ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(11):19-33
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 539.3: 622.831 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_19

РЕЗОНАНСНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ КОЭФФИЦИЕНТА МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

А.С. Вознесенский[1], Т. Франсишку[1], Я.О. Куткин[1], М.Н. Красилов[2]

[1] Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия
[2] ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации», Москва, Россия

Аннотация: Коэффициент механических потерь горных пород *d* учитывается при ведении взрывных работ, в геомеханике, сейсмомониторинге удароопасных массивов, прогнозировании землетрясений, сейсморазведке, в неразрушающем контроле при оценке долговременной устойчивости массива пород и подземных сооружений. Методом резонансной акустической спектроскопии установлена частотная зависимость коэффициента потерь путем оценки параметров резонансов, возникающих в образцах пород при возбуждении продольных колебаний с помощью пьезопреобразователей. Для отработки методики испытаний эксперименты проводились на образце известняка диаметром 20 мм и длиной 120 мм при частотном сканировании в диапазоне от 10 до 80 кГц, также велась ручная съемка вокруг частот амплитудных максимумов, позволявшая сделать более точные измерения (модальный анализ). Для валидации производилось сравнение скоростей упругих волн и модулей упругости, полученных двумя методами. Первый – по частоте основной моды колебаний, а второй – путем измерения скоростей продольных и поперечных упругих волн. Установлено, что при повышении температуры образца частотные максимумы смещаются в сторону низкочастотной области. Коэффициент потерь *d* возрастает при увеличении как частоты, так и температуры. Проведенные лабораторные экспериментальные исследования создают основу для разработки методик многочастотного акустического контроля состояния горных пород при переходе добычных работ на глубины более 1000 м в условиях повышенной температуры породных массивов.

Ключевые слова: горные породы, механические потери, коэффициент потерь, добротность, частотная зависимость, температурная зависимость, нагревание, резонанс, спектроскопия, модальный анализ.

Благодарность: Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 24-27-00103 (https://rscf.ru/project/24-27-00103/).

Для цитирования: *Вознесенский А. С., Франсишку Т., Куткин Я. О., Красилов М. Н.* Резонансный метод определения температурных зависимостей коэффициента механических потерь в горных породах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 11. – С. 19–33. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_19.

© А.С. Вознесенский, Т. Франсишку, Я.О. Куткин, М.Н. Красилов. 2025.

Resonance method to determine temperature dependences of mechanical loss factor in rocks

A.S. Voznesenskii[1], T. Francisco[1], Ya.O. Kutkin[1], M.N. Krasilov[2]

[1] University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia
[2] «Scientific and Engineering Centre of Tunnel Association» LLC, Moscow, Russia

Abstract: The mechanical loss factor in rocks is taken into account in blasting, in geomechanics, in seismic monitoring of rockburst-hazardous rock mass, in prediction of earthquakes, in seismic exploration, and in nondestructive testing of long-term stability of the subsoil and underground structures. The method of resonance acoustic spectroscopy determines the frequency dependence of the loss factor by means of estimation of parameters of resonances in rock samples under excitation of longitudinal vibrations using piezoelectric transducers. Elaboration of the testing procedure used frequency scanning of a limestone sample with a diameter of 20 mm and 120 mm long in a range of frequencies from 10 to 80 kHz. Simultaneously, handheld shooting was carried out in neighborhood of the frequencies of the amplitude maximums, which allowed more accurate measurements (modal analysis). For the validation, the elastic wave velocities and elasticity moduli obtained by the two methods were compared. It is found that as the sample temperature increases, the frequency maximums shift toward the range of low frequencies. The loss factor increases as either frequency or temperature grows. The implemented laboratory experimental research creates a framework for the development of multi-frequency acoustic control procedures for deep-level mining at the depths greater than 1000 m in high-temperature rock masses.

Key words: rocks, mechanical loss, loss factor, Q-factor, frequency dependence, temperature dependence, heating, resonance, spectroscopy, modal analysis.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 24-27-00103 (https://rscf.ru/project/24-27-00103/).

For citation: Voznesenskii A. S., Francisco T., Kutkin Ya. O., Krasilov M. N. Resonance method to determine temperature dependences of mechanical loss factor in rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(11):19-33. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_19.

Введение

Исследования механических потерь (МП) в горных породах играют ключевую роль в горном деле, геомеханике, сейсмомониторинге удароопасных массивов, прогнозировании землетрясений, сейсморазведке, в неразрушающем контроле при оценке долговременной устойчивости массива пород и подземных сооружений. Коэффициент механических потерь (КМП) d отражает уровень диссипации механической энергии в породе под воздействием упругих волн. Он связан с добротностью $Q = 1/d$ и определяется рядом факторов: структурой породы, трещиноватостью, пористостью, наличием флюидов, а также температурными условиями. Коэффициент d, называемый также коэффициентом поглощения, представляет собой отношение энергии, рассеиваемой за один период гармонического колебания, к максимальной упругой энергии системы

$$d = \frac{W}{U}, \qquad (1)$$

где W — энергия, рассеиваемая за один период колебания; U — полная энергия

системы. Встречается также название d как обратная добротность $d = 1/Q$ или Q^{-1}.

Физические основы изучения МП в материалах заложены в фундаментальных трудах Д.В. Рэлея [1]. МП изучаются методами механической (акустической) спектроскопии в металлах и сплавах [2 — 4], композитах [5], геополимерах [6] и других материалах. Исследования КМП проводятся с помощью механических воздействий [7, 8] при различных видах нагружения: сжатии–растяжении [9], изгибе [10], кручении [11], а также при различных температурах [12].

МП в материалах исследуются посредством свободного затухания колебаний, вынужденных колебаний, резонансных колебаний, рассеивания энергии за цикл колебаний при квазистатическом нагружении [13], методом регистрации кода-волн от землетрясений [14, 15]. Лабораторные экспериментальные методы оценки КМП при механических воздействиях на материалы приведены в ГОСТ Р 56801-2015.

В мировой практике затухание упругих волн и механические потери в горных породах исследуются как in situ [16], так и на образцах горных пород [17]. Значения d зависят от частоты возбуждения. Измерения на частотах 0,1 … 1 кГц и ниже проводятся методом регистрации петли гистерезиса [18]. Резонансный метод является эффективным способом определения добротности и коэффициента механических потерь на частотах выше 1 … 10 кГц при исследовании на образцах пород. Измерения методом резонансной акустической спектроскопии (РАС) основаны на регистрации амплитудно-частотной характеристики при возбуждении собственных колебаний образца.

Одними из ранних отечественных работ в области исследования механических потерь в горных породах резонансным методом являются работы [19, 20]. Исследованиям МП в горных породах методом резонансной акустической спектроскопии посвящены работы [21, 22].

Потери в горных породах связаны с преобразованием упругой энергии в тепловую за счет микрофизических процессов: трения в порах и трещинах, релаксации в минеральной решетке и движения флюидов. РАС, активно используемая в [23], позволяет выделить локальные потери энергии, связанные с микроскопическими дефектами в структуре минералов и горных пород. Эта методика позволяет использовать данные резонансного возбуждения как интегральный геомеханический критерий устойчивости породы при температурных воздействиях.

Несмотря на значительное количество публикаций по исследованию коэффициента потерь или добротности горных пород, тема, связанная с исследованием их частотной и температурной зависимостей, остается открытой.

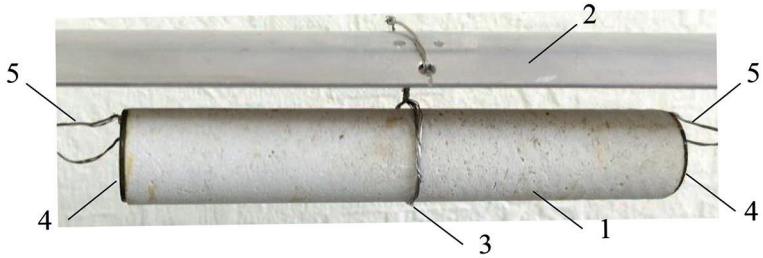
Целью работы являлось обоснование методики получения частотной зависимости коэффициента d образцов горных пород различных типов и происхождения при разных температурах в лабораторных условиях.

Материалы, методы, теоретические предпосылки исследований

Для отработки методики измерений коэффициента потерь d в зависимости от частоты при нагревании был использован образец известняка (Домодедовский известняковый карьер, Московская область) цилиндрической формы диаметром D = 20 мм и длиной L = 120 мм. При выборе размеров образца учитывалось соотношение

$$L >> D, \qquad (2)$$

обеспечивающее наилучшее возбуждение продольных колебаний по сравне-



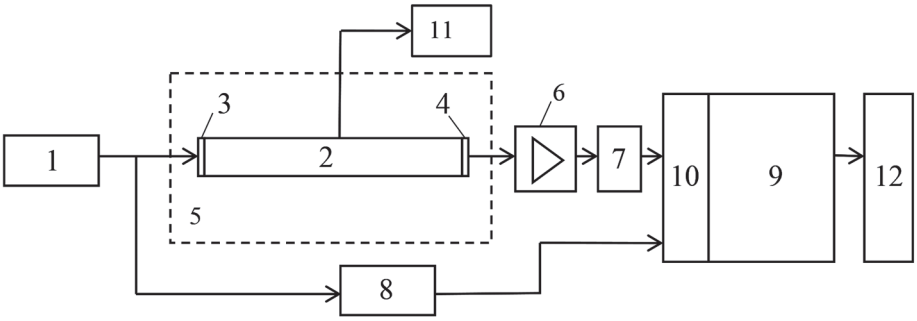
1 – цилиндрический образец горной породы; 2 – верхняя планка держателя образца; 3 – подвес образца; 4 – пьезопреобразователи; 5 – электрические выводы пьезопреобразователей

Рис. 1. Фото держателя с образцом
Fig. 1. Photo of the sample with holder

нию с другими схемами. Измерение коэффициента потерь производилось резонансным методом. Испытания проводились по схеме, предусматривающей закрепление образца в средней части, где находится узел колебаний, как это показано на рис. 1. Возбуждение и съем колебаний образца осуществлялись с помощью наклеенных на торцы образца пьезопреобразователей, масса которых была значительно меньше массы образца, что не вносило существенных погрешностей в результаты измерений.

Схема измерений представлена на рис. 2.

При подготовке эксперимента образец устанавливался в держатель, на котором он размещался в трубчатой печи Nabertherm с контроллером P 320 (Германия). Один из пьезопреобразователей подключался к выходу генератора, а другой через усилитель и блок согласования подключался к первому входу блока QMS17 измерительной системы QMBox (Р-Технолоджи, г. Москва). Ко второму входу через блок согласования подключался выходной сигнал генератора, что обеспечивало отметку начала частотного сканирования. Выход системы QMBox соединялся с компьютером, на котором осуществлялось задание режимов регистрации, а также регистрировались результаты измерений амплитуды сигнала на выходе приемного преобразователя. На генераторе устанавливался режим линейного изменения



1 – генератор JDS-2900; 2 – образец в держателе; 3, 4 – излучающий и приемный пьезопреобразователи; 5 – печь Nabertherm с контроллером P 320; 6 – предварительный усилитель с коэффициентом усиления 30 дБ и полосой пропускания 1…1000 кГц; 7, 8 – блоки согласования; 9 – измерительная система QMBox; 10 – модуль QMS17; 11 – измеритель температуры Testo 922; 12 – компьютер

Рис. 2. Схема измерений
Fig. 2. Measurement scheme

частоты в диапазоне от 0 до 80 кГц. Для измерения температуры в средней части образца размещалась контактирующая с ним термопара типа K, подключенная к измерителю температуры Testo 922.

При проведении измерений у генератора устанавливался режим многократного изменения частоты от 0 до заданного максимального значения. Система QMBox регистрировала значения амплитуд на выходе приемного пьезопреобразователя с интервалом усреднения 0,2 с. Данные записывались на диск компьютера в бинарном формате и после проведения испытаний преобразовывались в текстовый формат. Для построения и дальнейшей обработки данных использовалась специально разработанная компьютерная программа, позволявшая строить графики зависимостей амплитуд сигнала на приемном преобразователе от времени, которые затем пересчитывались в графики зависимостей амплитуды от частоты. Пересчет значений времени в частоту осуществлялся по заранее установленным значениям максимальной частоты сканирования и времени обзора. Данные измерения проводились при температурах 25, 40, 60 и 80 °C. Режимы нагрева устанавливались на контроллере P 320 печи Nabertherm, время нагрева при переходе на последующую ступень составляло 10 мин со временем выдержки на ступени 120 мин. За это время после установления температуры проводились автоматическое снятие амплитудно-частотной характеристики, а также ручное измерение коэффициента потерь d. После построения графиков зависимости амплитуды сигнала на выходе приемного преобразователя от частоты осуществлялось определение частот локальных спектральных максимумов, вблизи которых затем вручную уточнялись частоты спектральных максимумов и определялись коэффициенты потерь, соответствующие каждому спектральному максимуму.

Коэффициент d был рассчитан по формуле аналогично [24]:

$$d = \Delta f / f_0, \qquad (3)$$

где Δf — ширина полосы частот на уровне $1/\sqrt{2}$ от максимума резонансной кривой; f_0 — резонансная частота.

Для проверки достоверности получаемых результатов были произведены измерения плотности образцов, а также продольной и поперечной скоростей упругих волн. Измерение плотности производилось по ГОСТ 21153.2–84.

Измерение скоростей упругих волн производилось двумя способами.

В первом способе знание резонансных частот и длины образца позволило рассчитать скорости продольных волн:

$$C_{p1} = f_n \frac{2L}{n}, \qquad (4)$$

где C_{p1} — скорость продольных волн по первому способу; n — номер спектрального максимума; f_n — частота спектрального максимума; L — длина образца.

Знание плотности материала дало возможность рассчитать модуль упругости по формуле:

$$E_1 = \rho C_{p1}^{\ 2}, \qquad (5)$$

где E_1 — динамический модуль упругости, определенный по первому способу; ρ — плотность материала.

По второму способу измерение скоростей продольной и поперечной упругих волн производилось импульсным методом на установке «Ультразвук» (ООО «ЭкогеосПром», г. Тверь) в соответствии с ГОСТ 21153.7-75. В то же время при выборе размеров и формы образцов учитывались особенности проводимого эксперимента. Согласно указанному ГОСТу, минимальная частота прозвучивания составляла 75 кГц.

В нашем случае было необходимо провести измерения на частоте основного резонанса первой моды продольных колебаний, находящегося в районе 11 кГц. При уменьшении частоты эффективность пьезопреобразователя, с точки зрения как излучения, так и приема, при постоянной амплитуде возбуждения пропорциональна квадрату частоты и снижается с ее уменьшением. Кроме того, предполагалось исследовать породы различных типов, в том числе с высоким d, для которых прозвучивание образцов большой длины становилось невозможным из-за значительного ослабления сигнала. Учитывая соотношение (1), для надежного измерения на частоте 11 кГц длина и диаметр образца были выбраны, как указано выше. Это обеспечивало получение сигнала достаточной амплитуды на выходе приемного преобразователя на частоте первой моды колебаний. По известным скоростям продольных и поперечных упругих волн были рассчитаны динамический модуль упругости и коэффициент Пуассона:

$$E_2 = \rho C_{p2}^2 \frac{3C_{p2}^2 - 4C_{s2}^2}{C_{p2}^2 - C_{s2}^2}, \qquad (6)$$

$$\mu = \frac{C_{p2}^2 - 2C_{s2}^2}{2\left(C_{p2}^2 - C_{s2}^2\right)}, \qquad (7)$$

где E_2 — динамический модуль упругости по второму способу, μ — коэффициент Пуассона; C_{p2}, C_{s2} — скорости продольной и поперечной упругих волн по второму способу соответственно.

При проверке результатов экспериментов производилось сравнение скоростей упругих волн и модулей упругости, вычисленных двумя этими способами, что показало их удовлетворительное совпадение.

Результаты

Результаты сканирования АЧХ в виде спектрограммы (зависимости амплитуды выходного сигнала A_0 от частоты f) представлены на рис. 3.

Предварительная оценка частот спектральных максимумов осуществлялась по компьютерной программе, алгоритм которой предусматривал последовательный перебор экспериментальных точек и сравнение амплитуд в каждой из них с номером i с амплитудами соседних, предшествующей (i–1)-й и последующей (i+1)-й точек.

Если амплитуды в соседних точках были меньше, чем в i-й, этот номер записывался в память.

Далее рассматривались параметры на наиболее значимых спектральных максимумах (модальный анализ). В табл. 1 приведены значения частот спектраль-

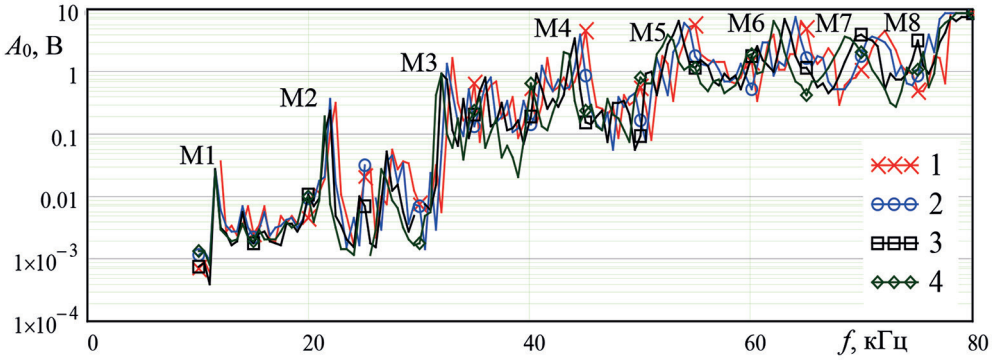


Рис. 3. Спектрограмма образца известняка при температурах 25 (1), 40 (2), 60 (3), 80 (4) °С
Fig. 3. Spectrogram of a limestone sample at temperatures 25 (1), 40 (2), 60 (3), 80 (4) °C

Таблица 1

Результаты измерений частот спектральных максимумов, определенных автоматически (f_{sn}) и вручную (f_{0n}), коэффициентов потерь (d), амплитуд (A_0), а также скоростей продольных волн по первому способу (C_{p1}) при разных температурах (T) и номеров спектральных максимумов (n)

The results of measurements of frequencies of spectral maxima determined automatically (f_{sn}) and manually (f_{0n}), loss coefficients (d), amplitudes (A_0), as well as longitudinal wave velocities using the first method (C_{p1}) at different temperatures (T) and numbers of spectral maxima (T)

T, °C	*n*	f_{sn}, кГц	f_{0n}, кГц	*d*	A_0, мВ	C_{p1}, м/с	E_1, ГПа
25	1	11,5	11,0	0,00354	0,235	3196	21,65
	2	22	21,4	0,00630	0,755	3109	20,77
	3	32	32,1	0,00768	3,040	3098	20,63
	4	44	44,0	0,00946	4,760	3189	21,86
	5	53,5	54,0	0,01175	3,800	3131	21,07
	6	63	63,8	0,01526	5,623	3083	20,42
	7	69,5	71,7	0,01864	5,856	2969	18,95
	8	78	76,5	0,02885	5,980	2775	16,54
40	1	11,5	10,9	0,00440	0,212	3164	21,52
	2	22	21,2	0,00480	0,734	3080	20,38
	3	32	31,8	0,00500	3,350	3077	20,35
	4	44	43,6	0,00941	6,170	3158	21,43
	5	53,5	52,7	0,01595	7,500	3055	20,06
	6	63	61,5	0,01774	9,500	2970	18,96
	7	69,5	67,8	0,02670	5,750	2808	16,95
	8	78	76,5	0,03200	9,300	2775	16,54
60	1	11,5	10,6	0,00241	0,342	3072	20,29
	2	22	20,6	0,00330	0,983	2985	19,14
	3	32	30,8	0,00399	3,031	2978	19,06
	4	44	42,3	0,00492	5,190	3067	20,21
	5	53,5	53,0	0,00717	4,300	3074	20,30
	6	63	61,4	0,00879	5,400	2967	18,92
	7	69,5	67,9	0,01222	2,300	2814	17,02
	8	78	77,0	0,01507	6,530	2791	16,74
80	1	11,5	10,2	0,00186	0,215	2958	18,80
	2	22	20,4	0,00367	0,409	2961	18,84
	3	32	30,6	0,00481	1,740	2957	18,79
	4	44	41,9	0,00716	3,400	3040	19,86
	5	53,5	51,5	0,02234	1,011	2986	19,16
	6	63	60,5	0,02898	9,000	2924	18,38
	7	69,5	70,1	0,03255	5,630	2902	18,10
	8	78	77,1	0,03764	7,350	2793	16,77

ных максимумов, определенных частотным автоматическим сканированием f_{sn} и вручную f_{0n} для разных температур T и номеров максимумов n. Кроме того, здесь приведены данные по коэффициенту потерь d и амплитуде сигнала A_0 на выходе приемного пьезопреобразователя с предварительным усилением 30 дБ.

Частоты спектральных максимумов, измеренные при автоматическом сканировании, имели в целом большие значения, чем измеренные вручную. Это обусловлено усреднением показаний за период 0,2 с и присваиванием значения частоты, соответствующего концу, а не середине интервала усреднения.

Измеренная плотность образца ρ = = 2149 кг/м^3.

При измерениях по второму способу при температуре 25 °С средние значения свойств образца известняка при трех измерениях составили: C_{p2} = 3140 м/с, C_{s2} = 2131 м/с, E_2 = 20,1 ГПа, μ_2 = 0,10.

Обсуждение результатов

Изменение частот спектральных максимумов

Из графиков на рис. 3 следует, что спектрограммы имеют ряд характерных максимумов с разными амплитудами, выделенных по описанному выше алгоритму. При этом максимумы на некоторых частотах выделяются по сравнению с другими, они были взяты для дальнейшего модального анализа в качестве основных.

Частота основной моды колебаний М1 (частота первой гармоники) находится около 11 кГц, что подтверждено ниже. В спектре присутствуют нечетные гармоники М3, М5, М7, обусловленные пучностью колебаний на концах стержня и узлом в его центре. Такой режим реализуется при зажатом центре образца.

В нашем случае подвес, расположенный в центре, не обеспечивает в нужной степени условия узла колебаний. Поэтому кроме нечетных гармоник в спектре присутствуют и четные, обозначенные М2, М4, М6, М8.

Влияние температуры сказывается на изменении частоты резонансов и на изменении коэффициента потерь.

На рис. 4 показано абсолютное изменение частот резонансных максимумов Δf_0 по отношению к частоте основного резонанса. Восьмой резонанс в данном

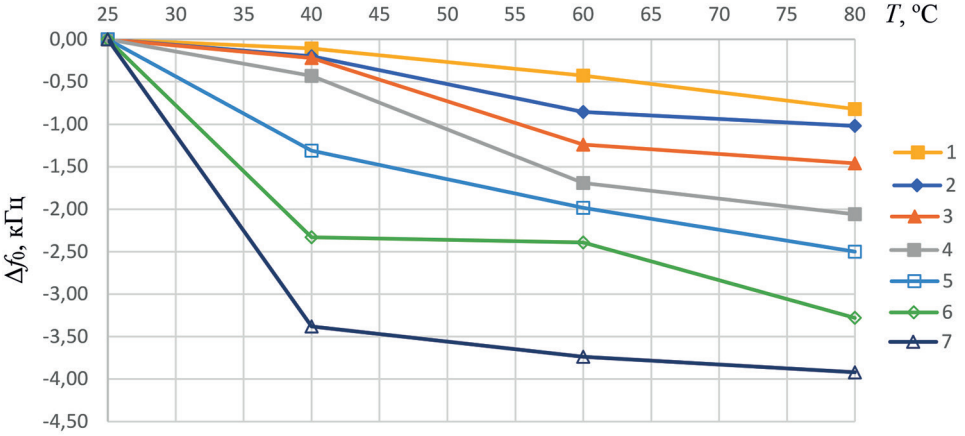


Рис. 4. Изменения резонансных частот в зависимости от температуры T для спектральных максимумов с различными номерами n, указанными в легенде

Fig. 4. Changes in resonant frequencies depending on temperature T for spectral maxima with different numbers n indicated in the legend

случае не рассматривался по причине ограничения сигнала при увеличении его амплитуды с возрастанием частоты.

Как следует из приведенных графиков, с увеличением температуры часто́ты спектральных максимумов монотонно уменьшаются, что можно объяснить как увеличением длины образцов из-за температурного расширения материала, так и другими причинами. При одной и той же температуре уменьшение частот спектральных составляющих Δf_0 по абсолютной величине возрастает с ростом номера n. Такая закономерность для указанного диапазона температур согласуется с результатами исследования на песчанике Berea, приведенными в [25].

Следует также отметить уменьшение скоростей продольных упругих волн с увеличением температуры.

Оценка достоверности полученных результатов

Скорости продольных упругих волн C_{p1} = 3196 м/с и C_{p2} = 3140 м/с, определенные разными методами, близки друг другу, разница не превышает 1,8%, что говорит об удовлетворительной сходимости результатов. Модули упругости, рассчитанные по формуле (5) — E_1 = 21,65 Гпа, и по формуле (6) — E_2 = 20,1 Гпа, также близки друг другу. Это подтверждает достоверность полученных результатов в части определения частоты основного резонанса первой моды колебаний в районе 11 кГц при n = 1.

Изменение амплитуд спектральных максимумов от частоты

Следует отметить значительное изменение амплитуд сигналов при увеличении частоты сканирования. Это, в частности, связано с тем, что электрический сигнал на выходе пьезопреобразователя пропорционален ускорению. При гармоническом воздействии с заданной постоянной амплитудой смещения ускорение (вторая производная от смещения) пропорционально квадрату частоты. Например, увеличение частоты в 2 раза приведет к увеличению амплитуды электрического сигнала на выходе пьезопреобразователя в 4 раза [26]. Возможность регистрации большого диапазона амплитуд сигналов определяется динамическим диапазоном АЦП и усилителя.

В данной работе использовался АЦП разрядностью 18 бит, что соответствует динамическому диапазону более 108 дБ. Реальные динамические диапазоны аналоговых усилителей находятся в пределах 40–60 дБ. То есть именно усилитель ограничивает динамический диапазон регистрации сигналов.

На рис. 5 приведены графики зависимостей относительных амплитуд спектральных максимумов u_i от их частоты при различных температурах и неизменной амплитуде напряжения, подаваемого на излучающий преобразователь. Максимальная частота 76 кГц. Здесь

$$u_i = A_i / A_1, \qquad (8)$$

где u_i — относительная амплитуда; A_i — амплитуда сигнала i-го максимума при соответствующей температуре; A_1 — амплитуда первого максимума при температуре 25 °С.

В случае, показанном на рис. 5, изменения амплитуды сигнала достигает 140 относительных единиц или 43 дБ. С учетом, что для определения коэффициента потерь d кроме максимумов необходимо регистрировать и меньшие значения сигналов, динамический диапазон должен быть еще в 5–10 раз больше, т.е. доходить до 60 дБ, что заставляет менять амплитуду зондирующего сигнала в зависимости от величины выходного сигнала усилителя для разных диапазонов. По указанной причине в данном случае реально рассматривался

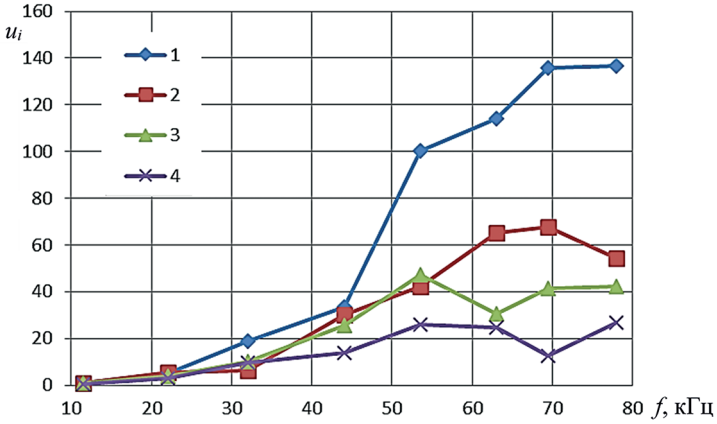


Рис. 5. Зависимость амплитуд спектральных максимумов от частоты при температурах 25 (1), 60 (2), 90 (3), 120 (4) °С, пересчитанных по отношению к амплитуде первой спектральной составляющей при температуре 25 °С

Fig. 5. Dependence of the amplitudes of spectral maxima on the frequency at the temperatures 25 (1), 60 (2), 90 (3), 120 (4) °C recalculated with the ratio to the amplitude of the first spectral component at the temperature of 25 °C

диапазон частот от 10 до 76 кГц, в котором удавалось получить спектрограмму при постоянном значении зондирующего сигнала. Надо сказать, что свыше 76–80 кГц было заметно влияние ограничения сигнала усилителем, поэтому восьмой максимум специально не анализировался и учитывался в качестве дополнительной информации.

Для устранения погрешностей, связанных с неточностью определения резонансных частот, а также амплитуд и коэффициентов потерь, автоматический режим использовался лишь для получения первичной обзорной спектрограммы, показанной на рис. 2. По ней производилось грубое определение резонансных частот и выделялись спектральные максимумы. Затем в области этих максимумов производились более точные измерения вручную, которые и принимались за окончательный результат.

Анализ графиков, показанных на рис. 5, позволил сделать выводы о влиянии частоты колебаний образца и его температуры. Увеличение температуры на заданной частоте приводят к уменьшению амплитуды, что соответствует увеличению d, о чем более подробно сказано ниже.

Таблица 2

Коэффициенты зависимости d(f)
Coefficients of dependence d(f)

Температура, °С	a_0	a_1	R^2
25	0,0013	0,0474	0,883
40	0,0013	0,0421	0,976
60	0,0015	0,0361	0,944
80	0,0017	0,0273	0,987

Изменение коэффициента потерь d от частоты при различных температурах

Зависимость коэффициента d от частоты при разных температурах представлена на рис. 6. Как следует из приведенных зависимостей, бóльшим номерам резонансов n и соответствующим им частотам f_{0n} соответствуют бóльшие величины коэффициента потерь. Аналогичная закономерность наблюдается и при изменении температуры, с ростом температуры коэффициент d также растет.

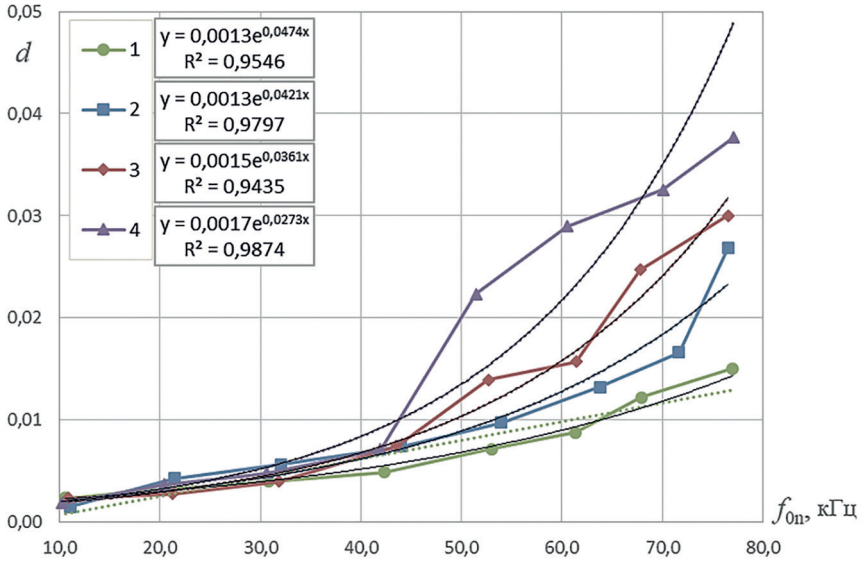


Рис. 6. Зависимость коэффициента потерь d от частоты и аппроксимирующие кривые при температурах 25 (1), 60 (2), 90 (3), 120 (4) °C

Fig. 6. Dependence of the loss factor d on the frequency and approximating curves at the temperatures 25 (1), 60 (2), 90 (3), 120 (4) °C

Зависимость коэффициента потерь от частоты при разных температурах удовлетворительно аппроксимируется экспоненциальной функцией вида

$$d(f) = a_0 e^{a_1 f}. \qquad (9)$$

Значения коэффициентов a_0 и a_1, а также коэффициенты детерминации R^2 представлены в табл. 2.

Как следует из данных табл. 2, параметр экспоненты a_1 монотонно уменьшается с возрастанием температуры, что соответствует более резкому увеличению *d* при росте частоты.

Исследования легли в основу методики получения частотных и температурных зависимостей коэффициента потерь горных пород различных типов и происхождения, необходимых для оценки состояния горных пород вокруг подземных горных выработок методами неразрушающего контроля в условиях глубоких горизонтов и повышенных температур.

Заключение

1. Актуальность исследования механических потерь в горных породах определяется необходимостью расчета и интерпретации характеристик упругих волн при оценке трещиноватости и прогнозировании разрушения областей породных массивов вокруг горных выработок с помощью методов ультразвукового прозвучивания. Особую актуальность эти исследования приобретают в условиях перехода горных работ на глубокие горизонты, где, начиная с определенной глубины, проявляются специфические особенности напряженно-деформированного состояния, усугубляющиеся значительным повышением температуры массива. Данное исследование направлено на разработку основ методики лабораторного экспериментального изучения зависимостей коэффициента потерь от частоты при различных температурах, что может быть востребовано для развития методов неразрушающего контроля.

2. Исследования используют методы резонансной акустической спектроскопии, позволяющей определить частотную зависимость коэффициента потерь путем оценки параметров резонансных кривых, возникающих в образцах пород при возбуждении продольных колебаний с помощью пьезопреобразователей. Для получения амплитудно-частотной характеристики стержня использовалось автоматическое частотное сканирование в диапазоне от 10 до 80 кГц, а также ручная съемка вокруг частот амплитудных максимумов, позволявшая сделать более точные измерения.

3. Установлено, что при повышении температуры образца известняка частотные максимумы смещаются в сторону низкочастотной области, что для данного частотного диапазона согласуется с результатами других исследователей.

4. Установлено, что коэффициент потерь *d* образца известняка возрастает при увеличении как частоты, так и температуры.

5. Проведенные лабораторные экспериментальные исследования создают основу для разработки методик многочастотного акустического контроля состояния горных пород при переходе добычных работ на глубины более 1000 м в условиях повышенной температуры породных массивов.

Авторы выражают благодарность П.И. Дубинину и Е.И. Ушакову за подготовку образцов для испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rayleigh B.* The theory of sound. Vol. 2. New York, 1945, 504 p.

2. *Головин И. С.* Неупругость, внутреннее трение и механическая спектроскопия металлических материалов. — М.: Издательский Дом НИТУ «МИСИС», 2020. — 284 с.

3. *Mochugovskiy A. G.*, *Mikhaylovskaya A. V.*, *Zadorognyy M. Y.*, *Golovin I. S.* Effect of heat treatment on the grain size control, superplasticity, internal friction, and mechanical properties of zirconium-bearing aluminum-based alloy // Journal of Alloys and Compounds. 2021, vol. 856, article 157455. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157455.

4. *Blanter M. S.*, *Golovin I. S.*, *Neuhäuser H.*, *Sinning H. R.* Internal friction in metallic materials. Springer Series in Materials Science. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2007, 541 p.

5. *Zhou G., Jiang H., Liu C., Huang H., Wei L., Meng Z.* Effect of porous particle layer on damping capacity and storage modulus of AlSi30p/5052Al composites // Materials Letters. 2021, vol. 300, article 130162. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.130162.

6. *Zhou S., Yang Z., Zhang R., Li F.* Preparation, characterization and rheological analysis of eco-friendly road geopolymer grouting materials based on volcanic ash and metakaolin // Journal of Cleaner Production. 2021, vol. 312, article 127822, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127822.

7. *Yang J., Ishikawa T., Lin T., Tokoro T., Nakamura T., Momoya Y.* Influence of aging on hydro-mechanical behavior of unsaturated ballast // Transportation Geotechnics. 2021, vol. 27, article 100480. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100480.

8. *Kosilov A. T.* Dissipative properties of materials with thermoelastic martensite conversion // Soviet Physics Journal. 1985, vol. 28, pp. 380—389. DOI: 10.1007/BF00892271.

9. *Krishnan R. V.*, *Delaey L., Tas H., Warlimont H.* Thermoplasticity, pseudoelasticity and the memory effects associated with martensitic transformations // Journal of Materials Science. 1974, vol. 9, pp. 1536—1544. DOI: 10.1007/BF00552940.

10. *Schröder E., Sievi A.* New measurement method for bending loss factor and the bending stiffness: Test method / Proceedings of the 10th Convention of the European Acoustics Association Forum Acusticum, 2023, Torino, Italy, DC/ConfOrg. 2023, pp. 1079—1085. DOI: 10.61782/fa.2023.0878.

11. *Dessi C., Coppol S. Vlassopoulos D.* Dynamic mechanical analysis with torsional rectangular geometry: A critical assessment of constrained warping models // Journal of Rheology. 2021, vol. 65, no. 3, pp. 325—335. DOI: 10.1122/8.0000207.

12. *Voznesenskii A. S.*, *Ushakov E. I.* Temperature dependence of internal mechanical losses of gypsum stone with complex composition and structure // Journal of Alloys and Compounds. 2022, vol. 906, article 164194. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.164194.

13. *Liu Y., Dai F.* A review of experimental and theoretical research on the deformation and failure behavior of rocks subjected to cyclic loading // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2021, vol. 13, no. 5, pp. 1203 – 1230. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.03.012.

14. *Собисевич А. Л.*, *Зверева А. С.*, *Лиходеев Д. В.* К вопросу о затухании объемных волн в Эльбрусской вулканической области // Доклады Академии Наук. – 2019. – Т. 486. – № 4. – С. 480 – 484.

15. *Зверева А. С.*, *Собисевич А. Л.*, *Габсатарова И. П.* Добротность геофизической среды восточной зоны Северного Кавказа // Физика Земли. – 2024. – № 1. – С. 1 – 17. DOI: 10.31857/S0002333724010091.

16. *Aki K., Chouet B.* Origin of coda waves: Source, attenuation and scattering effects // Journal of Geophysical Research. 1975, vol. 80, no. 23, pp. 3322 – 3342. DOI: 10.1029/JB080i023p03322.

17. *Tittman B. R.*, *Abdel-Gawad M.*, *Housley R. M.* Elastic velocity and Q factor measurements on Apollo 12, 14, and 15 rocks / Proceedings of the Third Lunar Conference (Supplement 3, Geochimica et Cosmochimica Acta). The M. I. T. Press, 1972, vol. 3, pp. 2565 – 2575.

18. *Салюков В. С.*, *Вознесенский А. С.*, *Куткин Я. О.* Внутренние механические потери в габбро при периодических воздействиях в низкочастотном диапазоне // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 11. – С. 64 – 74. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_11_0_64.

19. *Меркулова В. М.* Изменение коэффициента затухания ультразвука в горных породах после нагрева // Акустический журнал. АН СССР. – 1973. – № 6. – С. 920 – 922.

20. *Меркулова В. М.*, *Пигулевский Е. Д.*, *Цаплев В. М.* Измерение поглощения звука в горных породах при одноосном сжатии // Известия АН СССР, Физика Земли. – 1972. – № 3.

21. *Lebedev A. V.*, *Ostrovskii L. A.*, *Sutin A. M.*, *Soustova I. A.*, *Dzhonson P. A.* Resonant acoustic spectroscopy at low Q factors // Acoustical Physics. 2003, vol. 49, pp. 81 – 87. DOI: 10.1134/1.1537392.

22. *Lebedev A. V.*, *Bredikhin V. V.*, *Soustova I. A.*, *Sutin A. M.*, *Kusunose K.* Resonant acoustic spectroscopy of microfracture in a Westerly granite sample // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2003, vol. 108, no. B10. DOI: 10.1029/2002JB002135.

23. *Penn S. D.*, *Ageev A., Busby D.*, *Harry G. M.*, *Gretarsson A. M.*, *Numata K., Willems P.* Frequency and surface dependence of the mechanical loss in fused silica // Physics Letters A. 2006, vol. 352, no. 1 – 2, pp. 3 – 6. DOI: 10.1016/j.physleta.2005.11.046.

24. *Voznesenskii A. S.*, *Ushakov E. I.*, *Kutkin Ya. O.* Fracture toughness of rock-concrete interfaces and its prediction based on acoustic properties // Mining Science and Technology (Russia). 2025, vol. 10, no. 1, pp. 5 – 14. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-10-316.

25. *Davis E. S.*, *Sturtevant B. T.*, *Sinha D. N.*, *Pantea C.* Resonant Ultrasound Spectroscopy studies of Berea sandstone at high temperature // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2016, vol. 121, no. 9, pp. 6401 – 6410. DOI: 10.1002/2016JB013410.

26. *Ушаков Е. И.* Акустическая добротность многослойных горных пород / Акустика среды обитания (АСО – 2021): Шестая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов. Материалы конференции. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. – С. 261 – 267. ГИАБ

REFERENCES

1. Rayleigh B. *The theory of sound*. Vol. 2. New York, 1945, 504 p.

2. Golovin I. S. *Neuprugost', vnutrennee trenie i mekhanicheskaya spektroskopiya metallicheskikh materialov* [Internal Inelasticity, internal friction, and mechanical spectroscopy of metallic materials], Moscow, 2020, 284 p.

3. Mochugovskiy A. G., Mikhaylovskaya A. V., Zadorognyy M. Y., Golovin I. S. Effect of heat treatment on the grain size control, superplasticity, internal friction, and mechanical properties of zirconium-bearing aluminum-based alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021, vol. 856, article 157455. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157455.

4. Blanter M. S., Golovin I. S., Neuhäuser H., Sinning H. R. *Internal friction in metallic materials*. Springer Series in Materials Science. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2007, 541 p.

5. Zhou G., Jiang H., Liu C., Huang H., Wei L., Meng Z. Effect of porous particle layer on damping capacity and storage modulus of AlSi30p/5052Al composites. *Materials Letters*. 2021, vol. 300, article 130162. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.130162.

6. Zhou S., Yang Z., Zhang R., Li F. Preparation, characterization and rheological analysis of eco-friendly road geopolymer grouting materials based on volcanic ash and metakaolin. *Journal of Cleaner Production*. 2021, vol. 312, article 127822, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127822.

7. Yang J., Ishikawa T., Lin T., Tokoro T., Nakamura T., Momoya Y. Influence of aging on hydro-mechanical behavior of unsaturated ballast. *Transportation Geotechnics*. 2021, vol. 27, article 100480. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100480.

8. Kosilov A. T. Dissipative properties of materials with thermoelastic martensite conversion. *Soviet Physics Journal*. 1985, vol. 28, pp. 380 — 389. DOI: 10.1007/BF00892271.

9. Krishnan R. V., Delaey L., Tas H., Warlimont H. Thermoplasticity, pseudoelasticity and the memory effects associated with martensitic transformations. *Journal of Materials Science*. 1974, vol. 9, pp. 1536 — 1544. DOI: 10.1007/BF00552940.

10. Schröder E., Sievi A. New measurement method for bending loss factor and the bending stiffness: Test method. *Proceedings of the 10th Convention of the European Acoustics Association Forum Acusticum*, 2023, Torino, Italy, DC/ConfOrg. 2023, pp. 1079 — 1085. DOI: 10.61782/fa.2023.0878.

11. Dessi C., Coppol S. Vlassopoulos D. Dynamic mechanical analysis with torsional rectangular geometry: A critical assessment of constrained warping models. *Journal of Rheology*. 2021, vol. 65, no. 3, pp. 325 — 335. DOI: 10.1122/8.0000207.

12. Voznesenskii A. S., Ushakov E. I. Temperature dependence of internal mechanical losses of gypsum stone with complex composition and structure. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022, vol. 906, article 164194. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.164194.

13. Liu Y., Dai F. A review of experimental and theoretical research on the deformation and failure behavior of rocks subjected to cyclic loading. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2021, vol. 13, no. 5, pp. 1203 — 1230. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.03.012.

14. Sobisevich A. L., Zvereva A. S., Likhodeev D. V. On the issue of volume wave attenuation in the Elbrus volcanic area. *Doklady Akademii nauk*. 2019, vol. 486, no. 4, pp. 480 — 484. [In Russ].

15. Zvereva A. S., Sobissevich A. L., Gabsatarova I. P. Coda Q in the geophysical medium of the Northeast Caucasus. *Fizika Zemli*. 2024, no. 1, pp. 1 — 17. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0002333724010091.

16. Aki K., Chouet B. Origin of coda waves: Source, attenuation and scattering effects. *Journal of Geophysical Research*. 1975, vol. 80, no. 23, pp. 3322 — 3342. DOI: 10.1029/JB080i023p03322.

17. Tittman B. R., Abdel-Gawad M., Housley R. M. Elastic velocity and Q factor measurements on Apollo 12, 14, and 15 rocks. *Proceedings of the Third Lunar Conference (Supplement 3, Geochimica et Cosmochimica Acta)*. The M. I. T. Press, 1972, vol. 3, pp. 2565 — 2575.

18. Salyukov V. S., Voznesenskii A. S., Kutkin Ya. O. Internal mechanical losses in gabbro under periodic impacts in low-frequency range. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 11, pp. 64 — 74. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_11_0_64.

19. Merkulova V. M. Change in the attenuation coefficient of ultrasound in rocks after heating. *Akusticheskiy zhurnal. AN SSSR*. 1973, no. 6, pp. 920 — 922. [In Russ].

20. Merkulova V. M., Pigulevsky E. D., and Tsaplev V. M. Measurement of sound absorption in rocks under uniaxial compression. *Izvestiya AN SSSR, Fizika Zemli*. 1972, no. 3. [In Russ].

21. Lebedev A. V., Ostrovskii L. A., Sutin A. M., Soustova I. A., Dzhonson P. A. Resonant acoustic spectroscopy at low Q factors. *Acoustical Physics*. 2003, vol. 49, pp. 81 — 87. DOI: 10.1134/1.1537392.

22. Lebedev A. V., Bredikhin V. V., Soustova I. A., Sutin A. M., Kusunose K. Resonant acoustic spectroscopy of microfracture in a Westerly granite sample. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2003, vol. 108, no. B10. DOI: 10.1029/2002JB002135.

23. Penn S. D., Ageev A., Busby D., Harry G. M., Gretarsson A. M., Numata K., Willems P. Frequency and surface dependence of the mechanical loss in fused silica. *Physics Letters A*. 2006, vol. 352, no. 1 — 2, pp. 3 — 6. DOI: 10.1016/j.physleta.2005.11.046.

24. Voznesenskii A. S., Ushakov E. I., Kutkin Ya. O. Fracture toughness of rock-concrete interfaces and its prediction based on acoustic properties. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025, vol. 10, no. 1, pp. 5 — 14. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-10-316.

25. Davis E. S., Sturtevant B. T., Sinha D. N., Pantea C. Resonant Ultrasound Spectroscopy studies of Berea sandstone at high temperature. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2016, vol. 121, no. 9, pp. 6401 — 6410. DOI: 10.1002/2016JB013410.

26. Ushakov E. I. Acoustic quality of multilayer rocks. *Akustika sredy obitaniya (ASO — 2021): Shestaya Vserossiyskaya konferentsiya molodykh uchenykh i spetsialistov. Materialy konferentsii* [Acoustics of the habitat (CCA–2021): The Sixth All–Russian Conference of Young Scientists and Specialists], Moscow, 2021, pp. 261 — 267. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вознесенский Александр Сергеевич[1] — д-р техн. наук, профессор, e-mail: asvoznesenskii@misis.ru, ORCID ID: 0000-0003-0926-1808,
Франсишку Текадиомона[1] — аспирант, e-mail: m1708475@edu.misis.ru, ORCID ID: 0009-0006-5485-6420,
Куткин Ярослав Олегович[1] — канд. техн. наук, доцент, e-mail: kutkin.yo@misis.ru, ORCID ID: 0000-0003-2644-3371,
Красилов Максим Николаевич — канд. техн. наук, зав. лабораторией, ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации», e-mail: krasilov.mn@nizta.ru, ORCID ID: 0000-0001-9442-1866,
[1] Университет науки и технологий МИСИС.
Для контактов: Вознесенский А. С., e-mail: asvoznesenskii@misis.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.S. Voznesenskii[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: asvoznesenskii@misis.ru, ORCID ID: 0000-0003-0926-1808,
T. Francisco[1], Graduate Student, e-mail: m1708475@edu.misis.ru, ORCID ID: 0009-0006-5485-6420,
Ya.O. Kutkin[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail: kutkin.yo@misis.ru, ORCID ID: 0000-0003-2644-3371,
M.N. Krasilov, Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, «Scientific and Engineering Centre of Tunnel Association» LLC, 119049, Moscow, Russia,
[1] University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia.
Corresponding author: A.S. Voznesenskii, e-mail: asvoznesenskii@misis.ru.

Получена редакцией 07.06.2025; получена после рецензии 17.07.2025; принята к печати 10.10.2025.
Received by the editors 07.06.2025; received after the review 17.07.2025; accepted for printing 10.10.2025.