ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(4):30-42
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 550.831:539.3:534.1 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_4_0_30

ВИДЫ ВНУТРЕННИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ В ИНФРАЗВУКОВОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЙ И ИХ СООТВЕТСТВИЕ РЭЛЕЕВСКОЙ МОДЕЛИ

А.С. Вознесенский[1], М.Ю. Задорожный[1], В.С. Салюков[1], Я.О. Куткин[1]

[1] НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: asvoznesenskii@misis.ru

Аннотация: Эксперименты на образцах-пластинах габбро при их циклическом деформировании при изгибе по трехточечной схеме и регистрации параметров петли гистерезиса на частотах 0,05–20 Гц показали ряд характерных особенностей внутренних механических потерь для этого диапазона. Изменение внутренних механических потерь в горных породах в инфразвуковом диапазоне циклических воздействий может быть описано суммой обратно пропорциональной функции, характеризующей вязкие потери, и постоянной величиной, обусловленной потерями вида «сухое трение». Для исследованного диапазона частот установленная закономерность в части вязких потерь соответствует рэлеевской модели, описывающей их увеличение при уменьшении частоты воздействий. Экспериментально и расчетным путем установлено наличие характерной частоты изменения преобладающего механизма потерь, находящейся в зависимости от конкретного образца в диапазоне от 0,04 до 0,14 Гц. Переход из одного диапазона частот в другой сопровождается изменением ориентации гистерезисной петли, что обусловлено физикой процессов. В области верхних частот исследованного диапазона преобладает механизм вида «сухое трение», когда перемещения и нагрузки близки по фазе друг другу. В области нижних частот преобладают вязкие потери. В этом случае нагрузка по фазе отстает от вызвавшего ее перемещения, что приводит к изменению ориентации петли гистерезиса. Численное моделирование методом конечных элементов в среде COMSOL Multiphysics подтвердило эту гипотезу.

Ключевые слова: механические потери, лабораторный эксперимент, горные породы, габбро, циклическое деформирование, инфразвуковой диапазон, рэлеевская модель, вязкие потери, сухое трение, гистерезисный эллипс, метод конечных элементов.

Для цитирования: *Вознесенский А. С., Задорожный М. Ю., Салюков В. С., Куткин Я. О.* Виды внутренних механических потерь в горных породах в инфразвуковом диапазоне воздействий и их соответствие рэлеевской модели // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 4. – С. 30–42. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_4_0_30.

Types of internal mechanical losses in rocks in infrasonic frequency range of treatment and their conformity with the Rayleigh model

A.S. Voznesenskii[1], M.Yu. Zadorozhnyy[1], V.S. Salyukov[1], Ya.O. Kutkin[1]

[1] NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: asvoznesenskii@misis.ru

© А.С. Вознесенский, М.Ю. Задорожный, В.С. Салюков, Я.О. Куткин. 2026.

Abstract: The cyclic three-point bending tests of gabbro slab samples with the recording of the hysteresis loop parameters at the frequencies of 0.05–20 Hz revealed some special features of mechanical losses within this range. The change in internal mechanical losses in rocks in the infrasonic frequency range of cyclic treatment can be described by a sum of an inversely proportional function, characterizing viscous losses, and a constant value governed by losses due to dry friction. For the test frequency range, the revealed pattern of viscous losses conforms with the Rayleigh model which explains the increase in such losses at the decreased treatment frequency. The tests and calculations find out a characteristic frequency of change in the dominant mechanism of losses, within the range from 0.04 to 0.14 Hz depending on a specific sample. Transition between the frequency ranges is accompanied by the change in the orientation of the hysteresis loop, which is conditioned by physics of the processes. At the upper frequencies of the test range, the mechanism of dry friction dominates, when the displacements and loads have similar phases. At the lower frequencies of the test range, viscous losses prevail. In this case, the load phase falls behind of the governing displacement, which changes the orientation of the hysteresis loop. The finite element-based modeling in COMSOL Multiphysics confirmed that hypothesis.

Key words: mechanical losses, lab-scale experiment, rocks, gabbro, cyclic deformation, infrasonic frequency range, Rayleigh model, viscous losses, dry friction, hysteresis ellipse, finite element method.

For citation: Voznesenskii A. S., Zadorozhnyy M. Yu., Salyukov V. S., Kutkin Ya. O. Types of internal mechanical losses in rocks in infrasonic frequency range of treatment and their conformity with the Rayleigh model. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(4):30-42. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_4_0_30.

Введение

Практический и научный контекст

Как показано в [1], внутренние механические потери (ВМП) — важнейшие физические свойства материалов. Их величина оценивается безразмерной добротностью Q или коэффициентом потерь Q^{-1} (обратной добротностью), характеризующими переход части механической энергии в тепловую при упругих колебаниях. Наряду с упругими свойствами, скоростями продольных и поперечных волн, прочностью они исследуются в материаловедении, неразрушающем контроле и диагностике технических объектов, сейсмостойком строительстве (ГОСТ Р ИСО 10137-2016). ВМП учитываются при анализе распространения сейсмоволн при взрывной добыче полезных ископаемых и сейсморазведке, воздействии землетрясений и горных ударов на наземные и подземные сооружения, транспортные магистрали, тоннели, метрополитены. Проявляют себя ВМП при периодических, циклических, вибрационных, акустических воздействиях различных частот на объекты, и они должны учитываться при их проектировании и эксплуатации таких объектов. Все это говорит об актуальности исследований, описанных ниже.

Современное состояние в области исследований внутренних механических потерь

В различных областях техники коэффициент ВМП оценивается при характеристике виброгасящих материалов [2]. В физике полимерных материалов [3] методы оценки коэффициента ВМП по петлям гистерезиса при циклических нагружении и деформировании описаны в

ГОСТ Р 56801-2015. Следует отметить, что методики измерения ВМП, описанные в данном ГОСТе, применимы и к другим материалам.

В металлургии ВМП изучаются для металлов и сплавов [4]. В [5] показано, что через интегральную площадь пика внутреннего трения можно оценить долю трансформированного ε-мартенсита в сплавах с памятью формы. В [6] описана корреляция между гистерезисными пиками затухания стабильных аустенитных нержавеющих сталей, вызванными выделением водорода. Обработка магнитным полем стали Cr_4Mo_4V приводит к заметному снижению внутреннего трения, что является показателем повышения механической стабильности аустенита [7].

В горном деле и геофизике ВМП исследуются в горных породах различных типов [8—12]. Циклические нагрузки в звуковом и инфразвуковом диапазонах частот в горных массивах [13, 14] могут возникать при антропогенном воздействии, связанном с взрывами для отбойки при выемке полезного ископаемого и проходке выработок. В [15] показана тенденция к увеличению процента рассеянной энергии песчаника по мере роста амплитуды циклических напряжений, в результате увеличения энергии, используемой для продления трещин. Закрытие микротрещин мела при циклической нагрузке влияет на демпфирующие свойства, коэффициент демпфирования увеличивается с увеличением количества циклов нагрузки–разгрузки [16]. В [17] описаны различные механизмы затухания сейсмических волн в карбонатных породах различной пористости, насыщенных жидкостью, а также сделан вывод о зависимости величины затухания от скольжения в трещинах при уменьшении шероховатости их поверхности при увеличении давления сжатия. Трение между частицами горной породы во время циклического нагружения приводит к нелинейному гистерезису [18—20]. С увеличением верхнего предела осевого сжатия гистерезисная петля кривой «напряжение–деформация» смещается вправо по оси абсцисс [21]. С увеличением амплитуды и уменьшением частоты циклических напряжений ширина гистерезисных петель увеличивается, что говорит об увеличении энергии, затрачиваемой на демпфирование, и доминирующей роли циклической нагрузки — разгрузки при разрушении горной породы [22]. Для песчано-каменных смесей с увеличением содержания камня гистерезисная петля смещается в сторону оси напряжений, а ее площадь увеличивается [23]. В [24] показано, что коэффициент потерь при приложении параллельной слоистости сланца нагрузки меньше, чем при приложении перпендикулярной нагрузки.

Исследования частотных зависимостей коэффициента потерь занимают особое место для горных пород. В диапазоне частот выше 1—100 Гц эта зависимость носит линейный характер. При более высоких частотах, где длина волны сравнима с размерами неоднородностей, эта зависимость носит квадратичный характер. Однако частотная зависимость коэффициента потерь горных пород ниже 1—100 Гц изучена в гораздо меньшей степени, особенно ниже 0,1 Гц, что встречается при исследовании резонансных частот зданий и сооружений при воздействии сейсмических волн. Так, например, в ГОСТ Р ИСО 10137-2016 рассматриваются частоты до 0,06 Гц, в [25] анализируются колебания Земли с периодом до 100 с или 0,01 Гц.

Такие же диапазоны частот могут встречаться и при оползнях склонов гор, обрушении бортов и уступов карьеров и кровли подземных горных выработок.

Спектр таких процессов, представляющих собой сдвижение пород в течение нескольких секунд, также находится в диапазоне частот ниже 1 Гц.

В этой связи представляет интерес возможность описания частотных зависимостей коэффициента потерь рэлеевской моделью [26], включающей сумму двух составляющих, из которых одна описывает изменение коэффициента потерь прямо пропорционально частоте, а вторая — обратно пропорционально ей.

Цель и задачи

Целью описанных в данной статье исследований являлась оценка величин и характера механических потерь в образцах габбро в виде тонких пластин при испытании на циклический изгиб по трехточечной схеме.

Достижение указанной цели предусматривало решение следующих задач:

- лабораторные испытания образцов — пластин габбро при изгибе по трехточечной схеме в диапазоне частот от 0,05 — 20 Гц.
- построение графиков частотных зависимостей механических потерь и их анализ;
- аппроксимация полученных зависимостей функциями обратной и обратной с постоянной составляющей, выбор наилучшей модели;
- обоснование вида внутренних механических потерь в образцах по полученным модельным зависимостям;
- оценка применимости рэлеевской модели вязких потерь для горных пород;
- установление закономерности изменения доли вязких потерь в общем балансе;
- моделирование методом конечных элементов для подтверждения достоверности полученных выводов о видах потерь и доли вязкой составляющей.

Материалы и методы

Теоретическое обоснование методики измерений

Дифференциальное уравнение периодических воздействий на колебательную систему с потерями может быть записано в следующем виде:

$$m\ddot{x} + \alpha\dot{x} + cx + R\,\mathrm{sign}(\dot{x}) = P(t), \quad (1)$$

где m — масса или плотность; α — коэффициент потерь; c — жесткость; R — сила «сухого трения»; $P(t)$ — сила воздействия; sign — знаковая функция. Данное уравнение может быть приведено к виду

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + p^2 x + r\,\mathrm{sign}(\dot{x}) = f(t), \quad (2)$$

где $n = \alpha/(2m)$; $p^2 = c/m$; $r = R/m$.

Уравнение (2) может быть применено к системам с сосредоточенными параметрами в виде груза, пружины и демпфера, в которых рассматриваются, например, колебания груза. Оно может быть применено и к системам с распределенными параметрами и свойствами в виде плотности, модуля упругости и коэффициента потерь, в которых, в частности, рассматривается распространение упругих волн.

Рэлеевская модель вязких потерь [24] учитывает две составляющие. Одна из них связана с коэффициентом n и характеризует рост потерь при увеличении частоты воздействия. Вторая связана с коэффициентом p^2 и описывает их рост при уменьшении частоты воздействия.

Вязкие потери выражаются формулой

$$Q^{-1} = 2\xi = \frac{1}{2\pi f}\alpha_{dM} + 2\pi f\beta_{dK}, \quad (3)$$

где Q^{-1} — коэффициент потерь без учета составляющей r (другие названия — обратная добротность, тангенс угла потерь); ξ — степень демпфирования; f — частота воздействия; α_{dM}, β_{dK} — коэффициенты, характеризующие обратно и

прямо пропорциональные зависимости потерь от частоты и имеющие размерности [Гц] и [с] соответственно. Первое слагаемое в правой части выражения (3) характеризует потери в низкочастотной области, где они возрастают с уменьшением частоты. Второе слагаемое описывает потери в высокочастотной области, где они растут с увеличением частоты.

Как показано в ряде теоретических и экспериментальных исследований, составляющая потерь *r* вида «сухое трение» не зависит от частоты и может быть выражена постоянной величиной. При обработке экспериментальных результатов эта составляющая в формулах учитывается как постоянный коэффициент, суммируемый с составляющими других видов потерь.

При экспериментальном определении коэффициента потерь следует учитывать также конструкционное трение, зависящее от размеров и формы исследуемой среды или конструкции.

Следует отметить, что для горных пород в силу их генезиса характерно наличие развитой трещиноватости различных масштабных уровней, что отличает их от металлов, сплавов, однородных по структуре композитов, для которых существенными являются процессы на уровнях дислокаций. Для горных пород кроме этих процессов существенным является трение берегов микро- и макротрещин на микро и мезоуровнях, описываемое компонентой *r* в уравнении (2) и вносящее значительный вклад в общую картину механических потерь.

Экспериментальные методы измерения коэффициента потерь

Коэффициент потерь в случае изгиба балки по трехточечной схеме можно вычислить, построив петлю гистерезиса зависимости усилия изгиба от прогиба (рис. 1), по модифицированной формуле, приведенной в ГОСТ 56801-2015:

$$Q^{-1} = S_{11} / S_{12} = S_{21} / S_{22}, \qquad (4)$$

где S_{11}, S_{21} — усилия при нулевых деформациях; S_{21}, S_{22} — усилия при максимальных деформациях.

В данной статье в качестве экспериментального материала рассматриваются результаты испытания образцов — пластин габбро размерами 30×10×0,9 мм, закрепленных на концах при испытаниях по трехточечной схеме. Измерения проводятся на динамическом механическом анализаторе Q800 (DMA — Dynamic Mechanical Analysis). Прибор включает в себя высокоточный контроль нагрузки с использованием бесконтактного линейного двигателя, поддержку нагружающего элемента воздушными подшипниками, что практически исключает трение, и измерение смещения

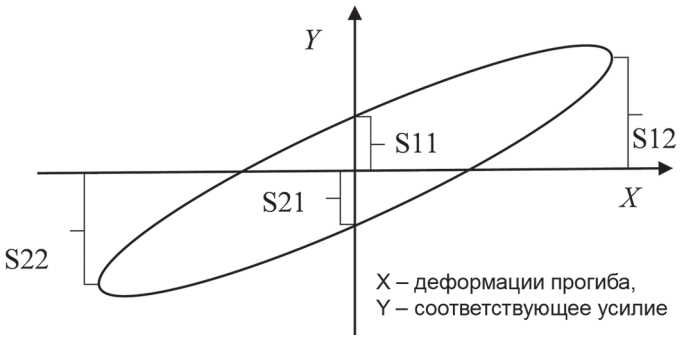

Рис. 1. Петля гистерезиса, построенная по результатам циклических испытаний образцов
Fig. 1. Hysteresis loop based on the results of cyclic testing of samples

оптическим кодером с высоким разрешением. Испытания проводились в диапазоне частот от 0,05 до 20 Гц при комнатной температуре и влажности.

Обработка результатов

Обработка результатов предусматривала подбор коэффициентов регрессионных зависимостей по методу наименьших квадратов и осуществлялась по специально разработанной программе в среде MathCAD. Низкочастотная часть зависимости модели Рэлея в обобщенной математической форме имеет вид

$$y(x) = \frac{a_1}{2\pi x}, \qquad (5)$$

где y — коэффициент потерь Q^{-1}; x — частота колебаний; a_1 — коэффициент модели Рэлея, характеризующие низкочастотную компоненту.

Результаты аппроксимации экспериментальных данных по формуле (5), приведенные для примера на рис. 2, демонстрируют существенное отличие частотной зависимости коэффициента потерь Q^{-1} от обратно пропорциональной зависимости Рэлея (3) для низкочастотной области. Обратная зависимость (см. рис. 2, линия *2*) в двойном логарифмическом масштабе имеет вид прямой. Кривая *1* экспериментальных данных имеет вид, отличный от прямой линии.

Физически этот факт можно интерпретировать тем, что кроме вязких потерь, которые описывает модель Рэлея, присутствуют также и другие виды потерь, в частности, вида «сухое трение». Поэтому были рассмотрены также и другие зависимости, учитывающие этот вид потерь в виде постоянной величины, слагаемой с функцией обратной зависимости.

Модель *1* представляет собой обратную зависимость в сумме с постоянной составляющей в области нижних частот, описываемую функцией

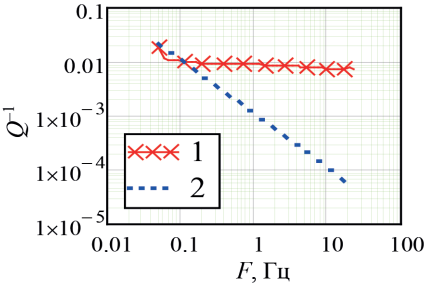

Рис. 2. Зависимости коэффициента потерь Q^{-1}: экспериментальная (1) и обратная пропорциональная (2)

Fig. 2. Dependences of the loss factor Q^{-1}: experimental (1) and inverse proportional (2)

$$y(x) = a_0 + \frac{a_1}{2\pi x}, \qquad (6)$$

где y — коэффициент потерь Q^{-1}; x — частота колебаний; a_0 — коэффициент, характеризующий постоянную составляющую; a_1 — коэффициент модели Рэлея, характеризующий низкочастотную составляющую вязкоупругих потерь;

Модель *2* — это полная рэлеевская модель с постоянной составляющей следующего вида:

$$y(x) = a_0 + \frac{a_1}{2\pi x} + a_2 2\pi x, \qquad (7)$$

где коэффициенты a_1 и a_2 являются соответствующими коэффициентами рэлеевской модели.

Результаты и их обработка

На рис. 3 представлены зависимости коэффициента потерь от частоты воздействия, полученные на четырех образцах, а также результаты аппроксимации по формулам (6) и (7).

Как показывают результаты таблицы, следует выбрать модель *1*, поскольку модель *2* хоть и дает более высокие значения коэффициента детерминации R^2, но коэффициент a_2 имеет отрицательные значения, что правомерно с точки зрения формальной математики, но противоречит физическому смыслу.

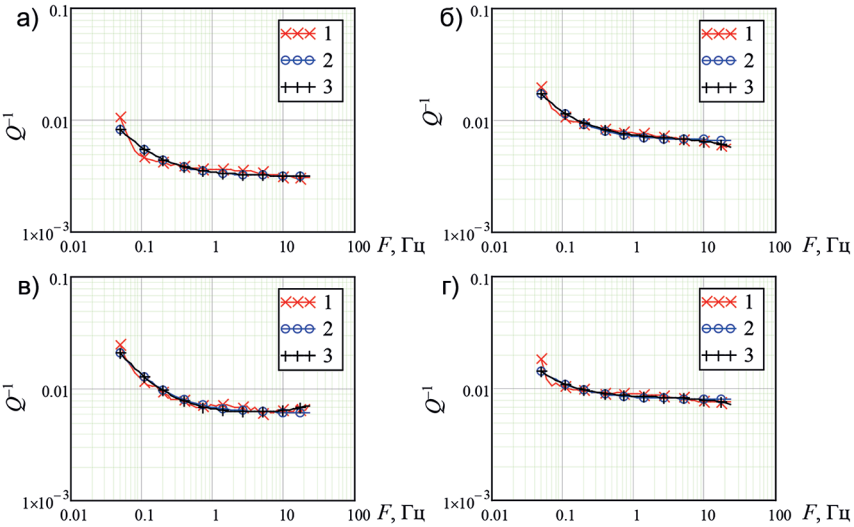

Рис. 3. Зависимости коэффициента потерь Q^{-1} от частоты для образцов GBR01 (а), GBR02 (б), GBR03 (в), GBR04 (г): 1 – экспериментальные; 2 – аппроксимированные функциями вида (6); 3 – аппроксимированные функциями вида (7)

Fig. 3. Dependences of the loss factor Q^{-1} on frequency for samples GBR01 (a), GBR02 (b), GBR03 (v), GBR04 (g) experimental (1) and approximated by functions of the form (6) (number 2 on the graphs) and (7) (number 3 on the graphs)

В модели *1* коэффициент a_1 представляет собой коэффициент α_{dM} рэлеевской модели (3). В таблице столбец с этими значениями выделен жирным шрифтом. Коэффициент a_0 физически может быть интерпретирован как составляющая коэффициента потерь, обусловленная сухим трением.

Обсуждение результатов

Анализ экспериментальных результатов

Полученные результаты позволяют сравнить между собой различные виды потерь. Сравнение вклада вязких потерь в общий баланс можно провести в зависимости от частоты по формуле

$$Q_в^{-1} = \frac{\alpha_{dM}}{2\pi f} = \frac{a_1}{2\pi f}. \qquad (8)$$

При допущении, что потери вида «сухое трение» не зависят от частоты и определяются коэффициентом a_0 в формуле (6), суммарные потери на частоте f составят

$$Q^{-1} = Q_в^{-1} + Q_c^{-1} = a_0 + \frac{a_1}{2\pi f}, \qquad (9)$$

Результаты аппроксимации частотных зависимостей коэффициента Q^{-1}
Results of approximating the frequency dependencies of the Q^{-1} coefficient

Образец	Модель 1, формула (6)		R^2	Модель 2, формула (7)			R^2
	a_0	a_1		a_0	a_1	a_2	
GBR01(5)	$6{,}667\cdot10^{-3}$	**$3{,}347\cdot10^{-3}$**	0,933	$6{,}935\cdot10^{-3}$	$3{,}191\cdot10^{-3}$	$-7{,}573\cdot10^{-3}$	0,942
GBR02(6)	$3{,}162\cdot10^{-3}$	**$1{,}616\cdot10^{-3}$**	0,863	$3{,}174\cdot10^{-3}$	$1{,}609\cdot10^{-3}$	$-3{,}602\cdot10^{-7}$	0,863
GBR03(7)	$6{,}100\cdot10^{-3}$	**$4{,}594\cdot10^{-3}$**	0,946	$5{,}800\cdot10^{-3}$	$4{,}769\cdot10^{-3}$	$8{,}45\cdot10^{-3}$	0,952
GBR04(11)	$8{,}063\cdot10^{-3}$	**$1{,}966\cdot10^{-3}$**	0,771	$8{,}321\cdot10^{-3}$	$1{,}816\cdot10^{-3}$	$-7{,}277\cdot10^{-3}$	0,791

где Q^{-1} — общие потери, $Q_в^{-1}$ — вязкие потери, $Q_с^{-1}$ — потери вида «сухое трение».

Относительная доля вязких потерь составит

$$\delta = \frac{Q_в^{-1}}{Q_в^{-1} + Q_с^{-1}}, \qquad (10)$$

где δ — относительная доля вязких потерь.

На рис. 4 представлены графики зависимостей относительной доли вязких потерь δ от частоты воздействий для исследованных образцов. На этих графиках для оценки доли вязких потерь проведены горизонтальные линии на уровне 0,5, превышение графиков над которыми означает большую долю вязких потерь. Частоты пересечений кривых с уровнем 0,5 дают значения 0,0893; 0,0912; 0,1370; 0,0433 Гц.

Как следует из этих графиков, граничная частота, ниже которой вязкие потери занимают большую часть, находится в диапазоне от 0,04 до 0,14 Гц. Изменение преобладающего вида потерь приводит к изменению фазовых соотношений между гармоническими нагрузкой и смещением. Смещения опережают нагрузку на частотах выше граничной частоты, а на частотах ниже — отстают от нее. Это приводит, в частности, к изменению ориентации эллипса.

Численное моделирование

Численное моделирование колебаний пластины проводилось в среде COMSOL Multiphysics. Схема закрепления и результаты расчета показаны на рис. 5. В расчетах модуль упругости пластины задавался равным 60 ГПа, коэффициент Пуассона 0,25, что соответствовало свойствам габбро. Коэффициенты рэлеевской модели (3) α_{dM} = 0,04 Гц, β_{dK} = 0. При задании граничных условий пластина жестко закреплялась на концах, а к средней части прикладывали гармонические перемещения с различными частотами в диапазоне от 0,01 до 20 Гц в направлении, перпендикулярном оси

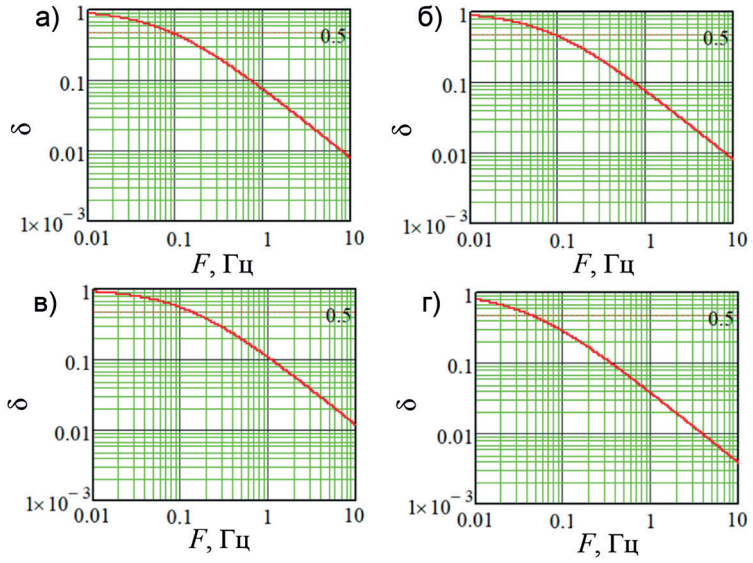

Рис. 4. Графики результатов расчета по формуле (9), иллюстрирующие долю вязких потерь в их общей совокупности для образцов 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

Fig. 4. Graphs of the calculation results based on formula (9), illustrating the share of viscous losses in their total amount for samples 1 (а), 2 (б), 3 (в), and 4 (г)

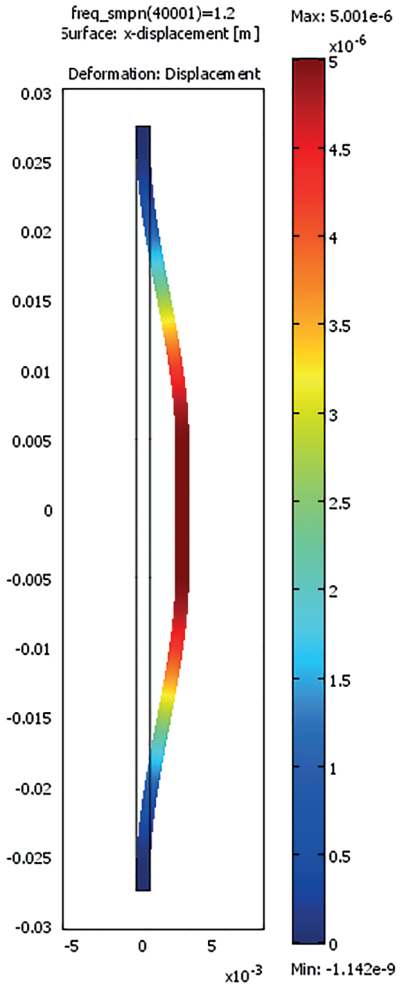

Рис. 5. Схема численной модели и яркостно-цветовая шкала горизонтальных смещений

Fig. 5. Numerical model diagram and brightness-color scale of horizontal displacements

пластины. Остальные части оставались свободными. В процессе моделирования рассчитывалась реакция пластины на деформации. При моделировании не ставилась задача получения абсолютных результатов, поэтому все результаты получены в условных единицах. Основной целью было установление закономерностей регистрируемых колебаний, в частности, связанных с изменением доли вязкоупругих потерь в общем их балансе, и подтверждение гипотезы об изменении характера колебаний при их превышении над потерями вида «сухое трение».

На рис. 6 показаны положения гистерезисного эллипса при преобладании потерь вида «сухое трение» (рис. 6, *а*), вязкого трения (рис. 6, *б*), а также средней части эллипса, по которой определялись параметры S_{11} и S_{21} формулы (1). На этом рисунке z — смещения центра образца относительно его оси; q — силовая реакция образца на смещения.

Результаты моделирования подтверждают гипотезу об изменении характера вибраций образца и изменении наклона гистерезисного эллипса при увеличении доли вязких потерь выше доли потерь вида «сухое трение».

Выводы

Эксперименты на образцах — пластинах габбро при их циклическом деформировании при изгибе по трехто-

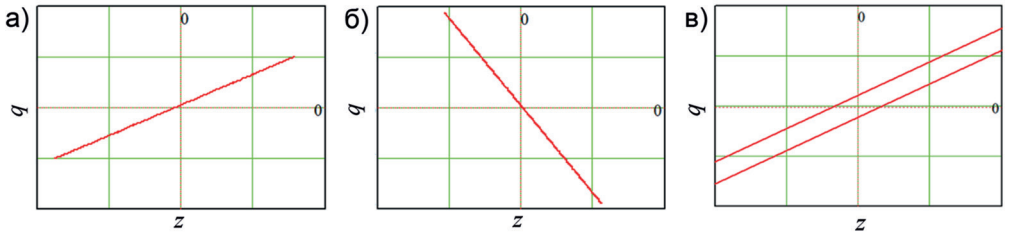

Рис. 6. Иллюстративные графики наклонов гистерезисных петлей при частотах воздействия 1, 10, 20 Гц (а), 0,1 и 0,01 Гц (б), а также средняя часть петли гистерезиса в увеличенном виде (в)

Fig. 6. Illustrative graphs of the slopes of hysteresis loops at exposure frequencies of 1, 10, 20 Hz (a), 0.1 and 0.01 Hz (b), as well as the middle part of the hysteresis loop in enlarged form (v)

чечной схеме на частотах 0,05 — 20 Гц показали ряд характерных особенностей механических потерь для этого диапазона.

Изменение внутренних механических потерь в горных породах в инфразвуковом диапазоне циклических воздействий может быть описано суммой обратно пропорциональной функции, характеризующей вязкие потери, и постоянной величиной для вида «сухое трение».

Для исследованного диапазона частот установленная закономерность в части вязких потерь соответствует рэлеевской модели, описывающей их увеличение при уменьшении частоты воздействий.

Экспериментально и расчетным путем установлено наличие характерной частоты изменения преобладающего механизма потерь, находящейся в зависимости от конкретного образца в диапазоне от 0,04 до 0,14 Гц. Переход из одного диапазона частот в другой сопровождается изменением ориентации гистерезисного эллипса, что обусловлено физикой процессов. В области верхних частот исследованного диапазона преобладает механизм вида «сухое трение». В области нижних частот преобладают вязкие потери и эллипс меняет ориентацию. Численное моделирование методом конечных элементов подтвердило эту гипотезу.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н., профессору С.Д. Калошкину за помощь в организации экспериментальных исследований и ценные советы по их проведению, П.И. Дубинину за подготовку образцов горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Салюков В. С.*, *Куткин Я. О.*, *Вознесенский А. С.* Метод экспериментального определения коэффициента затухания в образцах горных пород различных типов и генезиса // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2025. — № 3. — С. 15 — 24. DOI: 10.15372/ftprpi20250302.

2. *Сагомонова В. А.*, *Кислякова В. И.*, *Тюменева Т. Ю.*, *Большаков В. А.* Влияние состава вибропоглощающих материалов на коэффициент механических потерь // Труды ВИАМ. — 2015. — № 10. — С. 63 — 69.

3. *Копченков В. Г.* Метод оценки потерь энергии в эластомерах в условиях контактно-динамического нагружения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2011. — Т. 13. — № 4(3). — С. 1077 — 1079.

4. *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.

5. *Del Río L., Nó M. L., Sota A., Perez Casero I., Gómez Cortés J. F., Pérez Cerrato M., Veiga A., Ruiz Larrea I., Ausejo S., Burgos N., San Juan J. M.* Internal friction associated with ε martensite in shape memory steels produced by casting route and through additive manufacturing: influence of thermal cycling on the martensitic transformation // Journal of Alloys and Compounds. 2022, vol. 919, article 165806. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.165806.

6. *Gavriljuk V. G.*, *Häänninen H., Smouk S. Y. U., Tarasenko A. V., Ullakko K.* Internal friction in hydrogen charged CrNi and CrNiMn austenitic stainless steels // Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. 1996, vol. 27, no. 7, pp. 1815 — 1821. DOI: 10.1007/BF02651931.

7. *Li Z., Li K., Qian C., Ji W., Cai Z., Liu Q.* Mechanism of austenite mechanical stability enhancement in Cr_4Mo_4V bearing steel via pulsed magnetic field treatment: insights from internal friction behavior // Journal of Materials Science. 2025, vol. 60, no. 31, article 13556. DOI: 10.1007/s10853-025-11165-1.

8. *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.

9. *Müller T. M., Gurevich B., Lebedev M.* Seismic wave attenuation and dispersion resulting from wave induced flow in porous rocks — A review // Geophysics. 2010, vol. 75, no. 5, pp. A147—A164. DOI: 10.1190/1.3463417.

10. *Li T., Pei X., Wang D., Huang R., Tang H.* Nonlinear behavior and damage model for fractured rock under cyclic loading based on energy dissipation principle // Engineering Fracture Mechanics. 2019, vol. 206, pp. 330—341. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.12.010.

11. *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.

12. *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.

13. *Song S., Ren T., Dou L., Sun J., Yang X., Tan L.* Fracture features of brittle coal under uniaxial and cyclic compression loads // International Journal of Coal Science and Technology. 2023, vol. 10, no. 1, pp. 9—22. DOI: 10.1007/s40789 023 00564 x.

14. *Pang S., Stovas A., Xing H.* Frequency dependent anisotropy in partially saturated porous rock with multiple sets of mesoscale fractures // Geophysical Journal International. 2021, vol. 227, no. 1, pp. 147—161. DOI: 10.1093/gji/ggab204.

15. *Ran Q., Liang Y., Zou Q., Chen Z., Zhan J., Chen L., Wu Z., Ma T.* Failure mechanisms of sandstone subjected to cyclic loading considering stress amplitude effects // International Journal of Coal Science and Technology. 2025, vol. 12, no. 68. DOI: 10.1007/s40789-025-00802-4.

16. *Ahmadi Naghadeh R., Liu T., Vinck K., Jardine R. J., Kontoe S., Byrne B. W., McAdam R. A.* A laboratory characterisation of the response of intact chalk to cyclic loading // Geotechnique. 2022, vol. 74, no. 6, pp. 527—539. DOI: 10.1680/jgeot.21.00198.

17. *Bouchaala F., Ali M. Y., Matsushima J., Jouini M. S., Mohamed A. A. I., Nizamudin S.* Experimental study of seismic wave attenuation in carbonate rocks // SPE Journal. 2024, vol. 29, no. 4, pp. 1933—1947. DOI: 10.2118/218406 PA.

18. *Yuan W., Dong W., Zhang B., Huo J.* Viscoelasticity induced fracture behavior of rock concrete interface after sustaining creep process // Cement and Concrete Composites. 2023, vol. 136, article 104901. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104901.

19. *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.

20. *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.

21. *Hou W., Ma D., Li Q., Zhang J., Liu Y., Zhou C.* Mechanical and hydraulic properties of fault rocks under multi stage cyclic loading and unloading // International Journal of Coal Science and Technology. 2023, vol. 10, no. 54. DOI: 10.1007/s40789-023-00618-0.

22. *Zou Q., Ning Y., Zhang B., Tian S., Jiang Z., An Y.* Mechanical properties and failure characteristics of sandstone under ramp loading paths // Geomechanics and Geophysics for Geo Energy and Geo Resources. 2023, vol. 9, no. 1. DOI: 10.1007/s40948-023-00574-8.

23. *Huang F., Mi J. L., Yang Y. H., Dong G. F., Zhang B., Liu X. C.* Morphological characteristics of hysteretic curves of soil rock mixture under stepped axial cyclic loading // Rock and Soil Mechanics. 2024, vol. 45, no. 3, pp. 674—684. DOI: 10.16285/j.rsm.2023.1063.

24. *Delle Piane C., Sarout J., Madonna C., Saenger E. H., Dewhurst D. N., Raven M.* Frequency dependent seismic attenuation in shales: Experimental results and theoretical analysis // Geophysical Journal International. 2014, vol. 198, pp. 504—515. DOI: 10.1093/gji/ggu148.

25. *Коган С. Я.* Сейсмическая энергия и методы ее определения. — М.: Наука, 1975. — 152 с.

26. *Rayleigh B.* The theory of sound, vol. 2. Reprinted: Dover, New York, 1945, 528 p. ГИАБ

REFERENCES

1. Salukov V. S., Kutkin Ya. O., Voznesensky A. S. A method for experimental determination of the attenuation coefficient in rock samples of various types and genesis. *Journal of Mining Sciences*. 2025, no. 3, pp. 15—24. [In Russ]. DOI: 10.15372/ftprpi20250302.

2. Sagomonova V. A., Kislyakova V. I., Tyumeneva T. Yu., Bolshakov V. A. Influence of the composition of vibration absorbing materials on the mechanical loss factor. *Proceedings of VIAM*. 2015, no. 10, pp. 63—69. [In Russ].

3. Kopchenkov V. G. A method for assessing energy losses in elastomers under contact dynamic loading conditions. *Izvestia of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2011, vol. 13, no. 4(3), pp. 1077—1079. [In Russ].

4. 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.

5. Del Río L., Nó M. L., Sota A., Perez Casero I., Gómez Cortés J. F., Pérez Cerrato M., Veiga A., Ruiz Larrea I., Ausejo S., Burgos N., San Juan J. M. Internal friction associated with ε martensite in shape memory steels produced by casting route and through additive manufacturing: influence of thermal cycling on the martensitic transformation. J*ournal of Alloys and Compounds*. 2022, vol. 919, article 165806. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.165806.

6. Gavriljuk V. G., Haänninen H., Smouk S. Y. U., Tarasenko A. V., Ullakko K. Internal friction in hydrogen charged CrNi and CrNiMn austenitic stainless steels. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 1996, vol. 27, no. 7, pp. 1815—1821. DOI: 10.1007/BF02651931.

7. Li Z., Li K., Qian C., Ji W., Cai Z., Liu Q. Mechanism of austenite mechanical stability enhancement in Cr4Mo4V bearing steel via pulsed magnetic field treatment: insights from internal friction behavior. *Journal of Materials Science*. 2025, vol. 60, no. 31, article 13556. DOI: 10.1007/s10853-025-11165-1.

8. 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.

9. Müller T. M., Gurevich B., Lebedev M. Seismic wave attenuation and dispersion resulting from wave induced flow in porous rocks — A review. *Geophysics*. 2010, vol. 75, no. 5, pp. A147—A164. DOI: 10.1190/1.3463417.

10. Li T., Pei X., Wang D., Huang R., Tang H. Nonlinear behavior and damage model for fractured rock under cyclic loading based on energy dissipation principle. *Engineering Fracture Mechanics*. 2019, vol. 206, pp. 330—341. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.12.010.

11. Zvereva A. S., Sobisevich A. L., Gabsatarova I. P. The quality factor of the geophysical medium in the eastern zone of the North Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2024, no. 1, pp. 1—17. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0002333724010091.

12. Lebedev A. V., Ostrovsky L. A., Sutin A. M., Soustova I. A., Johnson P. A. Resonance acoustic spectroscopy at low quality factors. *Acoustical Physics*. 2003, vol. 49, no. 1, pp. 81—87. [In Russ].

13. Song S., Ren T., Dou L., Sun J., Yang X., Tan L. Fracture features of brittle coal under uniaxial and cyclic compression loads. *International Journal of Coal Science and Technology*. 2023, vol. 10, no. 1, pp. 9—22. DOI: 10.1007/s40789 023 00564 x.

14. Pang S., Stovas A., Xing H. Frequency dependent anisotropy in partially saturated porous rock with multiple sets of mesoscale fractures. *Geophysical Journal International*. 2021, vol. 227, no. 1, pp. 147—161. DOI: 10.1093/gji/ggab204.

15. Ran Q., Liang Y., Zou Q., Chen Z., Zhan J., Chen L., Wu Z., Ma T. Failure mechanisms of sandstone subjected to cyclic loading considering stress amplitude effects. *International Journal of Coal Science and Technology*. 2025, vol. 12, no. 68. DOI: 10.1007/s40789-025-00802-4.

16. Ahmadi Naghadeh R., Liu T., Vinck K., Jardine R. J., Kontoe S., Byrne B. W., McAdam R. A. A laboratory characterisation of the response of intact chalk to cyclic loading. *Geotechnique*. 2022, vol. 74, no. 6, pp. 527—539. DOI: 10.1680/jgeot.21.00198.

17. Bouchaala F., Ali M. Y., Matsushima J., Jouini M. S., Mohamed A. A. I., Nizamudin S. Experimental study of seismic wave attenuation in carbonate rocks. *SPE Journal*. 2024, vol. 29, no. 4, pp. 1933—1947. DOI: 10.2118/218406 PA.

18. Yuan W., Dong W., Zhang B., Huo J. Viscoelasticity induced fracture behavior of rock concrete interface after sustaining creep process. *Cement and Concrete Composites*. 2023, vol. 136, article 104901. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104901.

19. Petrushin G. D., Petrushina A. G. Determination of the area of the 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.

20. Mashinskii E. I. Amplitude dependent hysteresis of wave velocity in rocks in a 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.

21. Hou W., Ma D., Li Q., Zhang J., Liu Y., Zhou C. Mechanical and hydraulic properties of fault rocks under multi stage cyclic loading and unloading. *International Journal of Coal Science and Technology*. 2023, vol. 10, no. 54. DOI: 10.1007/s40789-023-00618-0.

22. Zou Q., Ning Y., Zhang B., Tian S., Jiang Z., An Y. Mechanical properties and failure characteristics of sandstone under ramp loading paths. *Geomechanics and Geophysics for Geo Energy and Geo Resources*. 2023, vol. 9, no. 1. DOI: 10.1007/s40948-023-00574-8.

23. Huang F., Mi J. L., Yang Y. H., Dong G. F., Zhang B., Liu X. C. Morphological characteristics of hysteretic curves of soil rock mixture under stepped axial cyclic loading. *Rock and Soil Mechanics*. 2024, vol. 45, no. 3, pp. 674—684. DOI: 10.16285/j.rsm.2023.1063.

24. Delle Piane C., Sarout J., Madonna C., Saenger E. H., Dewhurst D. N., Raven M. Frequency dependent seismic attenuation in shales: Experimental results and theoretical analysis. *Geophysical Journal International*. 2014, vol. 198, pp. 504—515. DOI: 10.1093/gji/ggu148.

25. Kogan S. Ya. *Seysmicheskaya energiya i metody ee opredeleniya* [Seismic energy and methods for its determination], Moscow, Nauka, 1975, 152 p.

26. Rayleigh B. *The theory of sound*, vol. 2. Reprinted: Dover, New York, 1945, 528 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вознесенский Александр Сергеевич[1] — д-р техн. наук,
профессор, профессор, e-mail: asvoznesenskii@misis.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0926-1808,
Задорожный Михаил Юрьевич[1] — канд. техн. наук,
научный сотрудник, e-mail: zadorozhnyy.m.yu@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-8776-0595,
Салюков Владислав Сергеевич[1] — аспирант,
e-mail: m1605021@edu.misis.ru,
ORCID ID: 0009-0003-0343-7056,
Куткин Ярослав Олегович[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: kutkin.yo@misis.ru, ORCID ID: 0000-0003-2644-3371,
[1] НИТУ МИСИС.
Для контактов: Вознесенский А.С., e-mail: asvoznesenskii@misis.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.S. Voznesenskii[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor, e-mail: asvoznesenskii@misis.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0926-1808,
M.Yu. Zadorozhnyy[1], Cand. Sci. (Eng.),
Researcher, e-mail: zadorozhnyy.m.yu@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-8776-0595,
V.S. Salyukov[1], Graduate Student, e-mail: m1605021@edu.misis.ru,
ORCID ID: 0009-0003-0343-7056,
Ya.O. Kutkin[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: kutkin.yo@misis.ru, ORCID ID: 0000-0003-2644-3371,
[1] NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia.
Corresponding author: A.S. Voznesenskii, e-mail: asvoznesenskii@misis.ru.

Получена редакцией 10.01.2026; получена после рецензии 18.02.2026; принята к печати 10.03.2026.
Received by the editors 10.01.2026; received after the review 18.02.2026; accepted for printing 10.03.2026.