2018, Vol. 112, № 214102. DOI: 10.1063/1.5030586.

20. *Karabutov A. A.*, *Podymova N. B.*, *Cherepetskaya E. B.* Determination of uniaxial stresses in steel structures by the laser-ultrasonic method // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2017, Vol. 58 (3), pp. 503 — 510. DOI: 10.1134/S0021894417030154.

21. *Cherepetskaya E. B.*, *Karabutov A. A.*, *Makarov V. A.*, *Mironova E. A.*, *Shibaev I. A.*, *Vysotin N. G.*, *Morozov D. V.* Internal structure research of shungite by broadband ultrasonic spectroscopy // Key Engineering Materials, 2017, Vol. 755, pp. 242 — 247. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.242.

22. *Shibaev I. A.*, *Vinnikov V. A.*, *Stepanov G. D.* Determining elastic properties of sedimentary strata in terms of limestone samples by laser ultrasonics // Mining Informational and Analytical Bulletin, 2020, Vol. 7, pp. 125 — 134. DOI: 10.25018/0236 — 1493 — 2020 — 7-0 — 125 — 134. ГИАБ

REFERENCES

1. Oparin V. N. Kiryaeva T. A. Usoltseva O. M. Tsoi P. A. Semenov V. N. On the features of the development of nonlinear deformation-wave processes in coal samples of various stages of metamorphism during their loading to failure in a changing temperature field. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2015, no. 4. pp. 3 — 24 [In Russ].

2. Yin T. B. Wang P. Li X. B. Shu R. H. Ye Z. Y. Effects of thermal treatment on physical and mechanical characteristics of coal rock. *Journal of Central South University*, 2016, Vol. 23, pp. 2336 — 2345. DOI: 10.1007/s11771-016-3292-9.

3. Fedorov V. A. Ushakov I. V. Shelokhvostov V. P. Effect of temperature on morphologic peculiarities of laser-induced calcite damage . *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*. 1998, Vol. 1, pp. 37 — 40.

4. Kong B. Li Z. Wang E. Fine characterization rock thermal damage by acoustic emission technique. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2018, no. 15 (1), pp. 1 — 12. DOI: 10.1088/1742 — 2140/aa9a54.

5. Hosseini M. Effect of temperature as well as heating and cooling cycles on rock properties. *Journal of Mining and Environment*. 2017, Vol. 8, no. 4, pp. 631 — 644. DOI: 10.22044/jme.2017.971.

6. Ivanov B. M, Faith G. N. Yanovskaya M. F. *Mekhanicheskiye i fiziko-khimicheskiye svoystva vzryvoopasnykh ugol'nykh plastov* [Mechanical and physico-chemical properties of coal from hazardous coal seams]. Moscow: Nauka, 1979, 195 p. [In Russ].

7. Kossovich Ye. L. Epshteyn S. A. Shkuratnik V. L. Minin M. G. Prospects and problems of using modern technology of micro- and nanoindentation for diagnostics of mechanical properties of coals. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 12, pp. 25 — 30. DOI 10.17580/gzh.2017.12.05 [In Russ].

8. Dudchenko O. L. Fedorov G. B. Andreev A. A. Innovative method for the classification of coal slurries . *Ugol'*. 2018, Vol. 6, pp. 67 — 71. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-6-67-71 [In Russ].

9. Melnikov N. N. Mesyats S. P. Ostapenko S. P. Cherepetskaya E. B. Shibaev I. A. Morozov N. A. Kravcov A. N, Konvalinka A. Investigation of disturbed rock zones in open-pit mine walls by seismic tomography. *Key Engineering Materials*, 2017, Vol 755, pp 147 — 152. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.147.

10. Dudchenko O. L. Fedorov G. B. Vibroacoustic technique for intensification of coal preparation . *Ugol*. 2019, Vol. 4, pp. 62 — 66. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-4-62-66 [In Russ].

11. Shkuratnik V. L. no.vikov E. A. Physical modeling of the grain size influence on acoustic emission in the heated geomaterials. *Journal of Mining Science*. 2012, Vol. 48, no. 1, pp. 9 — 14. DOI: https://doi.org/10.1134/S1062739148010029.

12. Beron A. I. Vatolin Ye. S. Koyfman M. I. Mokhnachev M. P. Chirkov S. Ye. *Svoystva gornykh porod pri raznykh vidakh i rezhimakh nagruzheniya* [Properties of rocks under different types and modes of loading]. Moscow: Nedra. 1984, 276 p. [In Russ].

13. Zakharov V. N. Malinnikova O. N. Investigation of the structural features of coal from outburst-hazardous seams. *Zapiski Gornogo instituta*. 2014, no. 210, p. 43. [In Russ].

14. Kossovich Ye. L. Epshteyn S. A. Dobryakova N. N. Minin M. G. Structural features and mechanical properties of anthracite, metaanthracite and graphite . *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 4. pp. 25 — 29. DOI: 10.17580/gzh.2020.04.05. [In Russ].

15. Victorov S. D. Kochanov A. N. Pachezhertsev A. A. Experimental study of the microstructural characteristics of the surfaces and volumes of granite samples . *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2018, Vol. 82, no. 7, pp. 786 — 788.

16. Han Y. Wang J. Dong Y. Hou Q. Pan J. The role of structure defects in the deformation of anthracite and their influence on the macromolecular structure. *Fuel*. 2017, Vol. 206, pp. 1 — 9. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.05.085.

17. Shibaev I. A. Morozov D. V. Dudchenko O. L. Pavlov I. A. Estimation of local elastic moduli of carbon-containing materials by laser ultrasound. *Key Engineering Materials*, 2018, Vol. 769, pp. 96 — 101. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.769.96.

18. Bychkov A. S. Cherepetskaya E. B. Karabutov A. A. Makarov V. A. Laser optoacoustic tomography for the study of femtosecond laser filaments in air. *Laser Physics Letters*. 2016, Vol. 13 (8), no. 085401. DOI: 10.1088/1612-2011/13/8/085401.

19. Zarubin V. Bychkov A. Simonova V. Zhigarkov V. Karabutov A. Cherepetskaya E. A refraction-corrected tomographic algorithm for immersion laser-ultrasonic imaging of solids with piecewise linear surface profile. *Applied Physics Letters*, 2018, Vol. 112, no. 214102. DOI: 10.1063/1.5030586.

20. Karabutov A. A. Podymova N. B. Cherepetskaya E. B. Determination of uniaxial stresses in steel structures by the laser-ultrasonic method. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2017, no. 58 (3), pp. 503 — 510. DOI: 10.1134/S0021894417030154.

21. Cherepetskaya E. B. Karabutov A. A. Makarov V. A. Mironova E. A. Shibaev I. A. Vysotin N. G. Morozov D. V. Internal structure research of shungite by broadband ultrasonic spectroscopy. *Key Engineering Materials*. 2017, Vol. 755, pp. 242 — 247. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.242.

22. Shibaev I. A. Vinnikov V. A. Stepanov G. D. Determining elastic properties of sedimentary strata in terms of limestone samples by laser ultrasonics. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, Vol. 7, pp. 125 — 134. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-125-134.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванов Павел Николаевич[1] — аспирант, pavelnivanov@mail.ru;
Блохин Дмитрий Иванович[1,2] — канд. техн. наук, доцент;
Закоршменный Иосиф Михайлович[2] — докт. техн. наук;
[1] Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС» Горный институт, Москва, Россия;
[2] Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН, Москва, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivanov P. N.[1], PhD-student, pavelnivanov@mail.ru;
Blokhin D. I.[1,2], Cand. Sci. (Eng.);
Zakorshmennyy I. M.[2], Dr. Sci. (Eng.);
[1] National Research Technological University «MISiS» , Moscow, Russia;
[2] Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

Получена редакцией 20.01.2021; получена после рецензии 15.02.2021; принята к печати 10.03.2021.
Received by the editors 20.01.2021; received after the review 15.02.2021; accepted for printing 10.03.2021.