

ВНУТРЕННИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В ГАББРО ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ В НИЗКОЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ

В.С. Салюков¹, А.С. Вознесенский¹, Я.О. Куткин¹

¹ Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия,
e-mail: asvoznensenskii@misis.ru

Аннотация: Внутренние механические потери относятся к физическим свойствам горных пород, которые наряду с упругими, пластическими, прочностными свойствами должны учитываться в ряде расчетов и моделей, но не всегда оцениваются ввиду сложности их определения. Они имеют большое значение при оценке сейсмического воздействия землетрясений и горных ударов, промышленных взрывов, вибрационных источников на породные массивы вокруг выработок и на подземные сооружения. Описана лабораторная система и методика ее использования для испытания образцов горных пород при изгибе по трехточечной схеме с целью определения коэффициента потерь (обратной добротности Q^{-1}) в зависимости от частоты воздействия. Приведены результаты циклических испытаний образцов – балок габбро с различными пиковыми амплитудами и частотами деформирования. Описана методика проведения таких испытаний. Получены центрированные петли гистерезиса для каждого отдельного цикла увеличения и уменьшения прогиба балки в двух сериях экспериментов. Рассчитаны усредненные коэффициенты потерь Q^{-1} , а также коэффициенты рэлеевской модели, характеризующие обратно и прямо пропорциональные зависимости потерь от частоты периодического воздействия в диапазоне частот от 0,001 до 0,05 Гц. Установлены значения частот, при которых коэффициент потерь достигает минимума.

Ключевые слова: лабораторная система, трехточечная схема, горная порода, габбро, циклические испытания, механический гистерезис, усталостное разрушение, внутренние механические потери, коэффициент потерь.

Благодарность: Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 24-27-00103.

Для цитирования: 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.

Internal mechanical losses in gabbro under periodic impacts in low-frequency range

V.S. Salyukov¹, A.S. Voznesenskii¹, Ya.O. Kutkin¹

¹ University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia,
e-mail: asvoznensenskii@misis.ru

Abstract: Internal mechanical losses are among the physical properties of rocks, which, alongside with elasticity, plasticity and strength, should be included in calculations and models but are sometimes discarded because of complexity of their determination. They count for much in estimates of seismic impacts exerted by earthquakes and rock burst, blasts and vibration sources on rock mass surrounding underground roadways and on underground structures. This article describes a laboratory system and a procedure for three-point bend testing of rock samples to determine a loss factor Q^{-1} (inverse Q-factor) as function of an impact frequency. The cyclic test results are presented for gabbro beams in deformation at different peak amplitudes and frequencies. The test procedure is described. The centered hysteresis loops are obtained for each cycle of beam bending increase and decrease in two series of tests. The averaged loss factors Q^{-1} and the Rayleigh ratios are calculated, which characterize the inverse and direct proportions of the losses and periodic impact frequencies in a frequency range from 0.001 to 0.05 Hz. The frequency values that lead to the minimum loss factors are found.

Key words: laboratory system, three-point bending, rock, gabbro, cyclic tests, mechanical hysteresis, fatigue failure, internal mechanical losses, loss factor.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 24-27-00103.

For citation: 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;(11):64-74. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_11_0_64.

Введение

Подземные выработки часто подвергаются воздействию циклических нагрузок, которые могут быть вызваны землетрясениями, горными ударами, технологическими взрывами или вибрациями от различных машин. В ходе воздействия таких нагрузок возникает усталость различных подземных конструкций и горных пород, окружающих выработку. То есть вследствие таких нагрузок происходит деградация прочности и эволюция повреждений, что делает необходимым изучение изменения усталостных характеристик материалов [1 – 3].

В работах [4 – 6] описано изменение свойств осадочных горных пород под влиянием циклических нагрузок различной амплитуды и частоты. Влияние циклических нагрузок на механические свойства пород коллекторов освещается в [7]. Исследования воздействия цикли-

ческих нагрузок в условиях угольной шахты, разрабатываемой в осадочных вмещающих породах, описаны в [8, 9].

Для исследования усталостных свойств горных пород часто используют циклические испытания образцов на нагрузку – разгрузку. Скорость разрушения образца прямо коррелирует с амплитудой колебаний [10 – 13], а большая часть пластических осевых деформаций происходит при первом цикле нагрузки вблизи предела прочности [14, 15]. При циклических испытаниях на одной амплитуде осевая пластическая деформация стабилизируется с каждым циклом [16]. Во время циклического нагружения горной породы формируется петля гистерезиса, имеющая форму эллипса, возникающая из-за внешнего синусоидального воздействия вследствие разности фаз напряжения и деформации [17 – 19]. Форма петли гистерезиса за-

висит от формы волны циклического воздействия. В случае несинусоидального воздействия петля заостряется на концах; чем более острая форма у колебания, тем более острые края у петли [20].

Наряду с упругими и деформационными свойствами, внутренние механические потери также являются важным физическим свойством материалов [21, 22], и горных пород в частности [23, 24]. Они существенно влияют на распространение упругих волн в горной породе и должны быть учтены при расчетах и моделировании их воздействия на массив горных пород [25, 26]. Одной из моделей, описывающих зависимости механических потерь от частоты, является рэлеевская [27]. В эту модель заложены прямая и обратная зависимости механических потерь от частоты периодического упругого воздействия [28].

Изучение внутренних механических потерь, характеризуемых коэффициентом потерь Q^{-1} , имеет большое значение для прогнозирования долгосрочной устойчивости горных инженерных сооружений. Однако механические потери в горных породах в низкочастотном диапазоне (меньше 1 Гц) изучены недостаточно.

Целью работы является установление закономерностей изменения внутренних механических потерь в балках габбро при их изгибе в диапазоне частот 0,001–0,05 Гц и оценка параметров рэлеевской модели по полученным экспериментальным данным.

Материалы и методы

Теоретическое обоснование методики измерений

Рэлеевская модель учитывает две составляющие, одна из которых характеризует рост потерь при уменьшении частоты воздействия, а вторая — их рост при увеличении частоты воздействия, и может быть выражена формулой

$$Q^{-1} = 2\xi = \frac{1}{2\pi f} \alpha_{дМ} + 2\pi f \beta_{дК}, \quad (1)$$

где Q^{-1} — коэффициент потерь (обратная добротность); ξ — степень демпфирования; f — частота воздействия; $\alpha_{дМ}$; $\beta_{дК}$ — коэффициенты, характеризующие обратную и прямо пропорциональную зависимости потерь от частоты и имеющие размерности [Гц] и [с] соответственно [29].

Коэффициент потерь в случае изгиба балки по трехточечной схеме можно

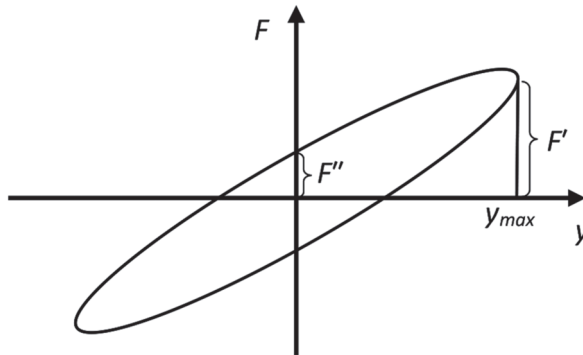


Рис. 1. Схема, поясняющая принцип измерения коэффициента потерь Q^{-1} по гистерезисной зависимости $F(y)$ усилия изгиба от прогиба балки y

Fig. 1. Schematic explaining the principle of measuring the loss factor Q^{-1} from the hysteresis dependence $F(y)$ of the bending force on the beam deflection y

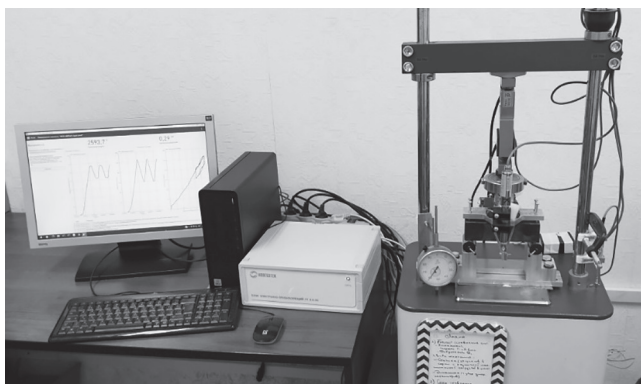


Рис. 2. Экспериментальная установка
Fig. 2. Experimental setup

вычислить, построив петлю гистерезиса зависимости усилия изгиба от прогиба, по модифицированной формуле, приведенной в ГОСТ 56801-2015. Форма гистерезисной петли приведена на рис. 1, а ниже — формула (2) для определения коэффициента потерь Q^{-1} .

$$Q^{-1} = F''/F', \quad (2)$$

где Q^{-1} — коэффициент потерь; F' , F'' — усилие изгиба при максимальном прогибе y_{\max} и в точке пересечения гистерезисного эллипса вертикальной оси соответственно.

Экспериментальная установка, образцы и режимы их нагружения

Испытания образцов-балок проводились по трехточечной схеме [30] с использованием специально разработанного приспособления для циклических нагружений по рекомендациям ISRM [31], позволяющего минимизировать трение в опорах, а также измерять прогиб непосредственно на образцах. Эксперименты проводились на машине нагружения по программе испытаний, задаваемой с помощью компьютера. В испытаниях использовалась установка, показанная на рис. 2. Ее основой являлся испытательный комплекс АСИС (ООО НПО «Геотек», Пенза, Россия). Программное

обеспечение АСИС позволило настроить алгоритм циклических испытаний с указанием количества циклов, максимальной и минимальной деформации и скорости перемещений рамы испытательной машины. Нагрузка измерялась тензометрическим динамометром с диапазоном измерения до 30 кН. Два преобразователя линейных перемещений (LVDT) с диапазоном измерения до 10 мм регистрировали прогиб непосредственно на образце. Эти преобразователи имели подключение к 18-битному АЦП измерительной системы QMBox (R-Technology, Москва, Россия), позволявшей подробно регистрировать нагрузку и прогиб образца на диске компьютера. Образцы испытывались в режиме с заданными перемещениями рамы.

В экспериментах использовались образцы габбро в форме прямоугольных параллелепипедов с размерами $150 \times 40 \times 40$ мм (см. рис. 3).

Образец G1 нагружался по трехточечной схеме на прессе с заданной скоростью до значения перемещения рамы установки 0,2 мм, после происходило циклическое деформирование в диапазоне перемещения рамы от 0,2 до 0,3 мм (3 цикла), затем происходила циклическая нагрузка в диапазоне перемещения рамы от 0,3 до 0,5 мм (3 цикла) [30].

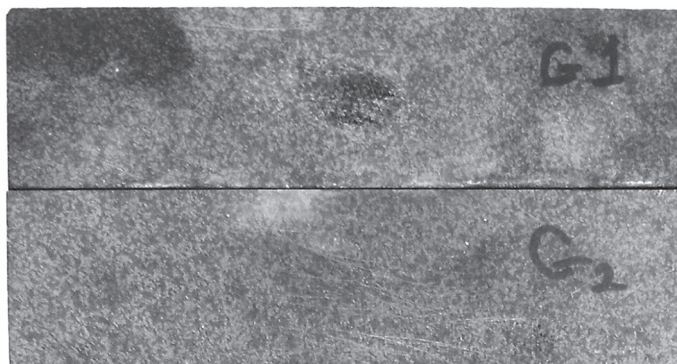


Рис. 3. Образцы габбро
Fig. 3. Specimens of gabbro

Образец G2 нагружался по трехточечной схеме на прессе с заданной скоростью до значения перемещения рамы установки 0,2 мм, после происходило циклическое деформирование в диапазоне перемещения рамы от 0,2 до 0,3 мм (6 циклов), затем происходила циклическая нагрузка в диапазоне перемещения рамы от 0,3 до 0,4 мм (6 циклов).

Скорости перемещения рамы установки составляли: 0,1, 0,25, 0,5, 0,75, 1 мм/мин. Частоты рассчитывались, исходя из фактического периода нагрузки — разгрузки при сжатии образца. Также стоит отметить, что деформации на образце были существенно ниже перемещения рамы и в большей степени приближались к гармонической форме за счет сглаживания углов в минимумах и максимумах прогиба и добавления промежутка покоя в 1 с в этих точках.

Частота деформирования определялась как обратная величина периода $f = 1/T$, где T — период циклического деформирования, он определялся по записи эксперимента.

Результаты

В результате циклических испытаний образцов габбро были получены записи нагрузок и прогиба на образцах. Одна из диаграмм, описывающих эксперимент для образца G2, приведена на рис. 4. На первом и втором циклах нагрузки — разгрузки происходит установление стационарного режима нагружения для первого пика перемещения рамы. То же можно сказать про седьмой и восьмой циклы нагрузки — разгрузки для второго пика перемещения рамы.

При испытании образца G1 на скорости 0,1 мм/мин и пиковом перемещении

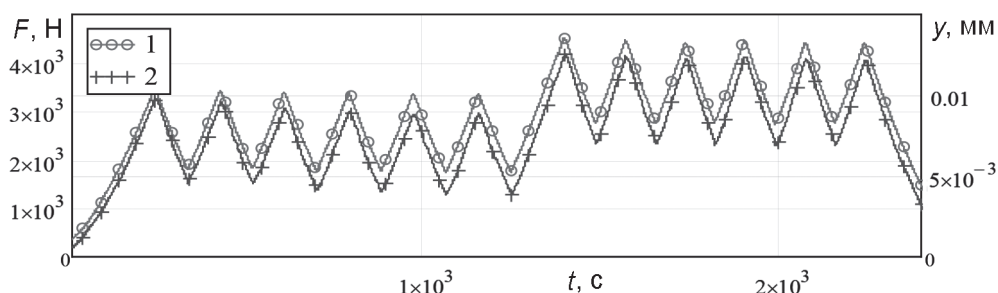


Рис. 4. Общий вид графиков нагрузки F (1) и прогиба y (2) образца G2 от времени
Fig. 4. General view of graphs of load F (1) and deflection y (2) of specimen G2 from time

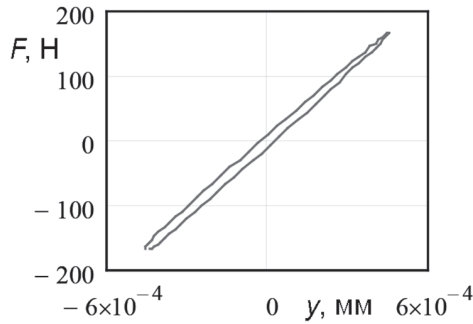


Рис. 5. Пример центрированной петли гистерезиса для одного из циклов деформирования балки
 Fig. 5. Example of a centered hysteresis loop for one of the beam deformation cycles

рамы 0,5 мм произошло его разрушение. После этого было решено уменьшить второй пик перемещения рамы с 0,5 до 0,4 мм для образца G2.

Для каждого цикла нагрузки — разгрузки на каждой скорости перемещения рамы были построены приведенные к началу координат петли гистерезиса, по которым были рассчитаны коэффициенты потерь. В качестве примера одна из петель гистерезиса показана на рис. 5. Центровка петли гистерезиса необходима для снятия корректных усилия изгиба при максимальном прогибе y_{\max} и усилия в точке пересечения гистерезисного эллипса вертикальной оси, так как циклы нагрузки — разгрузки

происходят в рамках заданного, ненулевого перемещения рамы установки. То есть без центровки петля не пересекает вертикальную ось.

Обсуждение результатов

В процессе обработки результатов эксперимента коэффициент потерь Q^{-1} усреднялся для каждой скорости и пикового перемещения рамы. Стоит отметить, что первую треть циклов нагрузки — разгрузки для каждой скорости и пикового перемещения рамы было решено принимать за установление режима нагружения, вследствие чего значения коэффициента потерь для этих циклов в усреднении не участвовали.

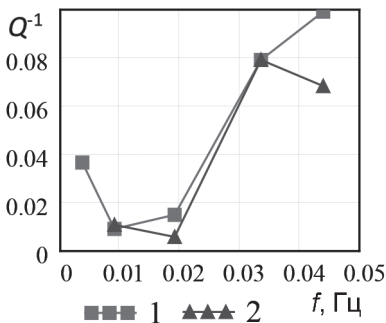


Рис. 6. Графики зависимостей коэффициента потерь от частоты для образца G1 при максимальных перемещениях рамы 0,3 мм (1) и 0,5 мм (2)

Fig. 6. Graphs of frequency dependences of loss factor for sample G1 at maximum frame displacements of 0,3 mm (1); 0,5 mm (2)

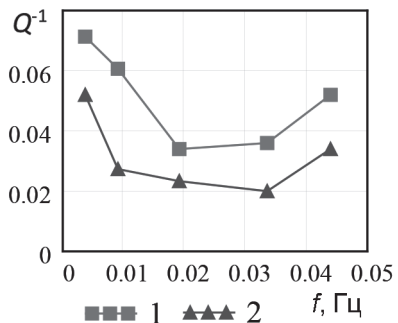


Рис. 7. Графики зависимостей коэффициента потерь от частоты для образца G2 при максимальных перемещениях рамы 0,3 мм (1) и 0,4 мм (2)

Fig. 7. Graphs of frequency dependences of loss factor for sample G2 at maximum frame displacements of 0,3 mm (1); 0,4 mm (2)

Таблица 1

Теоретические значения коэффициентов $\alpha_{дм}$ и $\beta_{дк}$ для образца G1
Theoretical values of coefficients $\alpha_{дм}$ and $\beta_{дк}$ for specimen G1

Максимальное перемещение рамы, мм	$\alpha_{дм}$, Гц	$\beta_{дк}$, с
0,3	0,00617	0,296
0,5	0,00282	0,211

Таблица 2

Теоретические значения коэффициентов $\alpha_{дм}$ и $\beta_{дк}$ для образца G2
Theoretical values of coefficients $\alpha_{дм}$ and $\beta_{дк}$ for specimen G2

Максимальное перемещение рамы, мм	$\alpha_{дм}$, Гц	$\beta_{дк}$, с
0,3	0,00151	0,416
0,4	0,00836	0,119

Графики зависимости коэффициента потерь от частоты для образцов G1 и G2 представлены на рис. 6 и 7 соответственно.

Коэффициент потерь для образца G1 с увеличением частоты сначала уменьшался, достигая минимума в 0,0089 Гц для пика перемещения рамы 0,3 мм, и в 0,019 Гц для пика перемещения рамы 0,5 мм, а после увеличивался. Также для образца G2 коэффициент потерь имеет два минимума — в 0,019 и в 0,0336 Гц — для пиковых перемещений в 0,3 и 0,4 мм соответственно. Стоит отметить, что минимум коэффициента потерь увеличивается с увеличением пикового перемещения рамы для каждого из исследуемых образцов. Вероятно, это связано с особенностями работы используемой установки, так как задаваемой величиной является не нагрузка на образец, а перемещение рамы.

Таким образом, можно сказать о соответствии данных, полученных в ходе циклических испытаний, рэлеевской модели затухания в низкочастотном диапазоне. Также наличие минимумов в зависимостях коэффициента потерь от частоты позволяет рассчитать теоретические значения коэффициентов $\alpha_{дм}$, $\beta_{дк}$, которые представлены в табл. 1 и 2.

Заключение

Проведение циклических испытаний на изгиб образцов — балок габбро показало соответствие рэлеевской модели затухания в низкочастотном диапазоне от 0,001 до 0,05 Гц. Для различных пиковых перемещений рамы существуют частоты, на которых происходит изменение хода зависимости частота — коэффициент потерь с обратно пропорциональной на прямо пропорциональную. Получены теоретические значения коэффициентов $\alpha_{дм}$ и $\beta_{дк}$ рэлеевской модели для исследованных образцов габбро.

Результаты могут быть использованы на практике, в частности, при моделировании и оценке сейсмического воздействия на массив пород вокруг горных выработок, тоннелей и других подземных сооружений в таких программных МКЭ-пакетах, как COMSOL Multiphysics, ANSYS и аналогичных. Однако есть необходимость в расширении полученных результатов путем проведения схожих исследований на образцах из горных пород другого генезиса.

Авторы выражают благодарность П.И. Дубинину за подготовку образцов габбро для испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Zhang Q., Dai F., Liu Y. Experimental assessment on the dynamic mechanical response of rocks under cyclic coupled compression-shear loading // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2022, vol. 216. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106970.
3. Zhang C., Wang Y., Ruan H., Ke B., Lin H. The strain characteristics and corresponding model of rock materials under uniaxial cyclic load/unload compression and their deformation and fatigue damage analysis // *Archive of Applied Mechanics*. 2021, vol. 91, no. 6, pp. 2481 – 2496. DOI: 10.1007/s00419-021-01899-0.
4. Chunde M., Shan L., Xibing L., Zelin L., Weibin X. Research and microscopic analysis of seepage characteristics of sandstone under low-frequency cyclic loading // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020, vol. 570, no. 5, article 052048. DOI: 10.1088/1755-1315/570/5/052048.
5. Zhou Z., Zhang J., Cai X., Wang S., Du X., Zang H., Chen L. Permeability evolution of fractured rock subjected to cyclic axial load conditions // *Geofluids*. 2020. DOI: 10.1155/2020/4342514.
6. Машинский Э. И. Амплитудно-зависимый гистерезис скорости волны в горных породах в широком диапазоне частот: экспериментальное исследование // *Горные науки и технологии*. – 2021. – Т. 6. – № 1. – С. 23 – 30. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-1-23-30.
7. Tang J., Fang B., Lan Y. Analysis of rock nonlinear deformation behavior with loading and unloading hysteresis effect // *Oil Geophysical Prospecting*. 2014, vol. 49, no. 6, pp. 1131 – 1137.
8. Cao L., Zhang P., Zhang J., Lin G., Jiskani I. M., Chen Z., Wang Z., Li M. Experimental study of hysteresis characteristics of water-sediment mixture seepage in rock fractures // *Geofluids*. 2021. DOI: 10.1155/2021/6692388.
9. Chen L., Wang D., Jiang Y., Luan H., Zhang, G., Liang B. Experimental study on mechanical properties and acoustic emission characteristics of dry and water-saturated soft rocks under different dynamic loadings // *Sustainability (Switzerland)*. 2023, vol. 15, no. 17, article 13201. DOI: 10.3390/su151713201.
10. Han J., Zhao D., Zhang S., Zhou Y. Damage evolution of granite under ultrasonic vibration with different amplitudes // *Shock and Vibration*. 2022. DOI: 10.1155/2022/8975797.
11. Guo H., Ji M., Zhang Y., Zhang M. Study of mechanical property of rock under uniaxial cyclic loading and unloading // *Advances in Civil Engineering*. 2018. DOI: 10.1155/2018/1670180.
12. Pan Y., Wang C., Wang Y. Mechanical degradation mechanism of rock under seismic disturbance stress // *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 2022, vol. 55, no. 4. DOI: 10.1144/qjgegh2022-007.
13. Леонов М. Г., Кочарян Г. Г., Ревуженко А. Ф., Лавриков С. В. Тектоника разрыхления геологические данные и физика процесса // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2020. – Т. 11. – № 3. – С. 491 – 521. DOI: 10.5800/GT-2020-11-3-0488.
14. Taheri A., Faradonbeh R. S., Munoz H. Experimental study on progressive damage evolution in rocks subjected to post-peak cyclic loading history // *Geotechnical Testing Journal*. 2022, vol. 45, no. 3, pp 606 – 626. DOI: 10.1520/GTJ20210109.
15. Кулагина М. А., Рычков Б. А., Степанова Ю. Ю. Определение упругих констант горных пород // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки»*. – 2019. – Т. 23. – № 2. – С. 284 – 303. DOI: 10.14498/vsgtu1595.
16. Lou P., Li C., Liang S., Feng M., Pan B. Hysteresis characteristics of brittle rock deformation under constant load cyclic loading and unloading // *Tehnicki Vjesnik*. 2020, vol. 27, no. 3, pp. 906 – 911. DOI: 10.17559/TV-20180705053718.
17. Chen Y., Wang S., Wang E. Quantitative study on stress-strain hysteretic behaviors in rocks // *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2007, vol. 26, no. 2, pp. 4066 – 4073.
18. Fu H., Li J., Li G., Li D. Hysteresis Behavior Modeling of Hard Rock Based on the Mechanism and Relevant Characteristics // *Sustainability (Switzerland)*. 2022, vol. 14, no. 16. DOI: 10.3390/su141610412.
19. Chen Y. P., Xi D. Y., Xue Y. W. Hysteresis and attenuation of saturated rocks under cyclic loading // *Acta Geophysica Sinica*. 2004, vol. 47, no. 4, pp. 672 – 679. DOI: 10.1002/cjg2.3547.

20. Liu H. P., Peselnick L. Mechanical hysteresis loops of an anelastic solid and the determination of rock attenuation properties // *Geophysical Research Letters*. 1979, vol. 6, no. 7, pp. 545 – 548. DOI: 10.1029/GL006i007p00545.
21. Головин И. С. Внутреннее трение и механическая спектроскопия металлических материалов. — М.: Издательский Дом МИСиС, 2012. — 247 с.
22. 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. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157455.
23. Лебедев А. В., Островский Л. А., Сутин А. М., Соустова И. А., Джонсон П. А. Резонансная акустическая спектроскопия при низких добротностях // *Акустический журнал*. — 2003. — Т. 49. — № 1. — С. 81 – 87. DOI: 10.1134/1.1537392.
24. Voznesensky A. S., Kutkin Y. O., Krasilov M. N. Interrelation of the acoustic q-factor and strength in limestone // *Journal of Mining Science*. 2015, vol. 51, no. 1, pp. 23 – 30. DOI: 10.1134/S1062739115010044.
25. Morozov I. B., Deng W., Cao D. Mechanical analysis of viscoelastic models for Earth media // *Geophysical Journal International*. 2020, vol. 220, no. 3, pp. 1762 – 1773. DOI: 10.1093/gji/ggz445.
26. Петрушин Г. Д., Петрушина А. Г. Определение площади петли механического гистерезиса с использованием математических моделей // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2020. — Т. 86. — № 5. — С. 59 – 64. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-5-59-64.
27. Rayleigh B. The theory of sound. Vol. 2. New York, 1945, 504 p.
28. Galvez F., Sorrentino L., Dizhur, D., Ingham J. M. Damping considerations for rocking block dynamics using the discrete element method // *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 2022, vol. 51, no. 4, pp. 935 – 957. DOI: 10.1002/eqe.3598.
29. Вознесенский А. С. Моделирование физических процессов горного производства. — М.: Издательский Дом МИСиС, 2023. — 291 с.
30. Салюков В. С. Внутренние механические потери в горных породах в низкочастотном диапазоне / Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 16-й международной научной школы молодых ученых и специалистов. — М.: Издательский Дом ИПКОН РАН, 2023. — С. 140 – 142.
31. Ouchterlony F., Franklin J. A., Zongqi Sun, Atkinson B. K., Meredith P. G., Rummel F., Mfiller W., Nishimatsu Y., Takahashi H., Costin L. S., Ingraffea A. R. Suggested methods for determining the fracture toughness of rock // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1988, vol. 25, no. 2, pp. 71 – 96. **ТАБ**

REFERENCES

1. 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.
2. Zhang Q., Dai F., Liu Y. Experimental assessment on the dynamic mechanical response of rocks under cyclic coupled compression-shear loading. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2022, vol. 216. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106970.
3. Zhang C., Wang Y., Ruan H., Ke B., Lin H. The strain characteristics and corresponding model of rock materials under uniaxial cyclic load/unload compression and their deformation and fatigue damage analysis. *Archive of Applied Mechanics*. 2021, vol. 91, no. 6, pp. 2481 – 2496. DOI: 10.1007/s00419-021-01899-0.
4. Chunde M., Shan L., Xibing L., Zelin L., Weibin X. Research and microscopic analysis of seepage characteristics of sandstone under low-frequency cyclic loading. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020, vol. 570, no. 5, article 052048. DOI: 10.1088/1755-1315/570/5/052048.
5. Zhou Z., Zhang J., Cai X., Wang S., Du X., Zang H., Chen L. Permeability evolution of fractured rock subjected to cyclic axial load conditions. *Geofluids*. 2020. DOI: 10.1155/2020/4342514.
6. Mashinskii E. I. Amplitude-dependent hysteresis of wave velocity in rocks in wide frequency range: an experimental study. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021, vol. 6, no. 1, pp. 23 – 30. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-1-23-30.

7. Tang J., Fang B., Lan Y. Analysis of rock nonlinear deformation behavior with loading and unloading hysteresis effect. *Oil Geophysical Prospecting*. 2014, vol. 49, no. 6, pp. 1131 – 1137.
8. Cao L., Zhang P., Zhang J., Lin G., Jiskani I. M., Chen Z., Wang Z., Li M. Experimental study of hysteresis characteristics of water-sediment mixture seepage in rock fractures. *Geofluids*. 2021. DOI: 10.1155/2021/6692388.
9. Chen L., Wang D., Jiang Y., Luan H., Zhang, G., Liang B. Experimental study on mechanical properties and acoustic emission characteristics of dry and water-saturated soft rocks under different dynamic loadings. *Sustainability (Switzerland)*. 2023, vol. 15, no. 17, article 13201. DOI: 10.3390/su151713201.
10. Han J., Zhao D., Zhang S., Zhou Y. Damage evolution of granite under ultrasonic vibration with different amplitudes. *Shock and Vibration*. 2022. DOI: 10.1155/2022/8975797.
11. Guo H., Ji M., Zhang Y., Zhang M. Study of mechanical property of rock under uniaxial cyclic loading and unloading. *Advances in Civil Engineering*. 2018. DOI: 10.1155/2018/1670180.
12. Pan Y., Wang C., Wang Y. Mechanical degradation mechanism of rock under seismic disturbance stress. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 2022, vol. 55, no. 4. DOI: 10.1144/qjehg2022-007.
13. Leonov M. G., Kocharyan G. G., Revuzhenko A. F., Lavrikov S. V. Tectonics of rock loosening: geological data and physics of the process. *Geodynamics and Tectonophysics*. 2020, vol. 11, no. 3, pp. 491 – 521. [In Russ]. DOI: 10.5800/GT-2020-11-3-0488.
14. Taheri A., Faradonbeh R. S., Munoz H. Experimental study on progressive damage evolution in rocks subjected to post-peak cyclic loading history. *Geotechnical Testing Journal*. 2022, vol. 45, no. 3, pp 606 – 626. DOI: 10.1520/GTJ20210109.
15. Kulagina M. A., Rychkov B. A., Stepanova Yu. Yu. Determination of elastic constants of rocks. *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*. 2019, vol. 23, no. 2, pp. 284 – 303. [In Russ]. DOI: 10.14498/vsgtu1595.
16. Lou P., Li C., Liang S., Feng M., Pan B. Hysteresis characteristics of brittle rock deformation under constant load cyclic loading and unloading. *Tekhnicki Vjesnik*. 2020, vol. 27, no. 3, pp. 906 – 911. DOI: 10.17559/TV-20180705053718.
17. Chen Y., Wang S., Wang E. Quantitative study on stress-strain hysteretic behaviors in rocks. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2007, vol. 26, no. 2, pp. 4066 – 4073.
18. Fu H., Li J., Li G., Li D. Hysteresis Behavior Modeling of Hard Rock Based on the Mechanism and Relevant Characteristics. *Sustainability (Switzerland)*. 2022, vol. 14, no. 16. DOI: 10.3390/su141610412.
19. Chen Y. P., Xi D. Y., Xue Y. W. Hysteresis and attenuation of saturated rocks under cyclic loading. *Acta Geophysica Sinica*. 2004, vol. 47, no. 4, pp. 672 – 679. DOI: 10.1002/cjg2.3547.
20. Liu H. P., Peselnick L. Mechanical hysteresis loops of an anelastic solid and the determination of rock attenuation properties. *Geophysical Research Letters*. 1979, vol. 6, no. 7, pp. 545 – 548. DOI: 10.1029/GL006i007p00545.
21. Golovin I. S. *Vnutrennee trenie i mekhanicheskaya spektroskopiya metallicheskih materialov* [Internal friction and mechanical spectroscopy of metallic materials], Moscow, 2012, 247 p.
22. 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. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157455.
23. 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, no. 1, pp. 81 – 87. [In Russ]. DOI: 10.1134/1.1537392.
24. Voznesensky A. S., Kutkin Y. O., Krasilov M. N. Interrelation of the acoustic q-factor and strength in limestone. *Journal of Mining Science*. 2015, vol. 51, no. 1, pp. 23 – 30. DOI: 10.1134/S1062739115010044.
25. Morozov I. B., Deng W., Cao D. Mechanical analysis of viscoelastic models for Earth media. *Geophysical Journal International*. 2020, vol. 220, no. 3, pp. 1762 – 1773. DOI: 10.1093/gji/ggz445.
26. Petrushin G. D., Petrushina A. G. Determination of the area of mechanical hysteresis loop using mathematical models. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2020, vol. 86, no. 5, pp. 59 – 64. [In Russ]. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-5-59-64.

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

28. Galvez F., Sorrentino L., Dizhur, D., Ingham J. M. Damping considerations for rocking block dynamics using the discrete element method. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 2022, vol. 51, no. 4, pp. 935 – 957. DOI: 10.1002/eqe.3598.

29. Voznesenskii A. S. *Modelirovanie fizicheskikh protsessov gornogo proizvodstva* [Modeling of physical processes of mining production], Moscow, 2023, 291 p.

30. Salyukov V. S. Internal mechanical losses in rocks in the low-frequency range. *Problemy osvoeniya nedr v XXI veke glazami molodykh. Materialy 16-y mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly molodykh uchenykh i spetsialistov* [Problems of subsoil development in the XXI century through the eyes of young people. Materials of the 16th international scientific school of young scientists and specialists], Moscow, 2023, pp. 140 – 142. [In Russ].

31. Ouchterlony F., Franklin J. A., Zongqi Sun, Atkinson B. K., Meredith P. G., Rummel F., Mfiller W., Nishimatsu Y., Takahashi H., Costin L. S., Ingraffea A. R. Suggested methods for determining the fracture toughness of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1988, vol. 25, no. 2, pp. 71 – 96.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Салюков Владислав Сергеевич¹ – аспирант,
e-mail: m1605021@edu.misis.ru,

ORCID ID: 0009-0003-0343-7056,

Вознесенский Александр Сергеевич¹ – д-р техн. наук,
профессор, e-mail: asvoznensenskii@misis.ru,

ORCID ID: 0000-0003-0926-1808,

Куткин Ярослав Олегович¹ – канд. техн. наук,
доцент, e-mail: kutnew@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2644-3371,

¹ Университет науки и технологий МИСИС.

Для контактов: Вознесенский А. С., e-mail: asvoznensenskii@misis.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.S. Salyukov¹, Graduate Student,

e-mail: m1605021@edu.misis.ru,

ORCID ID: 0009-0003-0343-7056,

A.S. Voznesenskii¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

e-mail: asvoznensenskii@misis.ru,

ORCID ID: 0000-0003-0926-1808,

Ya.O. Kutkin¹, Cand. Sci. (Eng.),

Assistant Professor, e-mail: kutnew@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2644-3371,

¹ University of Science and Technology MISIS,

119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: A.S. Voznesenskii, e-mail: asvoznensenskii@misis.ru.

Получена редакцией 11.06.2024; получена после рецензии 18.07.2024; принята к печати 10.10.2024.

Received by the editors 11.06.2024; received after the review 18.07.2024; accepted for printing 10.10.2024.

