

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет
«МИСИС»

На правах рукописи

Салюков Владислав Сергеевич

Изучение закономерностей изменения внутренних механических потерь
в горных породах при механических воздействиях
инфразвукового диапазона частот

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности

2.8.6 Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и
горная теплофизика

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор
А. С. Вознесенский

Москва, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕРМИНЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	4
ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ В ОБЛАСТИ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ВНУТРЕННИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ МАТЕРИАЛОВ, ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	11
1.1 Практический и научный контекст	11
1.2 Современное состояние в области исследований внутренних механических потерь в материалах.....	13
1.2.1 Методы исследования ВМП	13
1.2.2 Рэлеевская модель потерь	14
1.2.3 Практические результаты по исследованию ВМП в горных породах	14
1.2.4 Диапазоны частот исследования ВМП в горных породах и их массивах	18
1.3 Цели и задачи исследования	20
1.4 Выводы по главе 1	21
ГЛАВА 2 МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ	23
2.1 Теоретическое обоснование методики измерений	23
2.2 Экспериментальные установки, образцы и режимы испытаний	24
2.2.1 Методика испытаний образцов-балок	24
2.2.2 Методика испытаний образцов-пластин	31
2.3. Моделирование.....	32
2.3.1 Моделирование циклического деформирования образцов балок горных пород	32
2.3.2 Моделирование циклического деформирования образца пластины габбро	34
2.4 Выводы по главе 2.....	35

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПОТЕРЬ ОБРАЗЦОВ-БАЛОК ОСАДОЧНЫХ, МЕТАМОРФИЧЕСКИХ И ИЗВЕРЖЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД	37
3.1 Осадочные породы	37
3.2 Метаморфические породы	48
3.3 Изверженные породы.....	54
3.4 Сравнение экспериментальных результатов с результатами моделирования.....	60
3.5 Выводы по главе 3	65
ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПОТЕРЬ ОБРАЗЦОВ-ПЛАСТИН ГАББРО	66
4.1 Порядок испытаний и обработки результатов	66
4.2 Результаты обработки экспериментальных данных и их особенности.	67
4.3 Влияние преобладающего вида потерь на ориентацию гистерезисной петли	72
4.4 Выводы по главе 4.....	74
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	75
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	77

ТЕРМИНЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Геомеханика (механика горных пород) [1]: научная дисциплина, изучающая напряженно-деформированное состояние массива горных пород при разработке месторождений полезных ископаемых и проведения выработок различного назначения и физико-механических свойств горных пород. Механикой горных пород широко используются методы механики сплошной среды.

Акустические свойства горной породы [1]: свойства, проявляющиеся при прохождении через породу упругих колебаний: инфразвуковых, звуковых и ультразвуковых волн.

Скорость звука; скорость распространения ультразвуковой волны: фазовая или групповая скорость акустической волны в недисперсионном (однородном) материале в направлении распространения [2].

Кинематический параметр (сейсмической волны) [3]: величина, характеризующая время или скорость распространения сейсмической волны.

Время пробега (сейсмической волны) [3]: время распространения сейсмической волны между двумя точками геологической среды.

Скорость (сейсмической волны) [3]: величина, равная отношению расстояния между двумя точками геологической среды к времени пробега сейсмической волны между этими точками.

Затухание сейсмической волны [3]: уменьшение амплитуды сейсмической волны ко времени при ее распространении в геологической среде.

Поглощение сейсмической волны [3]: превращение энергии деформации при распространении сейсмической волны в геологической среде в тепловую энергию.

Коэффициент затухания (сейсмической волны) [3]: величина, характеризующая изменение амплитуды сейсмической волны при ее распространении на единицу расстояния в геологической среде.

Коэффициент демпфирования Системы с критическим демпфированием имеют коэффициент демпфирования, равный 1.

Комплексный модуль M^* , Па (complex modulus) [4]: отношение динамического напряжения к динамической деформации вязкоупругого материала, который подвергают воздействию синусоидальных колебаний.

Модуль упругости M' , Па (storage modulus) [4]: действительная часть комплексного модуля упругости M^* . Примечание. Модуль упругости пропорционален максимальной энергии, запасенной во время цикла нагружения, и является мерой жесткости вязкоупругого материала.

Модуль потерь M'' , Па (loss modulus) [4]: мнимая часть комплексного модуля M^* . Примечание. Модуль потерь пропорционален энергии, которая рассеивается (теряется) во время цикла нагружения.

Тангенс угла механических потерь, коэффициент механических потерь $\tan \delta$ (loss factor) [4]: отношение модуля потерь к модулю упругости, вычисляемое по формуле: $\tan \delta = M''/M'$. Обозначается также, как Q^{-1} .

Добротность Q [5]: Добротность равна отношению собственной частоты $f = 1/T$ колебательной системы к ширине полосы пропускания $\Delta f = f_v - f_n$, т. е. частотной полосы, на границах которой энергия системы вдвое меньше энергии на собственной частоте:

$$Q = f/\Delta f = f/(f_v - f_n),$$

где f_n и f_v — нижняя и верхняя границы полосы пропускания, определяемые по нормированному спектру мощности, соответственно. Примечание. Поскольку мощность определяется квадратом амплитуды колебаний, то для амплитуд колебаний частоты f_v и f_n определяются на уровне $1/\sqrt{2}$ от максимального значения при собственной частоте колебательной системы.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации следует из необходимости разработки новых и совершенствования существующих способов и средств определения внутренних механических потерь (ВМП) в горных породах в инфразвуковом диапазоне частот.

ВМП горных пород являются одним из объектов изучения геомеханики и ключевым фактором поведения пород под нагрузкой. Они имеют прикладное значение для горного дела, строительства и сейсмологии. В горных породах источниками упругих волн, при которых проявляются ВМП, могут быть землетрясения, горные удары, сдвигения по разломам массивов, взрывные работы, влияние различных вибрационных механизмов. Величина ВМП оценивается либо добротностью Q , либо коэффициентом потерь Q^{-1} (обратной добротностью), которые характеризуют переход части механической энергии в тепловую при упругих колебаниях. Для моделирования частотной зависимости вязкоупругих потерь часто используется рэлеевская модель, содержащая сумму прямой и обратной зависимостей ВМП от частоты со своими коэффициентами. Следует отметить, что значительное число исследований ВМП в горных породах проводятся в диапазонах сравнительно высоких частот (1 Гц–30 кГц и выше). В то же время, в ряде источников упоминаются и более низкие частоты, при которых ВМП исследованы недостаточно. Такие частоты могут возникать при взрывных работах, колебаниях зданий и подземных сооружений в сейсмоопасных зонах, мачт ветровых энергетических установок, явлениях stick-slip в разломах массивов пород, от ударов волн океана о скалы и в других аналогичных объектах. Таким образом, можно сделать вывод об актуальности исследования ВМП в горных породах в инфразвуковых областях ниже 1 Гц.

Данная работа посвящена экспериментальному установлению зависимостей изменения ВМП от частоты воздействия в горных породах различного типа в инфразвуковом диапазоне частот.

Материалом для данной диссертационной работы послужили результаты, полученные автором при выполнении исследований в рамках грантов Российского научного фонда (РНФ): № 24-27-00103 «Внутренние механические потери в горных породах и закономерности их изменения при физических воздействиях различной длительности, частоты и интенсивности».

Целью данной работы является установление особенностей взаимосвязей между частотой воздействий и коэффициентом внутренних механических потерь на частотах ниже 0.1 Гц для горных пород различных генотипов.

Для достижения указанной цели в работе решались **следующие задачи**:

- 1) обоснование и разработка аппаратного и методического обеспечения для испытаний образцов горных пород при различных режимах циклического деформирования при изгибе в области инфразвуковых частот;
- 2) установление зависимостей изменения коэффициента потерь осадочных, метаморфических и изверженных пород от частоты при циклических механических изгибных деформациях в области инфразвуковых частот;
- 3) аппроксимация экспериментально полученных зависимостей коэффициента потерь от частоты и установление на этой основе закономерностей изменения потерь при изгибе образцов в области инфразвуковых частот;
- 4) установление видов потерь в горных породах, закономерностей изменения преобладающих потерь в зависимости от частоты воздействия и особенностей физических механизмов деформирования в этих условиях.

Идея работы

Основная идея работы состоит в использовании параметров гистерезисных петель в координатах деформация-нагрузка при циклических механических деформациях в области инфразвуковых частот для оценки частотных зависимостей коэффициента потерь.

Методы исследований предусматривали комплексный подход к решению поставленных задач и включали: анализ современного состояния исследований в рассматриваемой области; лабораторные экспериментальные исследования образцов горных пород, предусматривающие задание различных видов, схем и режимов деформирования; обработку результатов испытаний и статистическую оценку с использованием современного программного обеспечения, а также специально написанных компьютерных программ; проведение численных экспериментов для интерпретации полученных результатов и обоснования физических механизмов установленных закономерностей.

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Результаты испытаний образцов-балок горных пород различного генезиса при изгибе по трехточечной схеме в диапазоне частот 0,0024–0,104 Гц показали неудовлетворительный характер аппроксимации экспериментальных частотных зависимостей коэффициента потерь Q^{-1} рэлеевской моделью, что свидетельствует о наличии механических потерь других видов.

2. Установлено, что изменение внутренних механических потерь в горных породах в диапазоне циклических деформаций частотой ниже 1 Гц может быть представлено суммой обратно пропорциональной функции, характеризующей упруго-вязкие потери, и постоянной величины, описывающей потери вида «сухое трение», при этом полученная закономерность в части упруго-вязких потерь соответствует рэлеевской модели, описывающей их увеличение при уменьшении частоты воздействий.

3. Для исследованных типов горных пород 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», в области нижних частот преобладают вязкие потери.

Обоснованность и достоверность выдвинутых положений и выводов обеспечена:

- использованием экспериментальных установок, обеспечивающих минимизацию погрешностей измерения коэффициента потерь в соответствии с общепринятыми международными рекомендациями;
- корректным использованием хорошо зарекомендовавших себя методов статистической обработки и программного обеспечения для их реализации;
- удовлетворительным совпадением результатов, полученных на различных экспериментальных установках при разных размерах и режимах испытаний образцов горных пород различных генотипов;
- удовлетворительным соответствием друг другу экспериментальных и модельных результатов.

Научное значение работы состоит в установлении закономерностей изменения коэффициента потерь при циклических механических воздействиях в области инфразвуковых частот, установлении преобладающих видов потерь и оценке применимости в этом диапазоне рэлеевской модели для горных пород различных генотипов.

Практическая значимость определяется использованием полученных значений коэффициентов потерь для горных пород различных генотипов при расчетах, планировании и проведении взрывных работ на горных предприятиях, проектировании зданий и подземных сооружений, сейсмическом мониторинге, а также разработкой методических рекомендаций по определению коэффициентов потерь горных пород в области инфразвуковых частот, принятой к использованию в «ГоИ КНЦ РАН».

Личный вклад автора. Постановка цели и задачи; обзор литературных источников; обоснование методик, подготовка и проведение экспериментов; обработка результатов экспериментов, формулировка научных положений,

выводов рекомендаций, участие в разработке «Методических рекомендаций по оценке коэффициента потерь в горных породах различного генезиса при изгибе образца балки по трехточечной схеме».

Апробация работы. Основные научные положения, выводы и рекомендации по результатам диссертационной работы были представлены на следующих конференциях и научно-практических семинарах: Международный научный симпозиум «Неделя Горняка 2024»; 16-я Международная научная школа молодых ученых и специалистов, ИПКОН РАН, Москва, 2023; XXVI международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», ИФЗ РАН, Москва, 2025.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 работ, в том числе 3 – в изданиях рекомендованных ВАК Минобрнауки России и в изданиях, индексируемых в наукометрических базах Web of Science и Scopus.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, изложенных на 104 страницах машинописного текста, включает 54 рисунка, 18 таблиц, список источников из 93 наименований, 2 приложения (включая 9 рисунков и 1 таблицу).

Благодарности. Автор благодарит научного руководителя, докт. техн. наук, проф. А. С. Вознесенского, канд. техн. наук Я. О. Куткина, канд. техн. наук П. И. Дубинина, докт.ф.-м.наук., проф. С. Д. Калошкина, коллектив кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля НИТУ МИСИС за неоценимую помощь при подготовке и проведении исследований, а также за консультационную и моральную поддержку при написании работы.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ В ОБЛАСТИ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ВНУТРЕННИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ МАТЕРИАЛОВ, ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Практический и научный контекст

Согласно [1] геомеханика (механика горных пород) – научная дисциплина, изучающая напряженно-деформированное состояние массива горных пород при разработке месторождений полезных ископаемых и проведения выработок различного назначения и физико-механических свойств горных пород. Механикой горных пород широко используются методы механики сплошной среды.

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 [6, 7]. Наряду с упругими свойствами, скоростями продольных и поперечных волн, прочностью они исследуются в материаловедении, неразрушающем контроле и диагностике технических объектов, сейсмостойком строительстве (ГОСТР ИСО 10137–2016). ВМП учитываются при анализе распространения сейсмических волн при взрывной добыче полезных ископаемых и сейсморазведке, воздействии землетрясений и горных ударов на наземные и подземные сооружения, транспортные магистрали, тоннели, метрополитены [8].

ВМП изучаются в металлических материалах [9, 10, 11], в работах [12, 13, 14] рассматривается влияние различных температур и режимов их изменения на ВМП сплавов, а [15] показано, как ВМП стали изменяются под воздействием импульсного магнитного поля. Исследования ВМП проводятся также для композитов [16, 17], геополимеров [18] и других материалов [19]. В работах [20, 21] проводятся исследования ВМП композита QE22, в том числе при

механическом циклическом изгибе. В [22] описано исследование демпфирующих свойств при защите радиоаппаратуры от вибраций. Особенности демпфирования и способы увеличения демпфирующей способности конструкций и механических соединительных элементов с применением болтовых и клепанных элементов показаны в [23]. В [24] показано, что эффективный угол внутреннего трения балласта железнодорожной насыпи уменьшается в ходе эксплуатации.

Отечественные ученые исследуют внутренние механические потери в горных породах, так В. М. Меркулова и др. применяет для этого резонансный метод [25, 26], а А. В. Лебедев в работах [27, 28] исследует внутренние механические потери при помощи метода резонансно акустической спектроскопии.

В горном деле и геофизике ВМП исследуются в горных породах и их массивах [29, 30], в работах [31, 32] показано их влияние при расчёте параметров горны выработок. В [33] проведено исследование коэффициента внутренних механических потерь образцов пород, добытых в ходе лунных миссий «Апполон». Источниками упругих волн, при которых проявляются ВМП, могут быть землетрясения [34], горные удары [35], сдвигения по разломам [36], явления stick-slip [37, 38], взрывные работы [39], работа различных механизмов [40]. В этой связи, в частности, известны работы А. Л. Собисевича [41], А. А. Добрыниной [42, 43] и др. по исследованию добротности горных пород при оценке сейсмического действия землетрясений. В [44] показано, что зависимости осевой деформации образцов каменной соли при циклических нагрузках на основе точек максимальной нагрузки демонстрируют схожий характер с такими зависимостями при статической нагрузке. Однако осадка поверхности и закрытие трещин смоделированных с использованием параметров, полученных по результатам циклических испытаний примерно на 40% превышают соответствующие показатели, полученные при статических испытаниях.

Таким образом, ВМП проявляют себя при периодических, циклических, вибрационных, акустических воздействиях частот широкого диапазона на

различные объекты, и должны учитываться при их проектировании и эксплуатации. Все это говорит об актуальности темы диссертации.

1.2 Современное состояние в области исследований внутренних механических потерь в материалах

1.2.1 Методы исследования ВМП

Исследования коэффициента потерь проводятся с помощью механических воздействий [45, 46] при различных видах нагружения: сжатии-растяжении [47], изгибе [48], кручении [49], а также при различных температурах [50, 51]. ВМП в материалах исследуются посредством свободного затухания колебаний, вынужденных колебаний, резонансных колебаний, рассеивания энергии за цикл колебаний при квазистатическом нагружении [52]. Методы оценки коэффициента потерь при механических воздействиях на полимерные материалы приведены в ГОСТ Р 56801-2015 [4]. Под действием ВМП материалы, подвергнутые циклическим нагрузкам, поглощают и рассеивают энергию, при этом на диаграмме напряжения-деформации возникает петля механического гистерезиса [53, 54], площадь которой характеризует энергию, затраченную на деформирование [55]. В [56] описаны некоторые модели и особенности моделирования ВМП. В программном пакете ANSYS [57] подробно описаны механизмы демпфирования вибраций, основанные на ВМП. К ним, в частности, относятся вязкое, кулоновское (другие названия: фрикционное, типа «сухое трение»), гистерезисное демпфирование. Соответствующие численные модели используют целый набор математических соотношений и входящих в них коэффициентов. Для моделирования частотной зависимости используется рэлеевская модель, описывающая вязкоупругие потери, как одну из составляющих ВМП. В нее заложены коэффициенты, описывающие прямую и обратную зависимости механических потерь от частоты [58].

1.2.2 Рэлеевская модель механических потерь

Данная модель механических потерь названа именем Рэля, так как он был основоположником систематического изучения вязкости, как физического свойства веществ [59] и первый представил математическую запись фундаментального закона. Модель вязкого трения предполагает, что сила трения линейно пропорциональна скорости перемещения. В дальнейшем данный вопрос совершенствовался многими исследователями, в особенности в связи с развитием методов численного эксперимента и метода конечных элементов. Поскольку этот вопрос важен для дальнейшего изложения, уделим ему отдельное внимание. Одно из обоснований вида рэлеевской функции потерь представлено в [60], что вкратце изложено ниже.

Функция диссипации Рэля имеет следующий вид:

$$R(t) = \frac{1}{2} \iiint_V \mu \dot{u}^2(x, y, z, t) dv + \frac{1}{2} \sum_i C_i \dot{u}^2(x, y, z, t) \quad (1.1)$$

где μ – коэффициент диссипации, C_i – дискретные коэффициенты, $u(x, y, z, t)$ – функция смещения в зависимости от координат и времени, для которой доступна дискретизация методом конечных элементов, позволяющая получить набор дискретизированных дифференциальных уравнений второго порядка, выведенных с помощью вариационного принципа. Уравнение движения линейной динамической системы можно записать в следующем виде:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\}, \quad (1.2)$$

где $[M]$, $[C]$ и $[K]$ – матрицы массы, коэффициентов вязкого трения и жесткости, а $\{x\}$ и $\{F\}$ – векторы перемещения и силы соответственно.

Для гистерезисного демпфирования член демпфирования $[C]\{\dot{x}\}$ заменяется на $i[H]\{x\}$. Соответствующее уравнение имеет вид:

$$[M]\{\ddot{x}\} + ([K] + i[H])\{x\} = \{F\}, \quad (1.3)$$

Это уравнение не относится к области действительных чисел. Оно предполагает, что сила демпфирования пропорциональна смещению, а не скорости, и сдвинута по фазе на 90° относительно смещения.

Соответственно, для гармонических колебаний эквивалентная сила демпфирования в частотной области может быть записана в виде:

$$i[H]\{x\} = \omega^{-1}[H]\{\dot{x}\}, \quad \{\dot{x}\} = i\omega\{x\}, \quad (1.4)$$

Здесь $\omega = 2\pi f$, где f – частота колебаний. Умножение на $i\omega$ в частотной области означает дифференцирование во временной области.

Следует отметить, что гистерезисное демпфирование можно использовать только в частотной области. Эта гистерезисная модель была разработана на основе экспериментальных наблюдений, согласно которым затухание колебаний уменьшается с ростом частоты. Она позволяет адекватно моделировать многие непрерывные системы.

Для большего соответствия модели экспериментальным данным используется ее формулировка в виде ряда [61]

$$[C] = [M] \sum_{k=0}^{p-1} \alpha_k \left([M]^{-1} [K] \right)^k. \quad (1.5)$$

Такая формулировка является приемлемым приближением для малого демпфирования. Самый простой случай это пропорциональное демпфирование, состоящее всего из двух членов, указанных в приведенной формуле:

$$[C] = \alpha_0 [M] + \alpha_1 [K], \quad (1.6)$$

где α_0 и α_1 – произвольные постоянные коэффициенты.

Рэлееское затухание в общем виде описывается матричным рядом, приведенным в уравнении (1.5). Двухпараметрическая модель, приведенная в уравнении (1.6), полученном на основе этого ряда, используется в программных пакетах NASTRAN, ANSYS [62], COMSOL Multiphysics и других для анализа динамического отклика систем на различные воздействия. Для этой двухпараметрической модели особенно просто получить параметры α_0 и α_1 ,

используя метод наименьших квадратов. Эквивалентная несвязанная форма уравнения (5) при переходе к коэффициенту демпфирования выглядит так:

$$2\xi_i = \sum_{k=0}^{p-1} \alpha_k f_i^{2k-1} \quad (1.7)$$

Это уравнение показывает, что коэффициент демпфирования ξ_i выражается через собственные частоты в нечетной степени $(2k - 1)$, то есть f^1, f^1, f^3, f^5 и т. д.

В соответствии с двухпараметрической моделью коэффициенты потерь и демпфирования выражаются формулой:

$$Q^{-1} = 2\xi_i = \alpha_0 f_i^{-1} + \alpha_1 f_i^1, \quad (1.8)$$

где Q^{-1} – коэффициент потерь; ξ – коэффициент демпфирования; f – частота колебаний.

На рисунке 1.1 схематично показана зависимость коэффициента демпфирования от частоты колебаний в рамках двухпараметрической рэлеевской модели. При наличии более двух значений f и соответствующих значений коэффициента демпфирования ξ можно определить коэффициенты α_0 и α_1 .

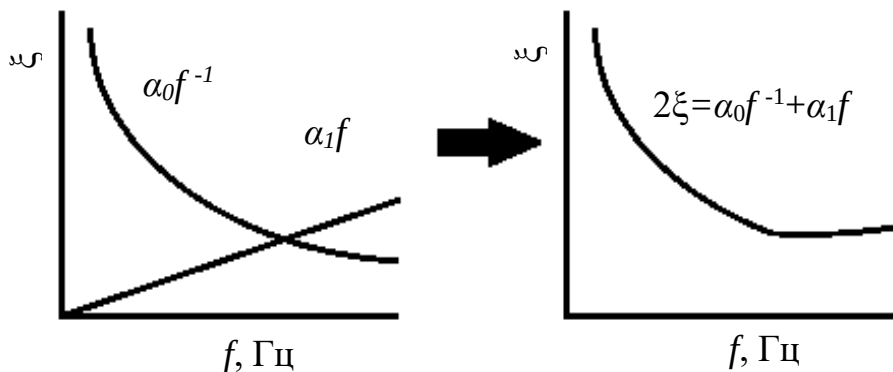


Рисунок 1.1 – Схема двухпараметрической рэлеевской модели

Таким образом, рэлеевская модель представляет частотную зависимость коэффициента потерь или коэффициента демпфирования колебательной системы в виде суммы двух слагаемых, одно из которых описывает возрастание коэффициента потерь с ростом частоты, а другое – с ее уменьшением.

Рэлеевская модель упруго-вязких потерь в расширенном и усеченном видах широко используется в расчетах и численном моделировании в различных областях науки и практики – горном деле [63], сейсмологии [64], гражданском строительстве [65] и других областях.

1.2.3 Практические результаты по исследованию ВМП в горных породах

Исследованиям внутренних механических потерь посвящено значительное количество публикаций.

В [66] показана тенденция к увеличению процента рассеянной энергии песчаника по мере роста амплитуды циклических напряжений, в результате увеличения энергии, используемой для продления трещин. Закрывание микротрещин мела при циклической нагрузке влияет на демпфирующие свойства, коэффициент демпфирования увеличивается с увеличением количества циклов нагрузки – разгрузки [67]. В [68] 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. В [69] проведен анализ акустических свойств горных пород различной пористости и водонасыщенности, и показано, что насыщенные жидкостью породы демонстрируют затухание и уменьшение скорости сейсмических волн, которые не наблюдаются в сухих породах. Спектры низкочастотного внутреннего трения позволяют определить наличие различных газов, содержащихся в порах и полостях горных пород, так как они отражают характерные пики, соответствующие фазовым переходам [70].

Трение между частицами горной породы во время циклического нагружения приводит к нелинейному гистерезису [41, 42, 71,]. С увеличением верхнего предела осевого сжатия гистерезисная петля кривой «напряжение-

деформация» смещается вправо по оси абсцисс [72]. 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 [73]. Явление амплитудного гистерезиса, при котором скорости волны различаются на восходящем и нисходящем участках сигналах, и причины его возникновения описаны в работах Э.И. Машинского [74, 75]. Для песчано-каменных смесей с увеличением содержания камня гистерезисная петля смещается в сторону оси напряжений, а её площадь увеличивается [76]. В [77] показано, что коэффициент потерь при приложении параллельной слоистости сланца нагрузки меньше, чем при приложении перпендикулярной нагрузки. При циклических испытаниях для осадочных и изверженных пород наблюдается снижение прочности и коэффициента внутренних механических потерь с увеличением числа циклов, для метаморфизованных же пород напротив наблюдается увеличение этих параметров с увеличением числа циклов нагрузки, также в работах [78, 79] установлены регрессионные зависимости между коэффициентом внутренних механических потерь и прочностью, описываемые логарифмической функцией.

1.2.4 Диапазоны частот исследования ВМП в горных породах и их массивах

Значительное число исследований ВМП в горных породах проводятся в диапазонах сравнительно высоких частот (0,1–30 кГц) [80, 81, 82]. В то же время исследования ведутся и при меньших частотах. Так, в [83] описаны исследования камчатских землетрясений в диапазоне 0,2–30 Гц, а в [84] – исследования сейсмических волн частотой выше 0,39 Гц в регионах Байкальской рифтовой зоны. Для исследований используются сейсмопреобразователи с диапазоном частот ниже 1 Гц. К ним относится, в частности, аналоговый однокомпонентный

молекулярно-электронный измеритель типа СМЕ-4211V, имеющий полосу регистрации от 0,033 ($T=30$ с) до 50 Гц. В [85] получено значение 0,12 Гц для минимальной частоты собственных колебаний зданий при моделировании воздействия на них сейсмических волн, также в работе исследуется применимость расширенной рэлеевской модели потерь. В [86] авторы делят землетрясения на несколько групп. Для так называемых «нормальных» землетрясений основные периоды колебаний изменяются в диапазоне от долей секунды в группе объемных волн до первых десятков секунд в группе поверхностных волн от крупных землетрясений. Если оценивать спектры таких землетрясений обратными величинами, то это диапазон от единиц до долей герц. Для «низкочастотных» и «очень низкочастотных» землетрясений частоты спектра еще меньше. В [87] при изучении движения ледников по скальным массивам Антарктики отмечены процессы с частотами ниже 0,1 Гц. Следует отметить, что разрабатываются сейсмоприемники с минимальной частотой регистрации 0,01 Гц и ниже [88]. Таким образом, можно сделать вывод об актуальности исследования ВМП в горных породах в низкочастотных областях ниже 1 Гц.

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 исследована 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 ГОСТР ИСО 10137–2016 рассматриваются частоты до 0,06 Гц, в [89] 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 сдвигение 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 [90]. Такая модель механических потерь включает сумму двух составляющих, из которых одна описывает изменение коэффициента потерь прямо пропорционально частоте, а вторая – обратно пропорционально ей. Прямо пропорциональная частоте составляющая исследована достаточно хорошо, хотя эти исследования продолжаются и до сих пор из-за большого разнообразия типов и месторождений горных пород. Обратно пропорциональная компонента модели исследована в гораздо худшей степени, особенно в области инфразвуковых частот, что определяет актуальность темы диссертации.

1.3 Цели и задачи исследования

Внутренние механические потери относятся к физическим свойствам горных пород, которые наряду с упругими, пластическими, прочностными свойствами должны учитываться в ряде расчетов и моделей. Они имеют большое значение при оценке сейсмического действия землетрясений и горных ударов, промышленных взрывов, вибрационных источников на породные массивы вокруг выработок и на подземные сооружения. Их величина оценивается коэффициентом механических потерь Q^{-1} . Однако большая часть исследований ВМП направлена на сравнительно высокочастотный диапазон частот, и наблюдается пробел в исследованиях в инфразвуковом диапазоне частот. Указанные особенности изучения внутренних механических потерь в различных материалах и горных породах, в частности, позволили сформулировать цель и задачи работы.

Целью работы: установление особенностей взаимосвязей между частотой воздействий и коэффициентом внутренних механических потерь на частотах ниже 0,1 Гц для горных пород различных генотипов.

Задачи исследования:

1) обоснование и разработка аппаратного и методического обеспечения для испытаний образцов горных пород при различных режимах циклического деформирования при изгибе в области инфразвуковых частот;

2) установление зависимостей изменения коэффициента потерь осадочных, метаморфических и изверженных пород от частоты при циклических механических изгибных деформациях в области инфразвуковых частот;

3) аппроксимация экспериментально полученных зависимостей коэффициента потерь от частоты и установление на этой основе закономерностей изменения потерь при изгибе образцов в области инфразвуковых частот;

4) установление видов потерь в горных породах, закономерностей изменения преобладающих потерь в зависимости от частоты воздействия и особенностей физических механизмов деформирования в этих условиях.

1.4 Выводы по главе 1

Результатами выполненного в первой главе анализа литературных источников являются следующие выводы:

1. Внутренние механические потери являются важным свойством горных пород и обязаны учитываться при проектировании и строительстве подземных и сейсмостойких объектов. Они изучаются в различных материалах от горных пород до сложных композитов, при различных видах нагрузок и температурах. Изменение ВМП часто связано с изменением прочностных свойств горных пород.

2. ВМП оцениваются коэффициентом потерь Q^{-1} , характеризующим переход части механической энергии в тепловую при упругих колебаниях, что сопровождается формированием петли механического гистерезиса.

3. Коэффициент потерь Q^{-1} зависит от амплитуды, числа циклов нагружения, частоты циклов, пористости, степени флюидонасыщения и структурной анизотропии породы.

4. Значительная часть исследований ВМП проводится в звуковом и ультразвуковом диапазоне частот, хотя большинство естественных процессов, происходящих в земной коре, обладающих, как правило, наибольшей амплитудой происходят в значительно более низкочастотном диапазоне. Область частот ниже 1 Гц, соответствующая реальным спектрам сейсмических воздействий, резонансным частотам зданий и процессам сдвижения пород, изучена недостаточно.

5. Указанные выводы по результатам обзора публикаций в области исследования механических потерь позволили сформулировать цель и задачи работы, приведенные во введении.

ГЛАВА 2 МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

2.1 Теоретическое обоснование методики измерений

В ряде классических работ по теории колебаний [91] показано, что дифференциальное уравнение периодических механических воздействий на колебательную систему с потерями может быть записано в следующем виде

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + kx + R\text{sign}(\dot{x}) = F(t), \quad (2.1)$$

где m – масса; d – коэффициент вязкого трения; k – коэффициент упругости; R – сила «сухого трения»; $F(t)$ – сила воздействия.

Уравнение (2.1) 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 средам с распределенными параметрами и свойствами в виде плотности, модуля упругости и коэффициента потерь, в которых, в частности, рассматривается распространение упругих волн.

Вязкое трение, оцениваемое коэффициентом d , проявляет себя не само по себе, а в сочетании с другими параметрами – массой m и коэффициентом упругости k . В связи с этим упруго-вязкие потери в зависимости от частоты воздействия оцениваются рэлееской моделью, учитывающей две составляющие [92], что выражается формулой

$$Q^{-1} = 2\xi = \frac{1}{2\pi f} \alpha_{dM} + 2\pi f \beta_{dK}, \quad (2.2)$$

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 (2.2), где частота в знаменателе, становится значимым только при малых f и поэтому характеризует

потери в низкочастотной области, где они возрастают с уменьшением частоты. Второе слагаемое, где частота в числителе, становится значимым при больших f и 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.

Следует отметить, что для горных пород в силу их генезиса характерно наличие развитой трещиноватости различных масштабных уровней. Это отличает их от металлов, сплавов, однородных по структуре композитов, для которых существенными являются процессы на уровнях дислокаций. Для горных пород кроме этих процессов существенными являются трение берегов микро- и макротрещин на микро и мезоуровнях, описываемое компонентой R в уравнении (2.1) и вносящее значительный вклад в общую картину механических потерь.

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

2.2 Экспериментальные установки, образцы и режимы испытаний

Эксперименты проводились на двух установках, что позволило обеспечить достоверность полученных результатов и выводов.

2.2.1 Методика испытаний образцов-балок

Первая экспериментальная установка применялась для циклических испытаний при изгибе образцов-балок горных пород, ее внешний вид представлен на рисунке 2.1.

Испытания образцов–балок при изгибе на первой установке проводились по трехточечной схеме с использованием приспособления, специально разработанного по рекомендациям ISRM, позволяющего минимизировать трение в опорах, а также измерять прогиб непосредственно на образцах.

Основой испытательной установки являлся испытательный комплекс АСИС (ООО НПО «Геотек», Пенза, Россия). Программное обеспечение АСИС позволило настроить алгоритм циклических испытаний с указанием количества циклов, максимального и минимального перемещений рамы испытательной машины и ее скорости. 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, обеспечивая порог чувствительности при регистрации перемещений менее 1 мкм. 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.

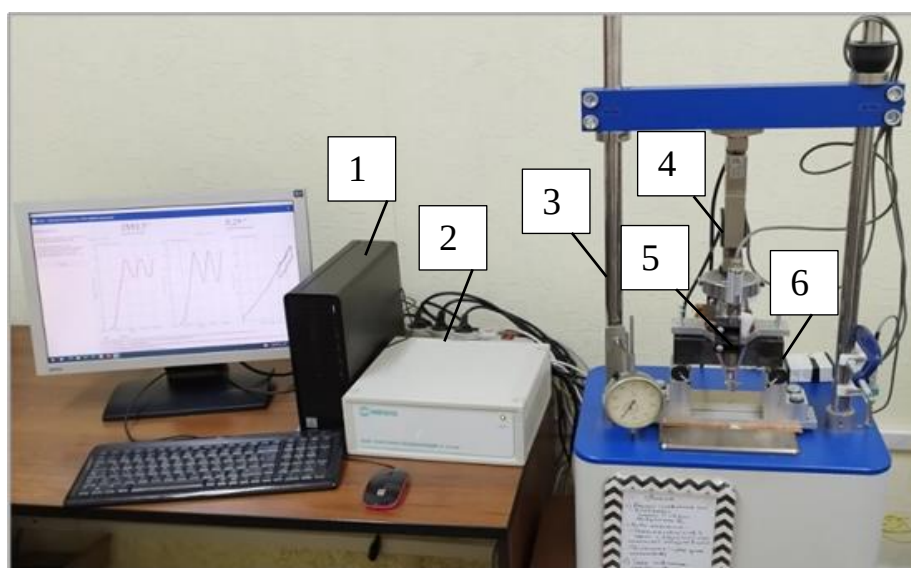


Рисунок 2.1 – Экспериментальная установка для испытания образцов–балок при изгибе : 1 – персональный компьютер, 2 – блок управления пресса, 3 – пресс, 4 – тензометрический динамометр, 5 – преобразователи линейных перемещений (LVDT), 6 – образец горной породы

При испытании образцов на изгиб задавались пределы и скорости перемещения рамы. Полученные длительности циклов пересчитывались в частоты как обратные величины. Всего было испытано 14 образцов, имевших размеры $150 \times 40 \times 40$ мм., они представлены рис 2.2, рис. 2.3, рис. 2.4, рис. 2.5. Были приняты следующие обозначения пород образцов: LM – известняк; DLM – доломит; MRB – мрамор; G – габбро.

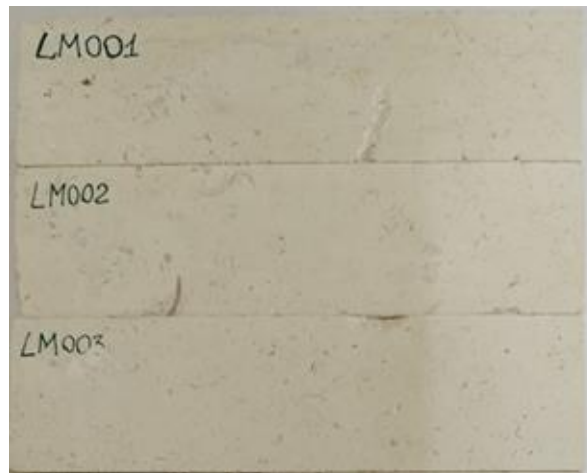


Рисунок 2.2 – Образцы известняка



Рисунок 2.3 – Образцы доломита

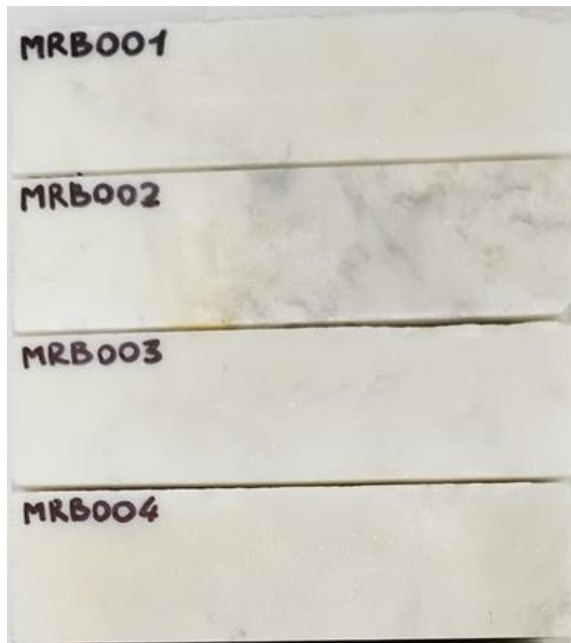


Рисунок 2.4 – Образцы мрамора

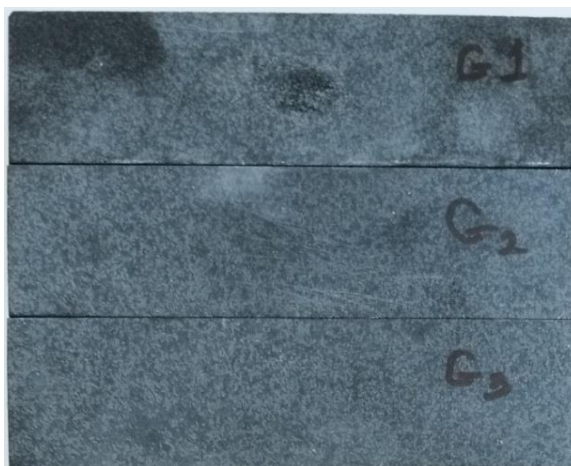


Рисунок 2.5 – Образцы габбро

Пример графиков нагрузки F и деформации образца u от времени t на одной из скоростей деформирования образца мрамора MRB001 приведен на рисунке 2.6.

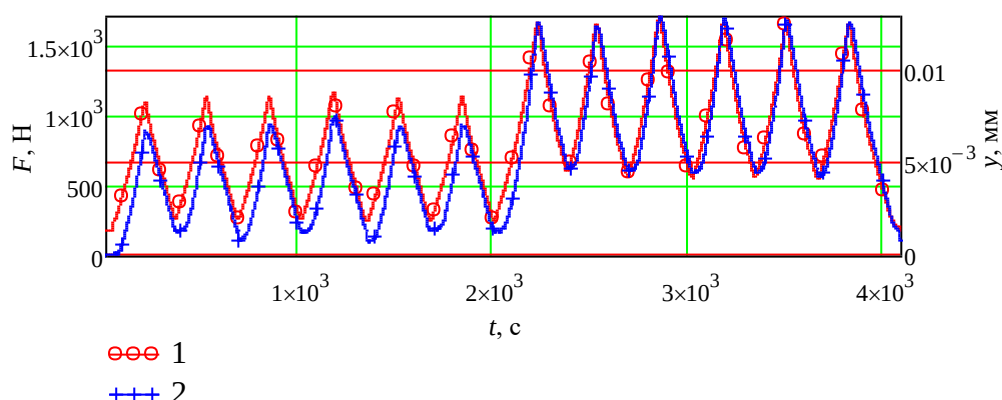


Рисунок 2.6 – Пример графиков циклической нагрузки F (1) и деформации y (2) образца мрамора MRB001 от времени t на скорости перемещения рамы 0,05 мм/мин

Для расчёта коэффициента потерь не использовались первые два цикла в серии, так как на них устанавливался стационарный режим для дальнейших циклов. Также для расчётов не использовались последние циклы в серии, на которых происходили переход на другие границы деформирования или окончание эксперимента.

Полученные длительности циклов пересчитывались в частоты как обратные величины. После этого для каждого цикла на каждой скорости перемещения рамы были построены приведенные к началу координат петли гистерезиса.

Для каждого цикла испытаний на каждой частоте воздействий были построены петли гистерезиса. После этого производилась центровка петли гистерезиса относительно средних значений деформаций прогиба $y_{\text{ср}}$ и нагрузки $F_{\text{ср}}$, необходимая для снятия корректных усилий

$$F' = F \Big|_{y=y_{\text{max}}} - F_{\text{ср}}$$

при максимальной деформации образца y_{max} и усилий

$$F'' = F \Big|_{y=0} - F_{\text{ср}}$$

в точке пересечения гистерезисной петель вертикальной оси.

Пример одной из центрированных петель гистерезиса показан на рисунке 2.7. Центр петли в данном случае находится в точке с координатами (0,0).

Отклонения от центра принимают как положительные, так и отрицательные знаки соответствуют минимальным и максимальным значениям деформаций и усилий положительных знаков в циклах в соответствии с рисунком 2.7.

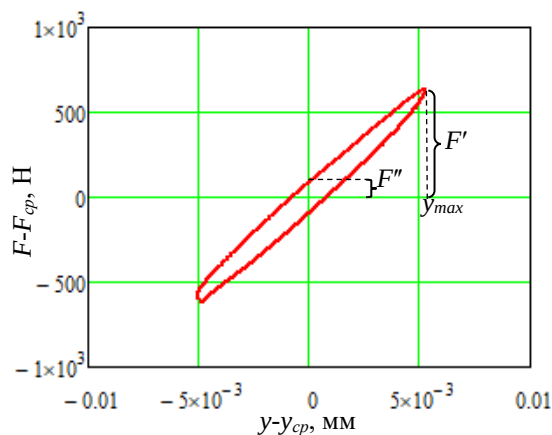


Рисунок 2.7. – Пример центрированной петли гистерезиса для одного цикла деформирования образца. F – усилие прогиба, u – деформация образца

Коэффициент потерь в случае изгиба балки по трехточечной схеме вычислялся по петле гистерезиса через зависимость усилий F'' в точке пересечения гистерезисной петлей вертикальной оси от усилий F' при максимальной деформации образца u_{max} , по модифицированной формуле (2.3), приведенной в ГОСТ 56801-2015

$$Q^{-1} = F''/F', \quad (2.3)$$

где Q^{-1} – коэффициент потерь (обратная добротность), F' – усилие центрированной петли при максимальной деформации образца u_{max} , а F'' – усилие в точке пересечения центрированной гистерезисной петлей вертикальной оси.

В табл. 2.1 представлены границы деформирования образцов. Испытания проводились при двух диапазонах изгиба, задаваемых соответствующим перемещением рамы. Для образца G1 при подборе режимов испытаний на каждом пике перемещения рамы было проведено по 3 цикла нагрузки–разгрузки, для остальных образцов на каждом пике перемещения рамы было проведено по 6 циклов нагрузки–разгрузки. При испытании задавались пределы и скорости перемещения рамы установки. Образцы деформировались по трехточечной схеме

на прессе с заданной скоростью перемещений двумя сериями по 6 циклов в заданных диапазонах перемещения рамы. Скорости перемещения рамы установки варьировались от 0,05 до 4 мм/мин. Следует отметить, что деформирование некоторых образцов на второй серии с большими значениями прогиба приводили к их разрушению.

Таблица 2.1 – Режимы нагружения образцов.

Горная порода	Номер образца	Границы перемещения рамы, мм	Скорости перемещения рамы, мм/мин	Частоты, Гц
Известняк	LM001	0,05 – 0,15	от 0,15 до 4	от 0,0053 до 0,083
		0,075 – 0,175	от 0,15 до 4	от 0,0053 до 0,083
	LM002	0,05 – 0,15	от 0,15 до 4	от 0,0057 до 0,094
		0,075 – 0,175	от 0,15 до 4	от 0,0057 до 0,094
	LM003	0,05 – 0,15	от 0,15 до 4	от 0,0055 до 0,104
		0,075 – 0,175	от 0,15 до 4	от 0,0055 до 0,104
Доломит	DLM001	0,25 – 0,1	от 0,15 до 4	от 0,0058 до 0,909
	DLM002	0,025 – 0,1	от 0,15 до 4	от 0,0057 до 0,092
	DLM003	0,025 – 0,1	от 0,075 до 2	от 0,0031 до 0,067
	DLM004	0,025 – 0,1	от 0,075 до 2	от 0,0031 до 0,077
Мрамор	MRB001	0,1 – 0,2	от 0,1 до 2,5	от 0,0031 до 0,045
	MRB002	0,1 – 0,2	от 0,05 до 1,5	от 0,0024 до 0,062
	MRB003	0,05 – 0,15	от 0,25 до 1,5	от 0,0071 до 0,045
		0,1 – 0,2	от 0,15 до 1,5	от 0,0051 до 0,045
	MRB004	0,05 – 0,15	от 0,15 до 1	от 0,0057 до 0,036
		0,1 – 0,2	от 0,15 до 1	от 0,0057 до 0,036
Габбро	G1	0,2 – 0,3	от 0,1 до 1	от 0,0038 до 0,044
	G2	0,2 – 0,3	от 0,1 до 1	от 0,0038 до 0,044
		0,3 – 0,4	от 0,1 до 1	от 0,0038 до 0,044
	G3	0,2 – 0,3	от 0,1 до 1	от 0,0038 до 0,044
		0,3 – 0,4	от 0,1 до 1	от 0,0038 до 0,044

Примечание. Данные для каждого образца с двумя строчками соответствуют двум диапазонам перемещения рамы испытательной установки; данные с одной строчкой приведены для образцов, разрушившихся при больших перемещениях рамы.

2.2.2 Методика испытаний образцов-пластин

В качестве второй установки использовался динамический механический анализатор (DMA – Dynamic Mechanical Analysis) DMA Q800 (TA Instruments, Нью-Касл, штат Делавэр, США).

Динамический механический анализатор Q800 (рисунок 2.8), включает узел размещения образца в одном варианте с закреплением его концов и нагружением в центре по трехточечной схеме и в другом варианте с закреплением на одном конце в виде консоли и нагружением на другом. Этот прибор осуществляет высокоточное управление нагрузкой с помощью воздушных струй с использованием бесконтактного линейного двигателя, что практически исключает трение, и измерение смещения оптическим кодером с высоким разрешением.



Рисунок 2.8 – Внешний вид установки DMA Q800

В качестве экспериментального материала использовались образцы–пластины габбро размерами 50×10×1 мм. Измерения проводились в диапазоне частот от 0,05 до 20 Гц при комнатной температуре и влажности. Размер образцов был выбран в соответствии с техническими требованиями механического анализатора Q800.

2.3. Моделирование

Для получения модельных зависимостей коэффициентов потерь от частоты механического деформирования в среде COMSOL Multiphysics было проведено моделирование экспериментов по циклическому механическому деформированию образцов балок и образцов пластин внутри модуля структурной механики. Моделирование осуществлялось в двумерной постановке задачи. Деформация образцов задавалась формулой в обозначениях системы COMSOL Multiphysics

$$Sig(t) = -\left(A \sin(2\pi ft)\right) + C,$$

где $Sig(t)$ – деформация, A – амплитуда, f – частота, C – начальная деформация, равная полусумме границ деформирования образца и введенная для избежания отрицательных значений деформации.

2.3.1 Моделирование циклического деформирования образцов балок горных пород

Модель образца балки представляет собой ориентированный горизонтально прямоугольник со сторонами 150 на 40 мм, толщиной 40 мм, изображенный на рис. 2.9. На его нижней грани двумя точками (PT1, PT2) обозначались опоры. К точке в центре верхней грани (PT3) прикладывалась синусоидальная деформация. Все границы модели образца оставались свободными, за исключением зафиксированных точек опор и точки приложения нагрузки. Частоты

механической деформации моделей образцов балок совпадали с экспериментальными.

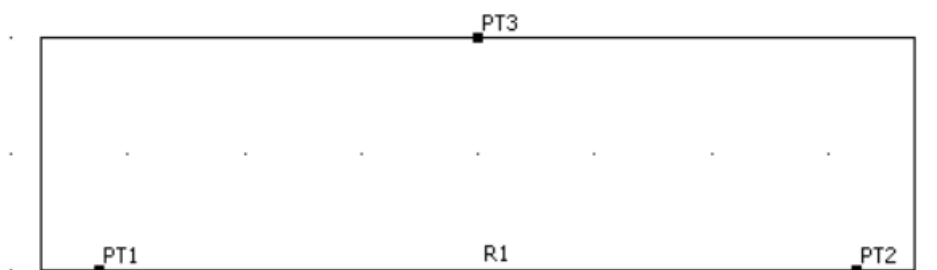


Рисунок 2.9 – 2D модель образца балки, испытываемого на изгиб по трехточечной схеме.

Свойства образца задавались в соответствии с таблицей 2.2. Модуль Юнга и коэффициент Пуассона определялись по предварительным испытаниям образцов горных пород, а коэффициенты альфа и бета были взяты из результатов экспериментальных испытаний, описанных в разделе 3.

Таблица 2.2 – Свойства моделей образцов балок различных горных пород.

Порода	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м ³	α_{dM}	β_{dK}
Известняк	10966	0,214	2800	0,002055	0,119
Доломит	4998	0,180	2650	0,003941	0,133
Мрамор	48140	0,286	2700	0,006733	0,607
Габбро	83329	0,216	3100	0,001820	0,159

Для каждой частоты деформирования были построены гистерезисные петли. Коэффициент потерь рассчитывался по формуле (2.3).

2.3.2 Моделирование циклического деформирования образца пластины габбро

Моделирование производилось в среде COMSOL Mutiphysics. Модель образца–пластины представляет собой ориентированный вертикально прямоугольник со сторонами 50 на 1 мм, толщиной 10 мм, представленный на рис. 2.10. Сверху и снизу длинные грани прямоугольника были зафиксированы, таким образом задавались зажимы динамического механического анализатора Q800 (отмечены синим цветом на рис. 2.10). В центральной части длинных граней прямоугольника задавались гармонические перемещения с различными частотами в диапазоне от 0,01 до 20 Гц в направлении, перпендикулярном вертикальной оси пластины (отмечены зеленым цветом на рис. 2.10). Остальные грани пластины оставались свободными (отмечены черным цветом на рис. 2.10).



Рисунок 2.10 – 2D модель образца пластины габбро, зафиксированные грани – отмечены синим цветом, грани для которых задавались гармонические перемещения – отмечены зелёным цветом, свободные грани – отмечены черным цветом

В расчетах модуль упругости пластины задавался равным 60 ГПа, коэффициент Пуассона 0,25, что соответствовало свойствам габбро, размеры пластины 50×10×1 мм. Коэффициенты рэлееской модели (2.2) $\alpha_{\text{дм}}=0,04$ Гц, $\beta_{\text{дк}}=0$. Результаты моделирования и их анализ приведены в четвертой главе.

2.4 Выводы по главе 2

В результате проведенной работы было разработано два метода определения коэффициента механических потерь Q^{-1} при циклических испытаниях образцов горной породы различной формы. Также было проведено численное моделирование в среде COMSOL Multiphysics испытаний для этих методов. Сделаны следующие выводы:

1. Преобразователи, снимающие нагрузку непосредственно на образце балке, должны иметь порог чувствительности не менее 1 мкм. Приспособление для установки образца должно минимизировать трение в опорах.

2. При циклических испытаниях образцов балок горной породы по трехточечной схеме для определения коэффициента механических потерь Q^{-1} в его расчёте не должны участвовать первые два цикла нагрузки-разгрузки, так как на этих циклах происходит установление стационарного режима испытаний. Также в расчете коэффициента механических потерь Q^{-1} не должен быть использован последний цикл, при котором происходит переход к отличным границам деформирования образца балки или окончание эксперимента.

3. Для корректного расчёта коэффициента механических потерь Q^{-1} гистерезисные петли, полученные в результате циклических испытаний на изгиб, должны центрироваться относительно средних значений деформаций прогиба $u_{\text{ср}}$ и нагрузки $F_{\text{ср}}$.

4. При численном моделировании испытаний на изгиб образцов горных пород для предложенных методов должна задаваться начальная деформация

образцов, равная полусумме границ деформирования образца, которая вводится для избежания отрицательных значений деформации.

5. Определение коэффициента механических потерь Q^{-1} двумя методами с использованием образцов горных пород различных генотипов и форм обуславливает достоверность полученных результатов.

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПОТЕРЬ ОБРАЗЦОВ-БАЛОК ОСАДОЧНЫХ, МЕТАМОРФИЧЕСКИХ И ИЗВЕРЖЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

В процессе обработки результатов эксперимента коэффициенты потерь усреднялись для каждого пикового перемещения рамы на каждой частоте нагрузки–разгрузки. Таким образом, в результате проведенных серий испытаний на циклический изгиб по трехточечной схеме групп образцов балок осадочных, изверженных и метаморфических пород для них были получены коэффициенты механических потерь для различных частот. После этого производилась аппроксимация зависимости коэффициента потерь Q^{-1} от частоты f методом наименьших квадратов в соответствии с рэлеевской моделью механических потерь (2.2). Полные данные по этим экспериментам приведены на интернет-ресурсе [93].

3.1 Осадочные породы

В качестве примера на рисунке 3.1 представлен график нагрузки и деформации образца известняка LM002 на скорости перемещения рамы испытательной установки 0,15 мм/мин от времени, также на рисунке 3.2 представлен вид гистерезисных петель для этого испытания.

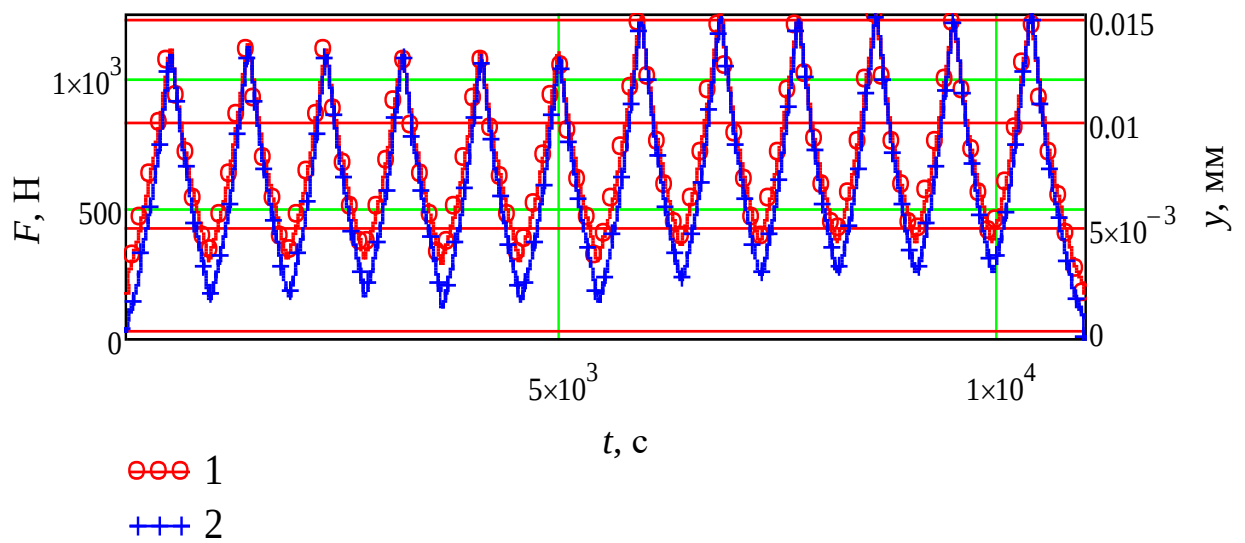


Рисунок 3.1 – Вид графиков нагрузки F (1) и деформации y (2) образца LM002 от времени на скорости перемещения рамы испытательной установки 0,15 мм/мин

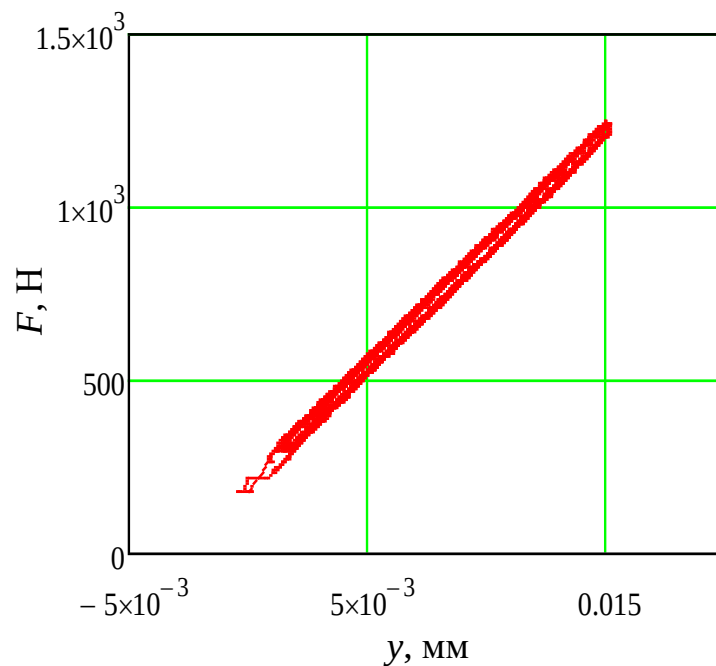


Рисунок 3.2 – Вид гистерезисных петель, полученных при циклических деформациях образца LM002 на скорости перемещения рамы 0,15 мм/мин

В таблице 3.1 представлены результаты испытаний для образца известняка LM001.

Таблица 3.1 – Результаты испытаний для образца известняка LM001.

Номер образца	Границы перемещения, мм	Скорость перемещения рамы, мм/мин	Период нагрузки-разгрузки, с	Частота перемещения, Гц	Коэффициент потерь
LM001	От 0,05 до 0,15	0,15	190	0,0053	0,073
		0,75	36	0,028	0,0299
		1	28	0,036	0,03
		1,5	19.2	0,052	0,054
		2	16	0,0625	0,045
		4	12	0,0833	0,07
	От 0,075 до 0,175	0,15	190	0,0053	0,080
		0,75	36	0,028	0,028
		1	28	0,036	0,031
		1,5	19.2	0,052	0,042
		2	16	0,0625	0,037
		4	12	0,0833	0,056

Эмпирические и аналитические зависимости коэффициента потерь от частоты нагружения для образца LM001 при пиках перемещения рамы 0,15 мм и 0,175 мм представлены на рисунках 3.3 и 3.4 соответственно.

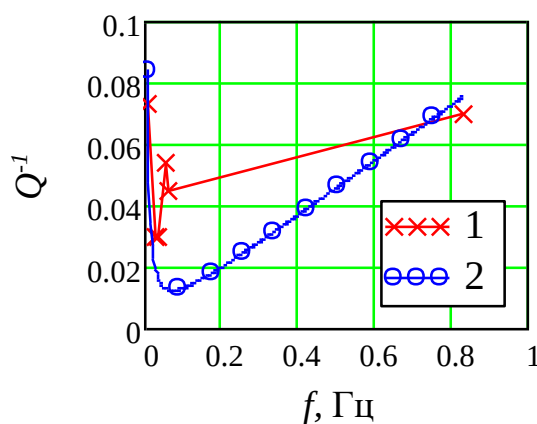


Рисунок 3.3 – Эмпирическая (1) и аналитическая (2) зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования, полученные на образце LM001 при перемещении рамы от 0,05 мм до 0,15 мм.

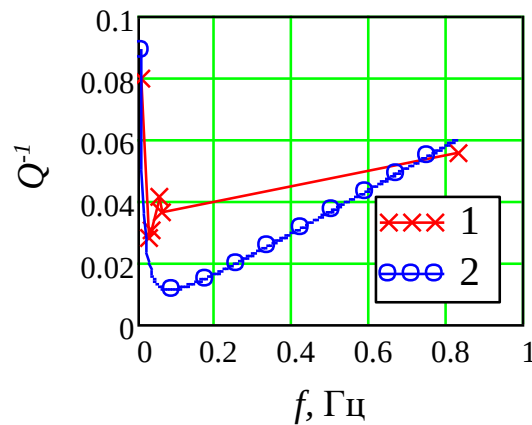


Рисунок 3.4 – Эмпирическая (1) и аналитическая (2) зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования, полученные на образце LM001 при перемещении рамы от 0,075 мм до 0,175 мм.

В таблице 3.2 представлены результаты испытаний для образца известняка LM002.

Таблица 3.2 – Результаты испытаний для образца известняка LM002.

Номер образца	Границы перемещения, мм	Скорость перемещения рамы, мм/мин	Период нагрузки-разгрузки, с	Частота перемещения, Гц	Коэффициент потерь
LM002	От 0,05 до 0,15	0,15	175,2	0,0057	0,052
		0,25	110	0,0091	0,047
		0,5	54,8	0,0182	0,041
		0,75	36,8	0,0272	0,045
		1	28,4	0,035	0,047
		2	15	0,0667	0,056
		4	10,6	0,094	0,063
	От 0,075 до 0,175	0,15	175,2	0,0057	0,057
		0,25	110	0,0091	0,054
		0,5	54,8	0,0182	0,056
		0,75	36,8	0,0272	0,054
		1	28,4	0,035	0,053
		2	15	0,0667	0,072
		4	10,6	0,094	0,083

Эмпирические и аналитические зависимости коэффициента потерь от частоты нагружения для образца LM002 при пиках перемещения рамы 0,15 мм и 0,175 мм представлены на рисунках 3.5 и 3.6 соответственно.

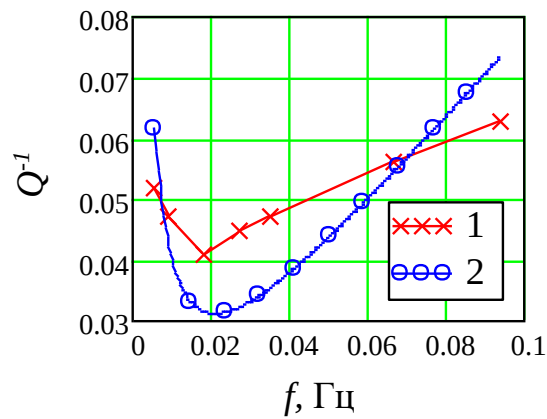


Рисунок 3.5 – Эмпирическая (1) и аналитическая (2) зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования, полученные на образце LM002 при перемещении рамы от 0,05 мм до 0,15 мм.

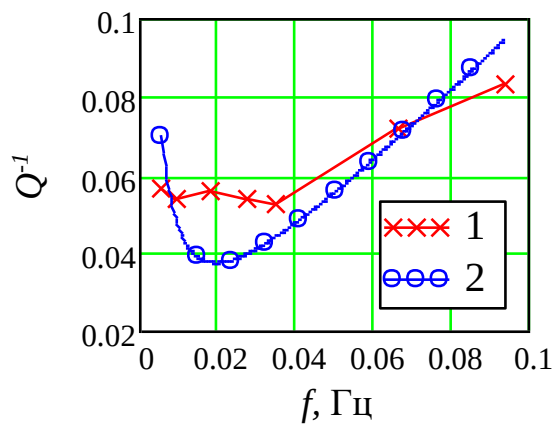


Рисунок 3.6 – Эмпирическая (1) и аналитическая (2) зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования, полученные на образце LM002 при перемещении рамы от 0,075 мм до 0,175 мм.

В таблице 3.3 представлены результаты испытаний для образца известняка LM003.

Таблица 3.3 – Результаты испытаний для образца известняка LM003.

Номер образца	Границы перемещения, мм	Скорости перемещения рамы, мм/мин	Период нагрузки-разгрузки, с	Частота перемещения, Гц	Коэффициент потерь
LM003	От 0,05 до 0,15	0,15	180	0,0055	0,025
		0,25	115,2	0,0087	0,0038
		0,5	60,8	0,0164	0,0096
		0,75	36,8	0,0272	0,011
		1	28	0,036	0,022
		2	14,6	0,064	0,033
		4	9,6	0,104	0,042
	От 0,075 до 0,175	0,15	180	0,0055	0,0034
		0,25	115,2	0,0087	0,014
		0,5	60,8	0,0164	0,022
		0,75	36,8	0,0272	0,008
		1	28	0,036	0,025
		2	14,6	0,064	0,037
		4	9,6	0,104	0,072

Эмпирические и аналитические зависимости коэффициента потерь от частоты нагружения для образца LM003 при пиках перемещения рамы 0,15 мм и 0,175 мм представлены на рисунках 3.7 и 3.8 соответственно.

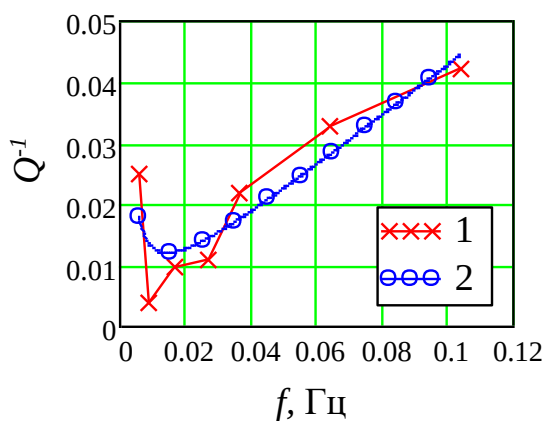


Рисунок 3.7 – Эмпирическая (1) и аналитическая (2) зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования, полученные на образце LM003 при перемещении рамы от 0,05 мм до 0,15 мм.

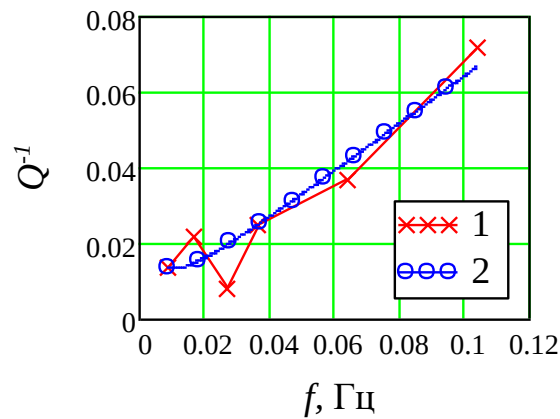


Рисунок 3.8 – Эмпирическая (1) и аналитическая (2) зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования, полученные на образце LM003 при перемещении рамы от 0,075 мм до 0,175 мм.

В качестве примера на рисунке 3.9 представлен график нагрузки и деформации образца доломита DLM004 на скорости перемещения рамы испытательной установки 0,075 мм/мин от времени, также на рисунке 3.10 представлен вид гистерезисных петель для этого испытания.

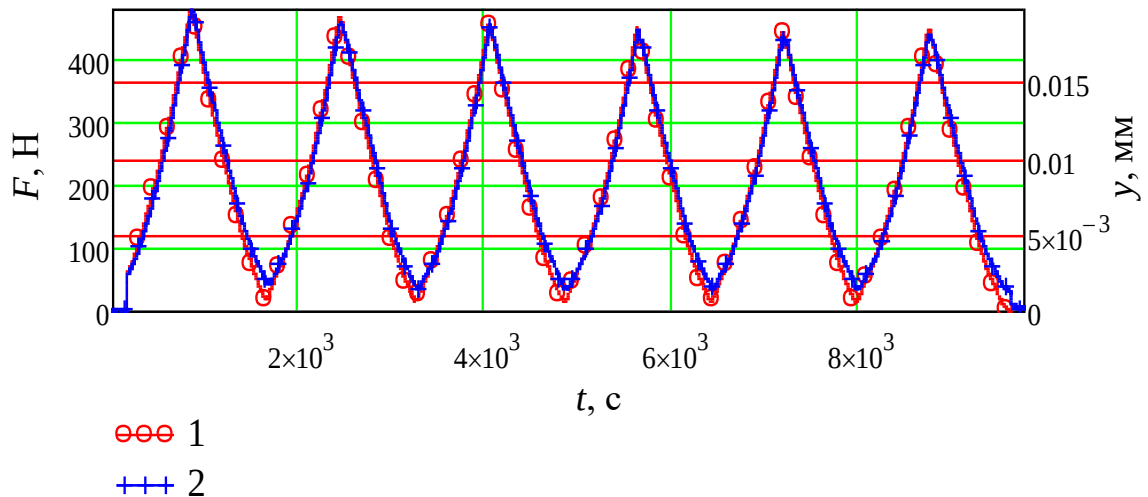


Рисунок 3.9 – Вид графиков нагрузки F (1) и деформации y (2) образца DLM004 от времени на скорости перемещения рамы 0.075 мм/мин

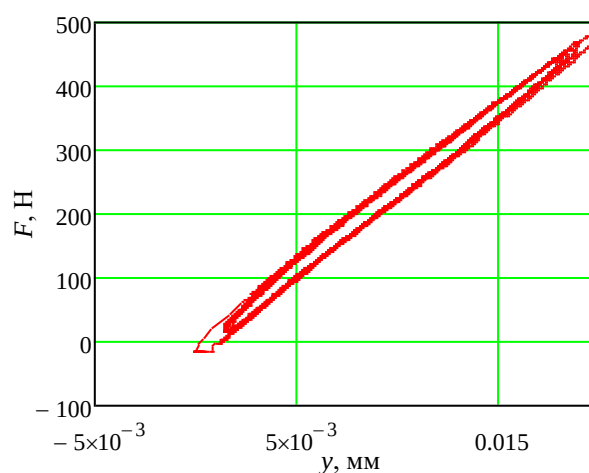


Рисунок 3.10 – Вид гистерезисных петель, полученных при циклических деформациях образца DLM004 на скорости перемещения рамы 0.075 мм/мин

В таблице 3.4 представлены результаты испытаний для образца доломита DLM001.

Таблица 3.4 – Результаты испытаний для образца доломита DLM001.

Номер образца	Границы перемещения, мм	Скорости перемещения рамы, мм/мин	Период нагрузки-разгрузки, с	Частота перемещения, Гц	Коэффициент потерь
DLM001	От 0,025 до 0,1	0,15	170	0,00588	0,082
		0,25	100	0,01	0,12
		0,50	50	0,02	0,062
		0,75	26	0,0384	0,031
		1	25	0,04	0,047
		1,5	17.2	0,058	0,06
		2	14	0,0714	0,055
		4	11	0,0909	0,095

Эмпирическая и аналитическая зависимость коэффициента потерь от частоты нагружения для образца DLM001 при пике перемещения рамы 0,1 мм представлена на рисунке 3.11.

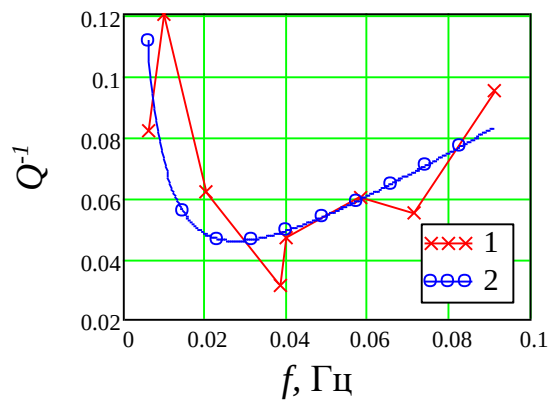


Рисунок 3.11 – Эмпирическая (1) и аналитическая (2) зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования, полученные на образце DLM001 при перемещении рамы от 0,025 мм до 0,1 мм.

В таблице 3.5 представлены результаты испытаний для образца доломита DLM002.

Таблица 3.5 – Результаты испытаний для образца доломита DLM002.

Номер образца	Границы перемещения, мм	Скорости перемещения рамы, мм/мин	Период нагрузки-разгрузки, с	Частота перемещения, Гц	Коэффициент потерь
DLM002	От 0,025 до 0,1	0,15	176	0,0057	0,037
		0,25	102	0,0098	0,039
		0,50	52	0,0192	0,038
		0,75	30	0,033	0,019
		1	27	0,037	0,023
		1,5	18	0,055	0,010
		2	14.8	0,068	0,012
		4	10.8	0,0925	0,0125

Эмпирическая и аналитическая зависимость коэффициента потерь от частоты нагружения для образца DLM002 при пике перемещения рамы 0,1 мм представлена на рисунке 3.12.

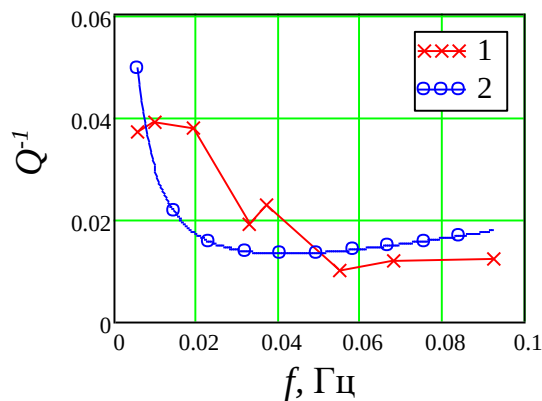


Рисунок 3.12 – Эмпирическая (1) и аналитическая (2) зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования, полученные на образце DLM002 при перемещении рамы от 0,025 мм до 0,1 мм.

В таблице 3.6 представлены результаты испытаний для образца доломита DLM003.

Таблица 3.6 – Результаты испытаний для образца доломита DLM003.

Номер образца	Границы перемещения, мм	Скорости перемещения рамы, мм/мин	Период нагрузки-разгрузки, с	Частота перемещения, Гц	Коэффициент потерь
DLM003	От 0,025 до 0,1	0,075	320	0,003125	0,17
		0,1	210	0,00476	0,1765
		0,15	130	0,0077	0,1363
		0,25	105	0,00952	0,081
		0,50	36	0,027	0,0865
		0,75	30	0,033	0,074
		1	26	0,0385	0,0582
		1,25	22	0,0455	0,0478
		1,5	19	0,053	0,15
		2	15	0,067	0,132

Эмпирическая и аналитическая зависимость коэффициента потерь от частоты нагружения для образца DLM003 при пике перемещения рамы 0.1 мм представлена на рисунке 3.13.

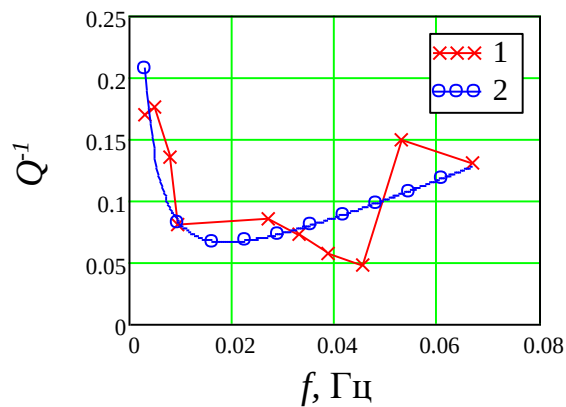


Рисунок 3.13 – Эмпирическая (1) и аналитическая (2) зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования, полученные на образце DLM003 при перемещении рамы от 0,025 мм до 0,1 мм.

В таблице 3.7 представлены результаты испытаний для образца доломита DLM004.

Таблица 3.7 – Результаты испытаний для образца доломита DLM004.

Номер образца	Границы перемещения, мм	Скорости перемещения рамы, мм/мин	Период нагрузки-разгрузки, с	Частота перемещения, Гц	Коэффициент потерь
DLM004	От 0,025 до 0,1	0,075	310	0,003125	0,075
		0,1	230	0,00435	0,083
		0,15	152	0,00658	0,081
		0,25	85	0,0118	0,076
		0,50	32	0,03125	0,08
		0,75	28	0,0357	0,071
		1	26	0,0385	0,067
		1,25	20	0,05	0,054
		1,5	17	0,0588	0,23
		2	13	0,077	0,18

Эмпирическая и аналитическая зависимость коэффициента потерь от частоты нагружения для образца DLM004 при пике перемещения рамы 0.1 мм представлена на рисунке 3.14.

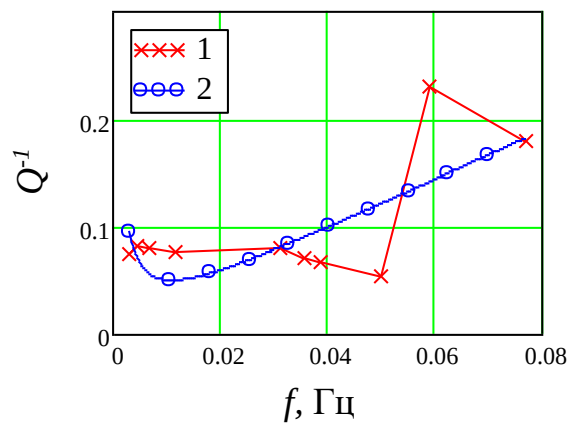


Рисунок 3.14 – Эмпирическая (1) и аналитическая (2) зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования, полученные на образце DLM004 при перемещении рамы от 0,025 мм до 0,1 мм.

3.2 Метаморфические породы

В качестве примера на рисунке 3.15 представлен график нагрузки и деформации образца мрамора MRB001 на скорости перемещения рамы испытательной установки 0,25 мм/мин от времени, также на рисунке 3.16 представлен вид гистерезисных петель для этого испытания.

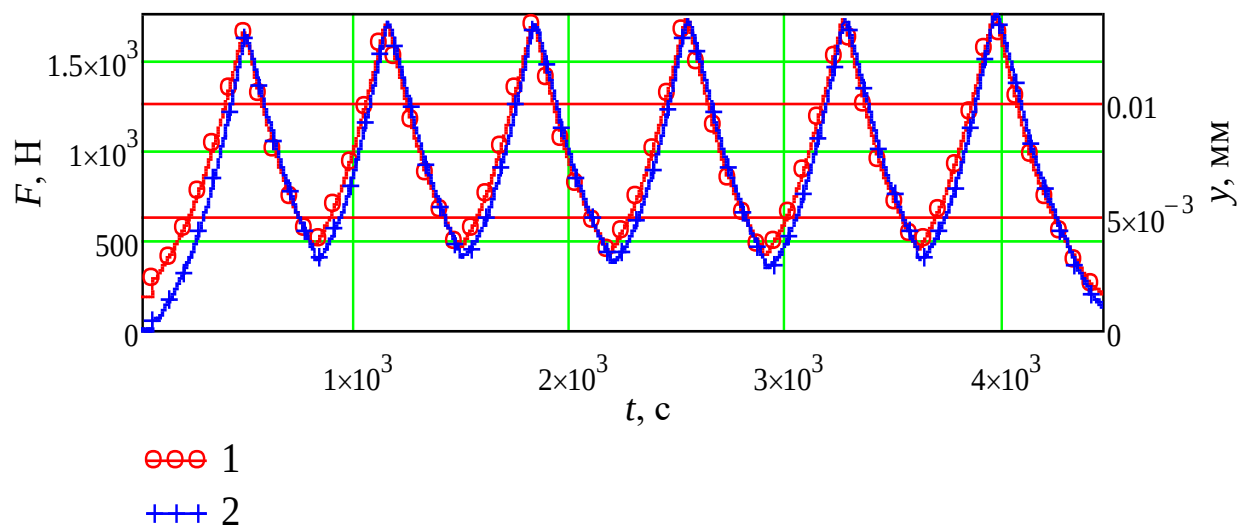


Рисунок 3.15 – Вид графиков нагрузки F (1) и деформации y (2) образца MRB001 от времени на скорости перемещения рамы 0,25 мм/мин

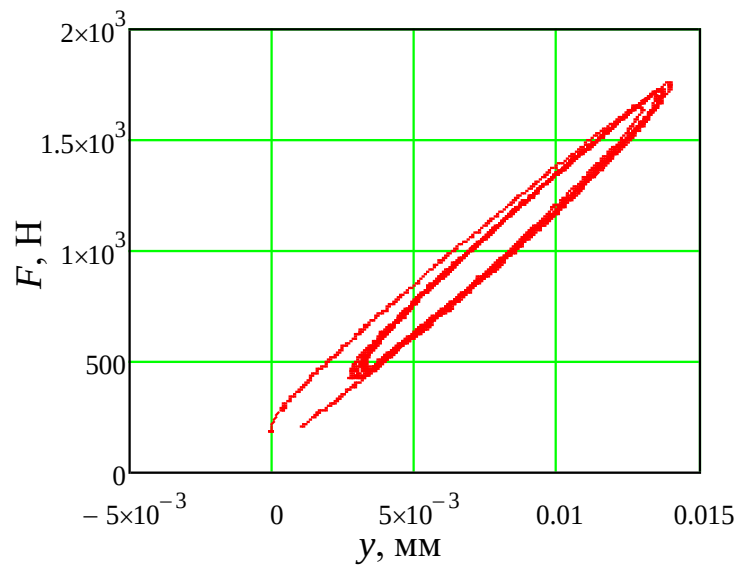


Рисунок 3.16 – Вид гистерезисных петель, полученных при циклических деформациях образца MRB001 на скорости перемещения рамы 0,25 мм/мин

В таблице 3.8 представлены результаты испытаний для образца мрамора MRB001.

Таблица 3.8 – Результаты испытаний для образца мрамора MRB001.

Номер образца	Границы перемещения, мм	Скорости перемещения рамы, мм/мин	Период нагрузки-разгрузки, с	Частота перемещения, Гц	Коэффициент потерь
MRB001	От 0,1 до 0,2	0,1	320	0,003125	0,35
		0,15	230	0,0043	0,29
		0,25	140	0,00714	0,14
		0,50	62	0,01612	0,144
		0,75	42	0,0238	0,145
		1	28	0,0357	0,154
		2,5	22	0,04545	0,2

Эмпирическая и аналитическая зависимость коэффициента потерь от частоты нагружения для образца MRB001 при пике перемещения рамы 0,2 мм представлена на рисунке 3.17.

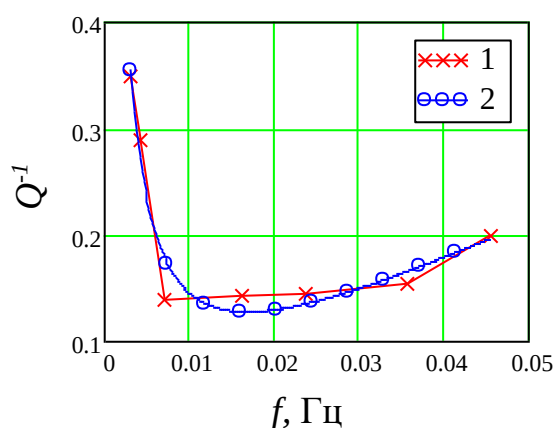


Рисунок 3.17 – Эмпирическая (1) и аналитическая (2) зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования, полученные на образце MRB001 при перемещении рамы от 0,1 мм до 0,2 мм.

В таблице 3.9 представлены результаты испытаний для образца мрамора MRB002.

Таблица 3.9 – Результаты испытаний для образца мрамора MRB002.

Номер образца	Границы перемещения, мм	Скорости перемещения рамы, мм/мин	Период нагрузки-разгрузки, с	Частота перемещения, Гц	Коэффициент потерь
MRB002	От 0,1 до 0,2	0,05	410	0,093	0,00244
		0,1	220	0,095	0,0045
		0,15	150	0,087	0,00667
		0,25	88	0,059	0,0113
		0,50	44	0,066	0,0227
		0,75	28	0,084	0,0357
		1	22	0,081	0,04545
		1,5	16	0,097	0,0625

Эмпирическая и аналитическая зависимость коэффициента потерь от частоты нагружения для образца MRB002 при пике перемещения рамы 0.2 мм представлена на рисунке 3.18.

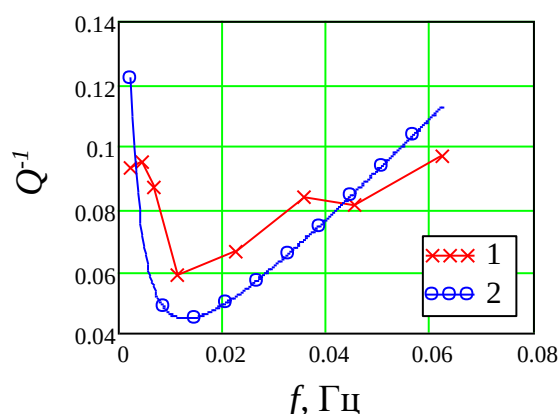


Рисунок 3.18 – Эмпирическая (1) и аналитическая (2) зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования, полученные на образце MRB002 при перемещении рамы от 0,1 мм до 0,2 мм.

В таблице 3.10 представлены результаты испытаний для образца мрамора MRB003.

Таблица 3.10 – Результаты испытаний для образца мрамора MRB003.

Номер образца	Границы перемещения, мм	Скорости перемещения рамы, мм/мин	Период нагрузки-разгрузки, с	Частота перемещения, Гц	Коэффициент потерь
MRB003	От 0,05 до 0,15	0,25	140	0,00714	0,23
		0,50	64	0,0156	0,31
		0,75	40	0,025	0,34
		1	28	0,036	0,4
		1,5	22	0,045	0,54
	От 0,1 до 0,2	0,15	194	0,00515	0,156
		0,25	140	0,00714	0,195
		0,50	64	0,0156	0,23
		0,75	40	0,025	0,305
		1	28	0,036	0,35
		1,5	22	0,045	0,42

Эмпирические и аналитические зависимости коэффициента потерь от частоты нагружения для образца MRB003 при пиках перемещения рамы 0,15 мм и 0,2 мм представлены на рисунках 3.19 и 3.20 соответственно.

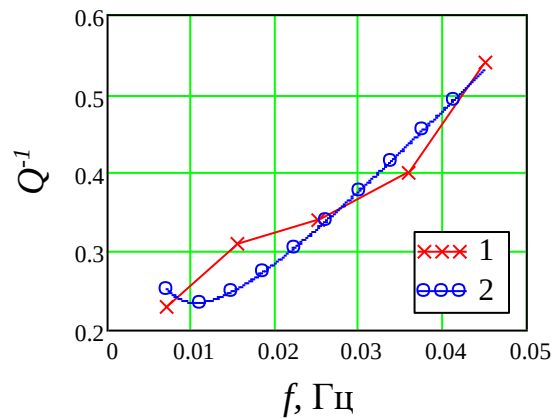


Рисунок 3.19 – Эмпирическая (1) и аналитическая (2) зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования, полученные на образце MRB003 при перемещении рамы от 0,05 мм до 0,15 мм.

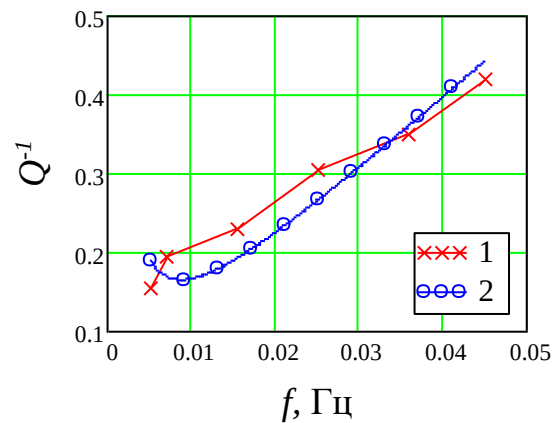


Рисунок 3.20 – Эмпирическая (1) и аналитическая (2) зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования, полученные на образце MRB003 при перемещении рамы от 0,1 мм до 0.2 мм.

В таблице 3.11 представлены результаты испытаний для образца мрамора MRB004.

Таблица 3.11 – Результаты испытаний для образца мрамора MRB004.

Номер образца	Границы перемещения, мм	Скорости перемещения рамы, мм/мин	Период нагрузки-разгрузки, с	Частота перемещения, Гц	Коэффициент потерь
MRB004	От 0,05 до 0,15	0,15	175,2	0,0057	0,261
		0,25	110	0,0091	0,272
		0,50	56	0,01785	0,260
		0,75	36	0,028	0,28
		1	28	0,036	0,37
	От 0,1 до 0,2	0,15	175,2	0,0057	0,204
		0,25	110	0,0091	0,217
		0,50	56	0,01785	0,245
		0,75	36	0,028	0,272
		1	28	0,036	0,286

Эмпирические и аналитические зависимости коэффициента потерь от частоты нагружения для образца MRB004 при пиках перемещения рамы 0,15 мм и 0,2 мм представлены на рисунках 3.21 и 3.22 соответственно.

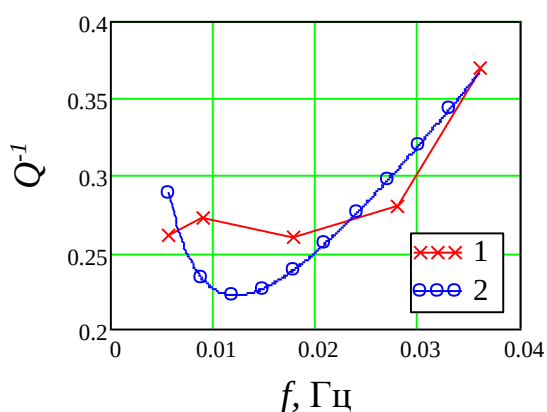


Рисунок 3.21 – Эмпирическая (1) и аналитическая (2) зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования, полученные на образце MRB004 при перемещении рамы от 0,05 мм до 0,15 мм.

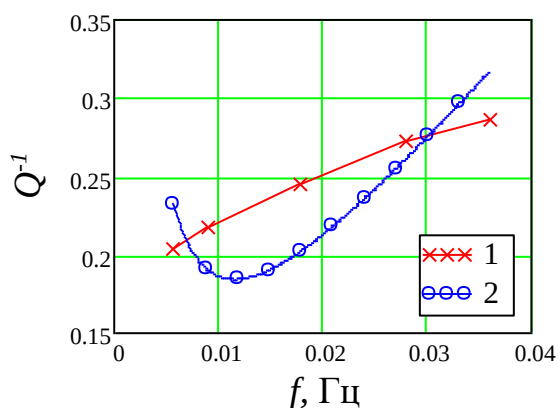


Рисунок 3.22 – Эмпирическая (1) и аналитическая (2) зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования, полученные на образце MRB004 при перемещении рамы от 0,1 мм до 0,2 мм.

3.3 Изверженные породы

В качестве примера на рисунке 3.23 представлен график нагрузки и деформации образца габбро G2 на скорости перемещения рамы испытательной установки 0,1 мм/мин от времени, также на рисунке 3.24 представлен вид гистерезисных петель для этого испытания.

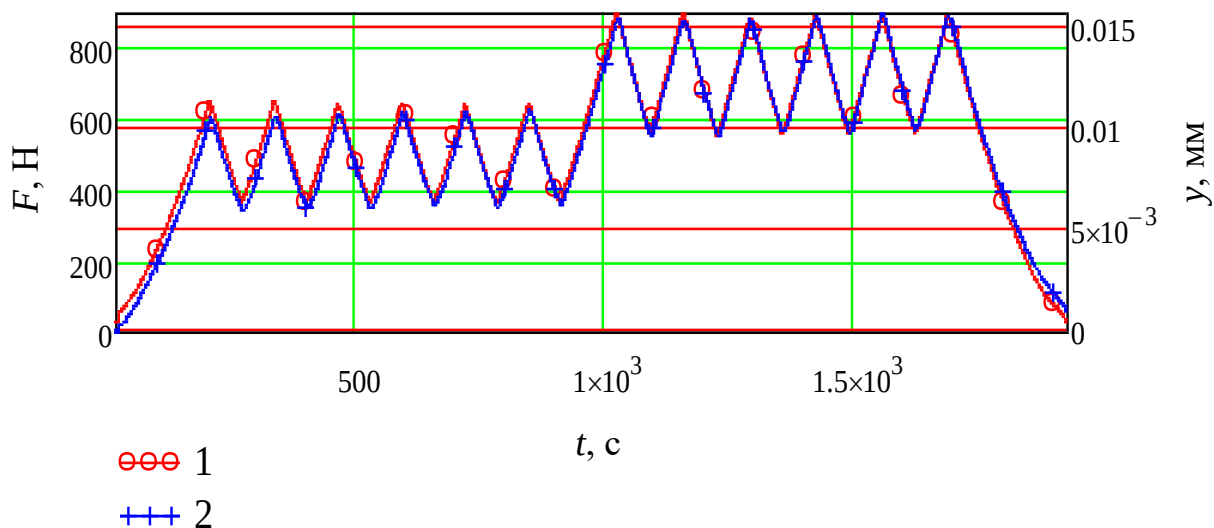


Рисунок 3.23 – Вид графиков нагрузки F (1) и прогиба y (2) образца G2 от времени на скорости перемещения рамы 0,1 мм/мин

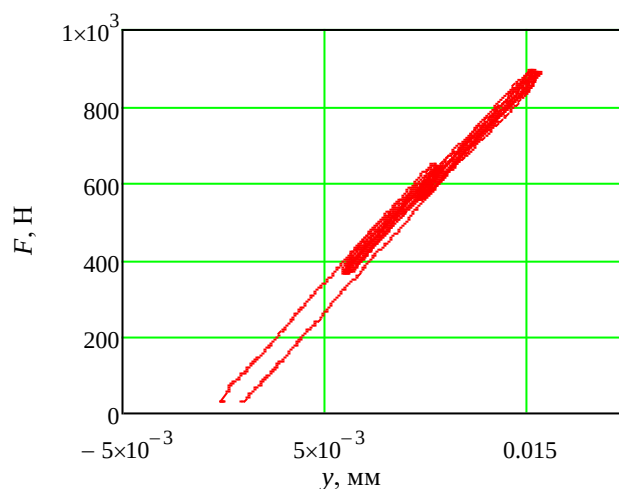


Рисунок 3.24 – Вид гистерезисных петель, полученных при циклических деформациях образца G2 на скорости перемещения рамы 0,1 мм/мин

В таблице 3.12 представлены результаты испытаний для образца габбро G1.

Таблица 3.12 – Результаты испытаний для образца габбро G1.

Номер образца	Границы перемещения, мм	Скорости перемещения рамы, мм/м	Период нагрузки-разгрузки, с	Частота перемещения, Гц	Коэффициент потерь
G1	От 0,2 до 0,3	0,1	260	0,00384	0,0363
		0,25	112	0,0089	0,0092
		0,5	52,6	0,019	0,0147
		0,75	29,7	0,0336	0,0789
		1	22,7	0,044	0,099
	От 0,4 до 0,5	0,25	112	0,0089	0,0108
		0,5	52,6	0,019	0,0059
		0,75	29,7	0,0336	0,0795
		1	22,7	0,044	0,0681

Эмпирические и аналитические зависимости коэффициента потерь от частоты нагружения для образца G1 при пиках перемещения рамы 0,3 мм и 0,5 мм представлены на рисунках 3.25 и 3.26 соответственно.

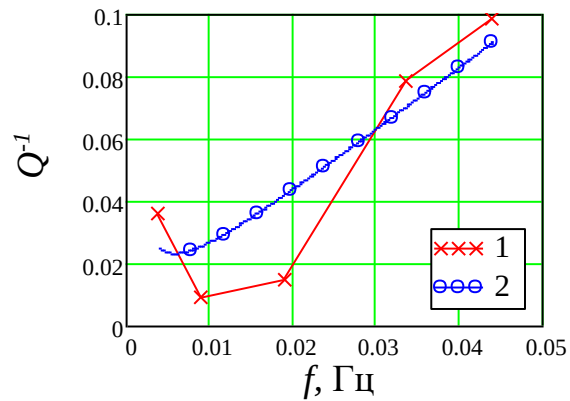


Рисунок 3.25 – Эмпирическая (1) и аналитическая (2) зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования, полученные на образце G1 при перемещении рамы от 0,2 мм до 0,3 мм.

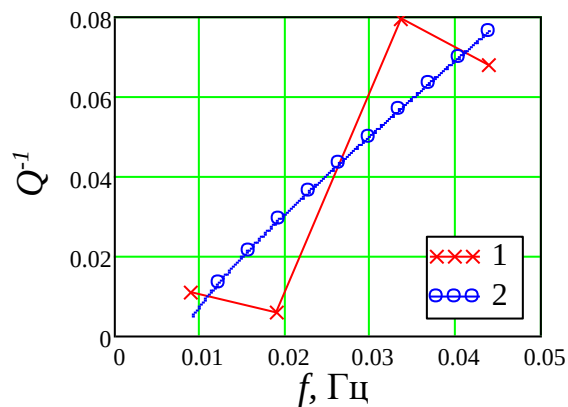


Рисунок 3.26 – Эмпирическая (1) и аналитическая (2) зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования, полученные на образце G1 при перемещении рамы от 0,4 мм до 0,5 мм.

В таблице 3.13 представлены результаты испытаний для образца габбро G2.

Таблица 3.13 – Результаты испытаний для образца габбро G2.

Номер образца	Границы перемещения, мм	Скорости перемещения рамы, мм/мин	Период нагрузки-разгрузки, с	Частота перемещения, Гц	Коэффициент потерь
G2	От 0.2 до 0.3	0,1	260	0,00384	0,07153
		0,25	112	0,0089	0,06038
		0,5	52,6	0,019	0,0343
		0,75	29,7	0,0336	0,03615
		1	22,7	0,044	0,0521
	От 0.3 до 0.4	0,1	260	0,00384	0,0522
		0,25	112	0,0089	0,02765
		0,5	52,6	0,019	0,02305
		0,75	29,7	0,0336	0,02021
		1	22,7	0,044	0,0342

Эмпирические и аналитические зависимости коэффициента потерь от частоты нагружения для образца G2 при пиках перемещения рамы 0,3 мм и 0,4 мм представлены на рисунках 3.27 и 3.28 соответственно.

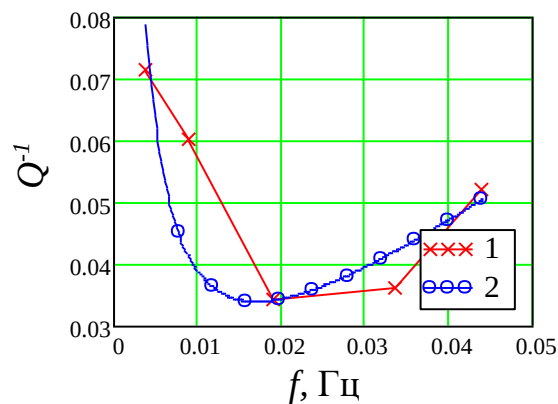


Рисунок 3.27 – Эмпирическая (1) и аналитическая (2) зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования, полученные на образце G2 при перемещении рамы от 0,2 мм до 0,3 мм

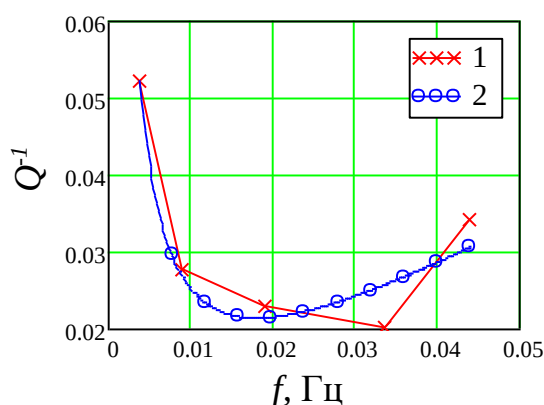


Рисунок 3.28 – Эмпирическая (1) и аналитическая (2) зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования, полученные на образце G2 при перемещении рамы от 0,3 мм до 0,4 мм.

В таблице 3.14 представлены результаты испытаний для образца габбро G3.

Таблица 3.14 – Результаты испытаний для образца габбро G3.

Номер образца	Границы перемещения, мм	Скорости перемещения рамы, мм/мин	Период нагрузки-разгрузки, с	Частота перемещения, Гц	Коэффициент потерь
G3	От 0,2 до 0,3	0,1	260	0,00384	0,08365
		0,25	112	0,0089	0,03602
		0,5	52,6	0,019	0,088525
		0,75	29,7	0,0336	0,08495
		1	22,7	0,044	0,16575
	От 0.3 до 0.4	0,1	260	0,00384	0,06516
		0,25	112	0,0089	0,06326
		0,5	52,6	0,019	0,079875
		0,75	29,7	0,0336	0,091425
		1	22,7	0,044	0,161

Эмпирические и аналитические зависимости коэффициента потерь от частоты нагружения для образца G3 при пиках перемещения рамы 0,3 мм и 0,4 мм представлены на рисунках 3.29 и 3.30 соответственно.

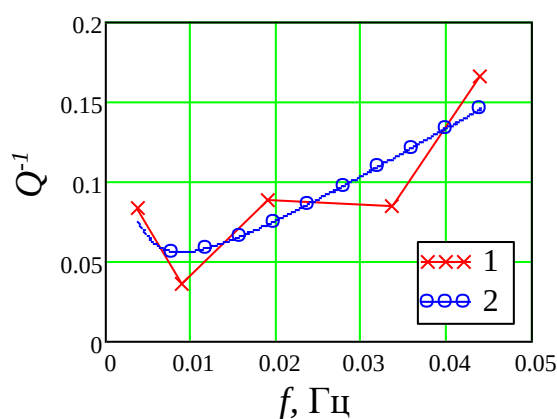


Рисунок 3.29 – Эмпирическая (1) и аналитическая (2) зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования, полученные на образце G3 при перемещении рамы от 0,2 мм до 0,3 мм.

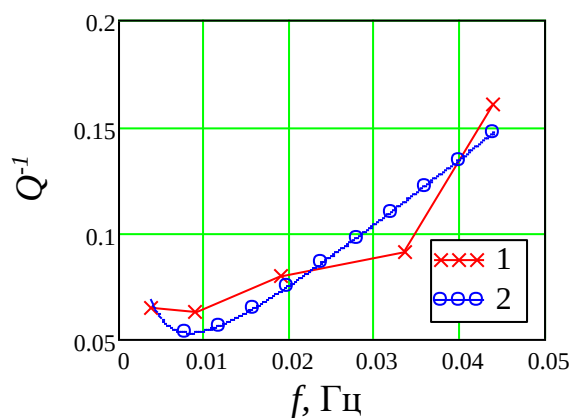


Рисунок 3.30 – Эмпирическая (1) и аналитическая (2) зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования, полученные на образце G3 при перемещении рамы от 0,3 мм до 0,4 мм.

В табл. 3.15 приведены коэффициенты α_{dM} и β_{dK} рэлеевской модели, полученные из аппроксимированных зависимостей, а также коэффициент детерминации R^2 между экспериментальными данными и теоретическими зависимостями.

Таблица 3.15 – Параметры аналитических зависимостей коэффициента потерь от частоты

Номер образца	Диапазон перемещения рамы, мм	Коэффициент $\alpha_{дм}$, Гц	Коэффициент $\beta_{дк}$, с	Коэффициент детерминации R^2
LM001	0,05 – 0,15	0,002262	0,118	0,906
	0,075 – 0,0175	0,002544	0,092	0,968
LM002	0,05 – 0,15	0,002055	0,119	0,878
	0,075 – 0,0175	0,002298	0,0154	0,788
LM003	0,05 – 0,15	0,000545	0,067	0,816
	0,075 – 0,0175	0,000448	0,102	0,912
DLM001	0,025 – 0,1	0,003941	0,133	0,323
DLM002	0,025 – 0,1	0,001747	0,026	0,323
DLM003	0,025 – 0,1	0,003968	0,283	0,549
DLM004	0,025 – 0,1	0,001733	0,372	0,479
MRB001	0,1 – 0,2	0,006733	0,607	0,941
MRB002	0,1 – 0,2	0,001806	0,277	0,521
MRB003	0,05 – 0,15	0,007743	1,783	0,912
	0,1 – 0,2	0,00455	1,513	0,92
MRB004	0,05 – 0,15	0,008465	1,458	0,717
	0,1 – 0,2	0,006672	1,273	0,593
G1	0,2 – 0,3	0,00421	0,324	0,839
G2	0,2 – 0,3	0,001817	0,159	0,646
	0,3 – 0,4	0,001211	0,095	0,928
G3	0,2 – 0,3	0,001546	0,0528	0,79
	0,3 – 0,4	0,001372	0,515	0,859

Примечание. Данные для каждого образца с двумя строчками соответствуют двум диапазонам перемещения рамы испытательной установки; данные с одной строчкой приведены для образцов, разрушившихся при больших перемещениях рамы.

3.4 Сравнение экспериментальных результатов с результатами моделирования

Для оценки зависимости коэффициента потерь от частоты было проведено моделирование механического деформирования образцов в среде COMSOL Multiphysics, использующей рэлеевскую модель внутренних механических потерь. Формулы и константы задавались в окне глобальных переменных, оно представлено на рисунке 3.31. Свойства образца задавались в окне настройки подобластей, представленном на рисунке 3.32.

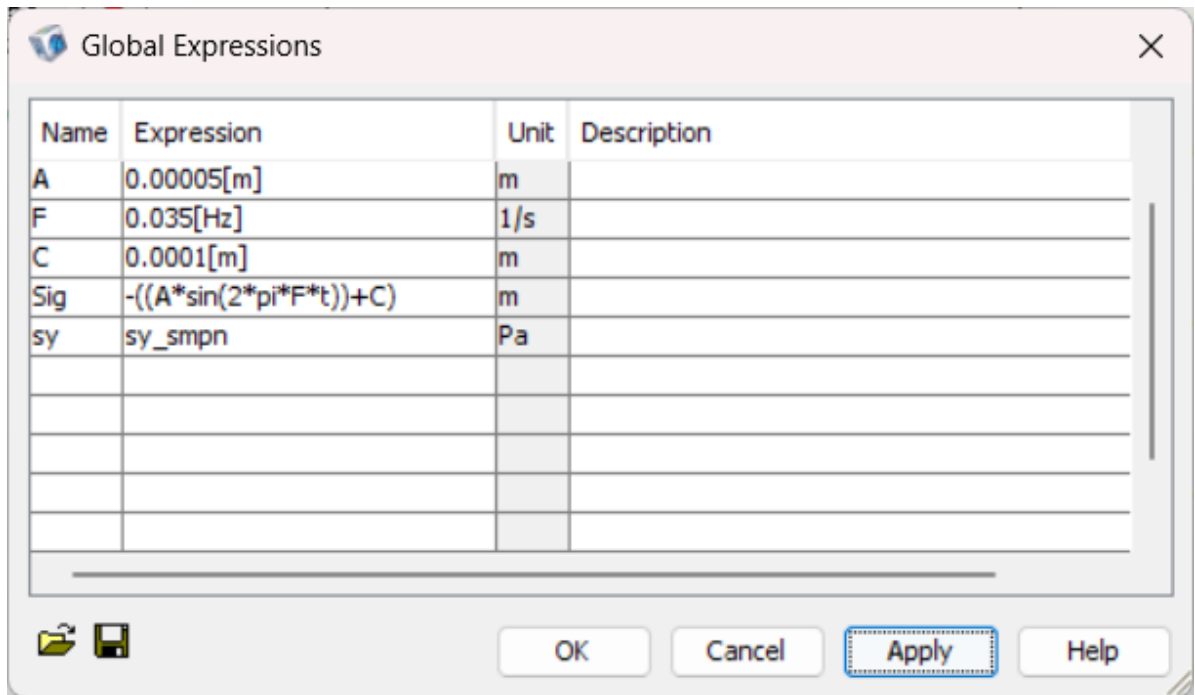


Рисунок 3.31 – Выражения в разделе глобальных переменных

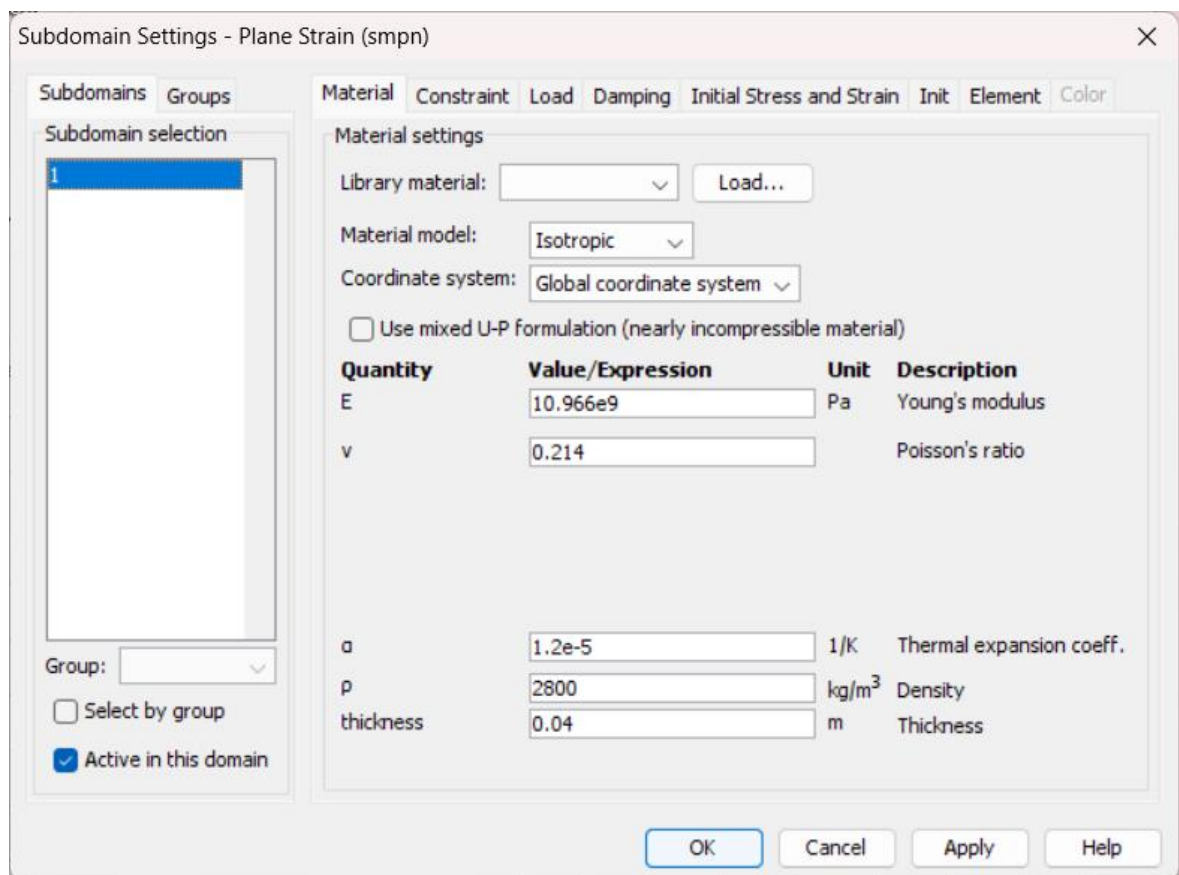


Рисунок 3.32 – Окно свойств подобласти

В качестве примера результаты моделирования циклического изгиба по трехточечной схеме образца балки известняка на частоте 0,035 Гц представлены на рисунке 3.33.

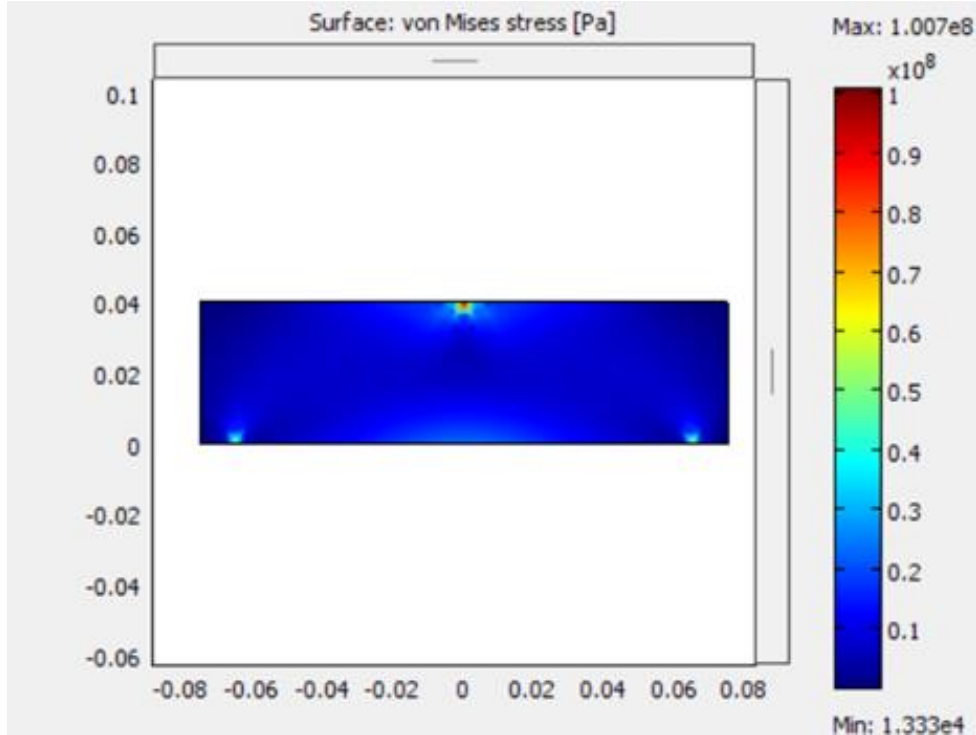


Рисунок 3.33 – Результат моделирования образца балки известняка с визуализацией напряжений по Мизесу

Результаты эксперимента всех образцов в группе одной горной породы были объединены в общую выборку, расположены в порядке возрастания частоты и сглажены функцией $\text{ksmooth}(vx,vy,b)$ вида

$$Y_i = \frac{\sum_{j=1}^n K\left(\frac{vx_i - vx_j}{b}\right)vy_j}{\sum_{j=1}^n K\left(\frac{vx_i - vx_j}{b}\right)}, \quad (3.1)$$

представляющей собой среднее взвешенное с помощью гауссова ядра вида

$$K(t) = \frac{1}{0,37\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-t^2}{2 \cdot 0,37^2}\right), \quad (3.2)$$

где Y_i – значение сглаженной величины в i -той точке; vx , vy – массивы входной и выходной экспериментальных величин; b – ширина окна сглаживания гауссова ядра. Зависимости коэффициента потерь от частоты приведены на рис. 3.34,

рис. 3.35, рис. 3.36, рис. 3.37 для известняка, доломита, мрамора и габбро соответственно.

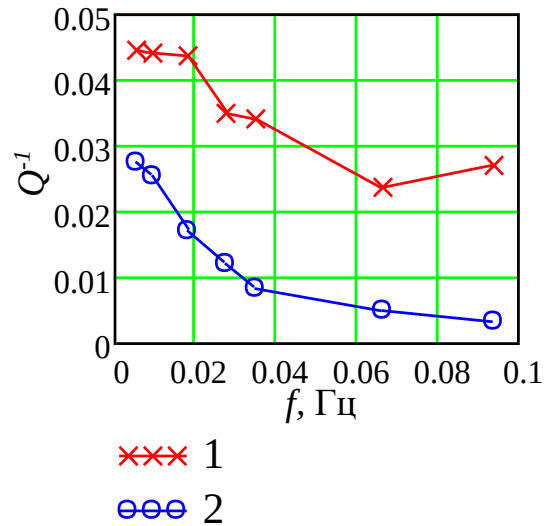


Рисунок 3.34 – Зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования для выборки образцов известняка LM (1) и модели образца известняка (2)

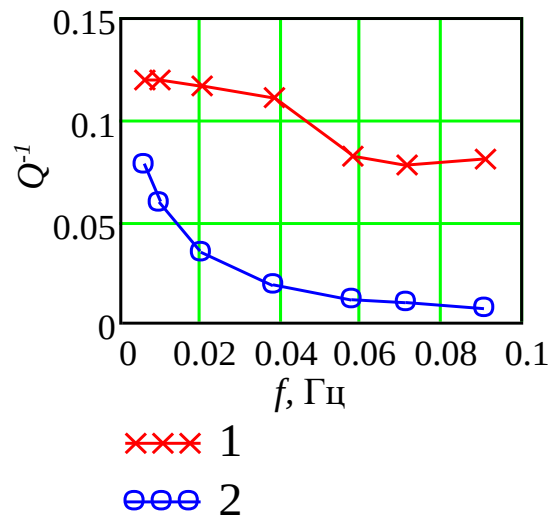


Рисунок 3.35 – Зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования для выборки образцов доломита DLM (1) и модели образца доломита (2)

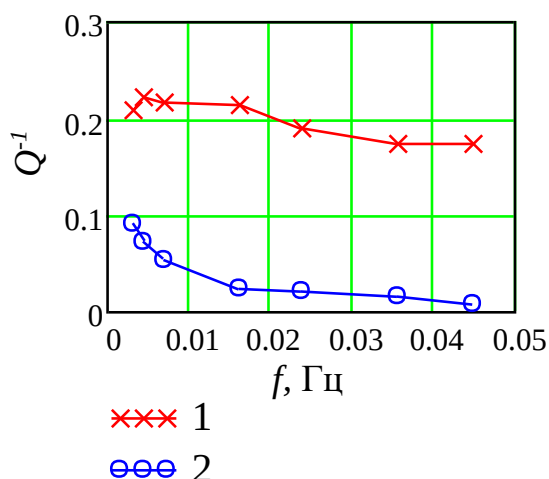


Рисунок 3.36 – Зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования для выборки образцов мрамора MRB (1) и модели образца мрамора (2)

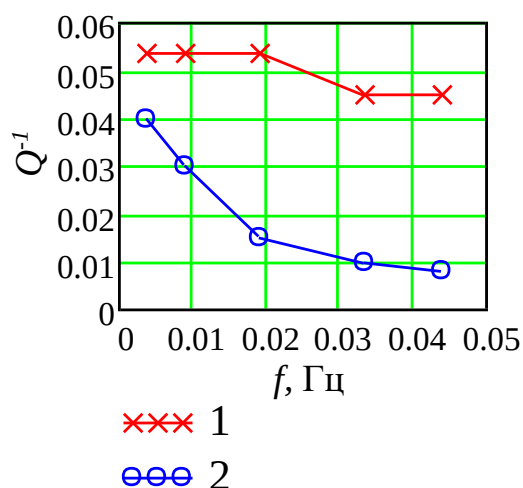


Рисунок 3.37 – Зависимости коэффициента потерь от частоты деформирования для выборки образцов габбро G (1) и модели образца габбро (2)

Экспериментальные зависимости коэффициентов потерь от частоты для всех выборок находятся выше по оси ординат, соответствующих им зависимостям полученных в результате моделирования. Это свидетельствует о превышении потерь, полученных в ходе экспериментов, над потерями, полученными в ходе моделирования, что обуславливается наличием иных видов потерь кроме вязкоупругих, описываемых рэлеевской моделью, что подтверждает **первое научное положение**.

3.5 Выводы по главе 3

В результате проведенных серий испытаний на циклический изгиб по трехточечной схеме групп образцов балок осадочных, изверженных и метаморфических пород для них были получены коэффициенты механических потерь. После чего были получены экспериментальные и аналитические зависимости коэффициентов механических потерь от частоты циклических деформаций. Сделаны следующие выводы:

1. Максимальные значения коэффициента детерминации $R^2 = 0,968$, соответствующие лучшей аппроксимации, отмечены у известняка LM. Для образцов доломита DLM отмечены минимальные значения $R^2 = 0,323$, что соответствует худшей аппроксимации. В этой связи представляет интерес более глубокий анализ полученных результатов.

2. Как следует из графиков для образцов DLM002 и MRB001 на рис. 3.12 и рис. 3.17 характерна значительная горизонтальная или близкая к горизонтали протяженность участков, наблюдаемая выше 0,05 Гц для первого и выше 0,008 Гц для второго образца.

3.Рэлеевская модель учитывает вязкоупругие потери. В то же время потери в материалах при деформировании не ограничиваются этим типом. Рэлеевская модель не учитывает наличие трения между поверхностями на микро– и макроуровнях и отвечает линейному режиму деформаций, что также является причиной различий между экспериментальными результатами и теоретической моделью, используемой для аппроксимации.

4. Коэффициенты механических потерь, полученные в ходе экспериментов по циклическому деформированию образцов балок горных пород, превышают коэффициенты, полученные в ходе моделирования для пород всех групп, что свидетельствует о наличии видов потерь, не описываемых рэлеевской моделью.

ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПОТЕРЬ ОБРАЗЦОВ-ПЛАСТИН ГАББРО

4.1 Порядок испытаний и обработки результатов

Описание образцов и установки для испытаний приведено в п. 2.2. В процессе подготовки к испытаниям на установке DMA Q800 пластины габбро размером $50 \times 10 \times 1$ мм закреплялись на концах, а средняя часть соединялась со штоком, соединенным с бесконтактным линейным двигателем, что обеспечивало смещение центральной части образца. Задавались диапазон частот и амплитуда для испытаний. Результаты регистрировались в файле и обрабатывались с помощью программы, написанной в среде MathCAD [7]. Пример записи приведен на рисунке 4.1.

Text	Granite_FDIF_t30_04_001Hz_log											
FreqTab	0.01,	0.02,	0.03,	0.04,	0.05,	0.06,	0.07,	0.08,	0.10,	0.12,	0.14,	0.16,
	0.19,	0.23,	0.27,	0.32,	0.37,	0.44,	0.52,	0.61,	0.72,	0.85,	1.00,	1.20-Multiplex
Frequency												
Sig1	Time (min)											
Sig2	Temperature (°C)											
Sig3	Storage Modulus (MPa)											
Sig4	Loss Modulus (MPa)											
Sig5	Stress (MPa)											
Sig6	Tan Delta											
Sig7	Frequency (Hz)											
Sig8	Drive Force (N)											
Sig9	Amplitude (μm)											
Sig10	Strain (%)											
Sig11	Displacement (μm)											
Sig12	Static Force (N)											
Sig13	Position (mm)											
Sig14	Length (mm)											
Sig15	Force (N)											
Sig16	Stiffness (N/m)											
Sig17	GCA Pressure (kPa gauge)											
Date	2023-02-09											
Time	13:20:40											
	20.90383	31.23818	58648.01	284.2475	2.931895	.004846669						
	.009999999	0.6724876	6.787944	.004999138	12891.09	3.01058E-6						
	12.89109	0.0000000	0.6863248	101109.4	0.0000000							

Рисунок 4.1 – Пример записи результатов испытания образцов пластин габбро

Обработка результатов предусматривала подбор коэффициентов регрессионных зависимостей по методу наименьших квадратов и осуществлялась по специально разработанной программе в среде MathCAD.

Модель 1. Первое слагаемое в модели Рэлея в обобщенной математической форме имеет вид

$$y(f) = \frac{a_1}{2\pi f}, \quad (4.1)$$

где y – коэффициент потерь Q^{-1} , f – частота колебаний, a_1 – коэффициент модели Рэлея α_{dM} .

Модель 2 представляет собой обратную зависимость в сумме с постоянной составляющей в области нижних частот, описываемую функцией

$$y(f) = a_0 + \frac{a_1}{2\pi f}, \quad (4.2)$$

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

Модель 3 – это полная рэлеевская модель с постоянной составляющей следующего вида

$$y(f) = a_0 + \frac{a_1}{2\pi f} + a_2 2\pi f, \quad (4.3)$$

где коэффициенты a_1 и a_2 являются соответствующими коэффициентами рэлеевской модели.

4.2 Результаты обработки экспериментальных данных и их особенности

Результаты аппроксимации экспериментальных данных по формуле (4.1), приведенные для примера на рисунке 4.2, демонстрируют существенное отличие частотной зависимости коэффициента потерь Q^{-1} от зависимости Рэлея (2.2) для низкочастотной области. Обратная зависимость (линия 2 на графике на

рисунке 4.2) в двойном логарифмическом масштабе имеет вид прямой. Кривая 1 экспериментальных данных имеет вид, отличный от прямой линии.

Ввиду значительного несоответствия экспериментальных и модельных данных эта модель была снята с рассмотрения.

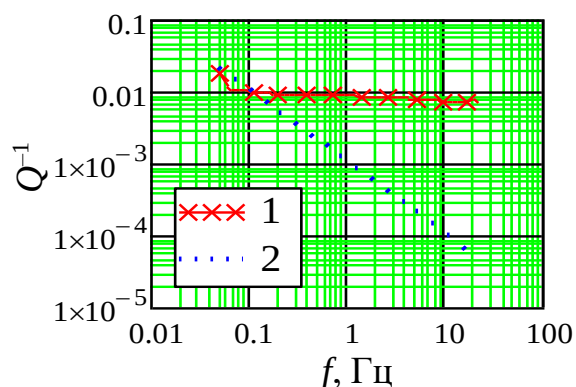
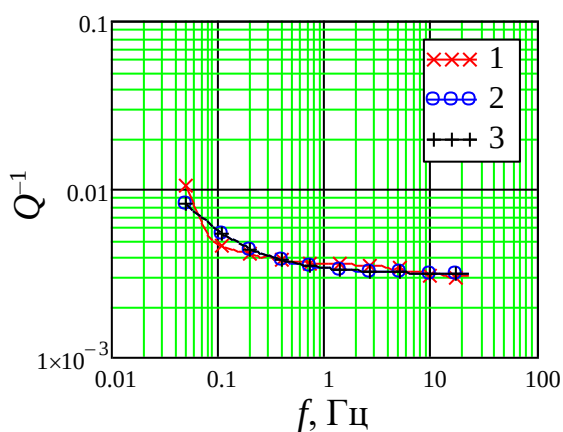


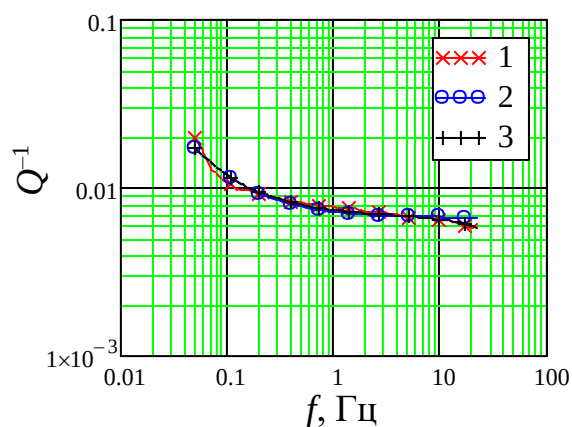
Рисунок 4.2 – Частотные зависимости коэффициента потерь Q^{-1} :
экспериментальная (кривая 1) и зависимость по формуле (4.1) (кривая 2), Q^{-1} –
коэффициент потерь, f – частота

Физически этот факт можно интерпретировать тем, что кроме упруго-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.

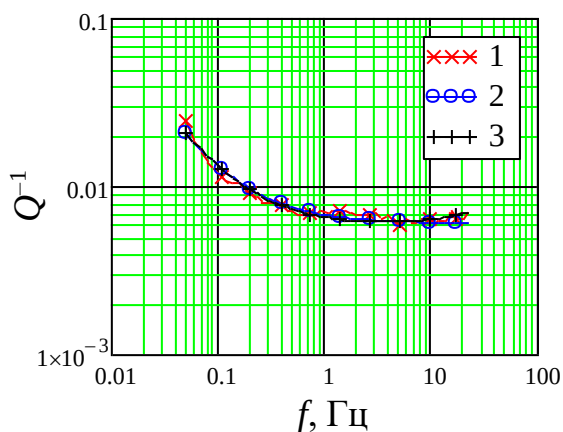
На рисунке 4.3 представлены зависимости коэффициента потерь от частоты воздействия, полученные на четырех образцах, а также результаты аппроксимации по формулам (4.2) и (4.3).



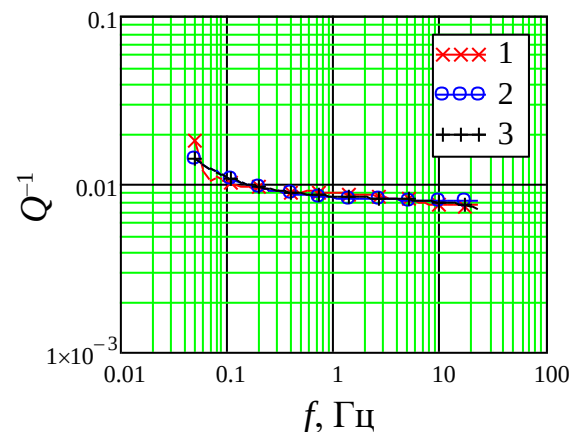
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 4.3 – Зависимости коэффициента потерь Q^{-1} от частоты для образцов GBR01 (а), GBR02 (б), GBR03 (в), GBR04 (г) экспериментальные (1) и аппроксимированные функциями вида (4.2) (номер 2 на графиках) и (4.3) (номер 3 на графиках). Q^{-1} – коэффициент потерь, f – частота

В таблице 4.1 показаны результаты аппроксимации частотных зависимостей коэффициента Q^{-1} .

Таблица 4.1 – Результаты аппроксимации частотных зависимостей коэффициента Q^{-1}

Образец	Модель 1, (4.1)	Модель 2, (4.2)		R^2	Модель 3, (4.3)			R^2
	a_1	a_0	a_1		a_0	a_1	a_2	
GBR01	$7,464 \cdot 10^{-3}$	$6,667 \cdot 10^{-3}$	$3,347 \cdot 10^{-3}$	0,933	$6,935 \cdot 10^{-3}$	$3,191 \cdot 10^{-3}$	$-7,573 \cdot 10^{-6}$	0,942
GBR02	$3,568 \cdot 10^{-3}$	$3,162 \cdot 10^{-3}$	$1,616 \cdot 10^{-3}$	0,863	$3,174 \cdot 10^{-3}$	$1,609 \cdot 10^{-3}$	$-3,602 \cdot 10^{-7}$	0,863
GBR03	$8,361 \cdot 10^{-3}$	$6,100 \cdot 10^{-3}$	$4,594 \cdot 10^{-3}$	0,946	$5,800 \cdot 10^{-3}$	$4,769 \cdot 10^{-3}$	$8,45 \cdot 10^{-6}$	0,952
GBR04	$6,945 \cdot 10^{-3}$	$8,063 \cdot 10^{-3}$	$1,966 \cdot 10^{-3}$	0,771	$8,321 \cdot 10^{-3}$	$1,816 \cdot 10^{-3}$	$-7,277 \cdot 10^{-6}$	0,791

Как показывают результаты таблицы 4.1, следует выбрать модель 2, поскольку модель 3 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, что подтверждает **второе научное положение**.

В модели 2 коэффициент a_1 представляет собой коэффициент α_{dM} рэлеевской модели (2.2). Коэффициент a_0 физически может быть интерпретирован как составляющая коэффициента потерь, обусловленная «сухим» трением.

Величину упруго-вязких потерь и их вклад в общий баланс в зависимости от частоты можно рассчитать по формуле

$$Q_s^{-1} = \frac{\alpha_{dM}}{2\pi f} = \frac{a_1}{2\pi f}, \quad (4.4)$$

где Q_s^{-1} – вязкие потери, f – частота, α_{dM} – коэффициент части рэлеевской модели обратно пропорциональной частоте.

При допущении, что потери вида «сухое трение» не зависят от частоты и определяются коэффициентом a_0 в формуле (4.2), суммарные потери на частоте f составят

$$Q^{-1} = Q_s^{-1} + Q_c^{-1} = a_0 + \frac{a_1}{2\pi f}, \quad (4.5)$$

где Q^{-1} – общие потери, Q_s^{-1} – вязкие потери, Q_c^{-1} – потери вида «сухое трение».

Относительная доля упруго-вязких потерь составит

$$\delta = \frac{Q_s^{-1}}{Q_s^{-1} + Q_c^{-1}}, \quad (4.6)$$

где δ – относительная доля упруго-вязких потерь.

На рисунке 4.4 представлены графики зависимостей относительной доли упруго-вязких потерь δ от частоты воздействий для исследованных образцов.

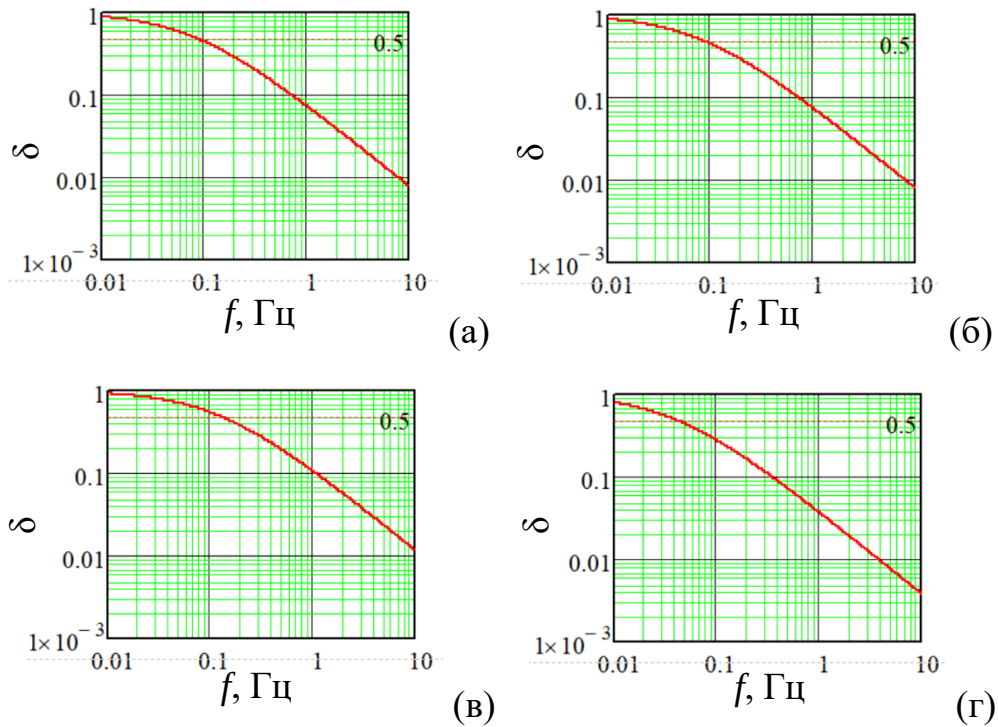


Рисунок 4.4 – Графики результатов расчета по формуле (4.6), иллюстрирующие долю упруго-вязких потерь в их общей совокупности для образцов GBR01 (а), GBR02 (б), GBR03 (в), GBR04 (г). δ – относительная доля упруго-вязких потерь, f – частота

На этих графиках для оценки доли упруго-вязких потерь проведены горизонтальные линии на уровне 0,5, превышение графиков над которыми означает большую долю упруго-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 по сравнению с потерями вида «сухое трение», находится в диапазоне от 0,04 до 0,14 Гц, чем подтверждается **третье научное положение**.

4.3 Влияние преобладающего вида потерь на ориентацию гистерезисной петли

В среде COMSOL Multiphysics было проведено численное моделирование изгиба пластины. Схема закрепления и результаты расчета показаны на рис. 4.5. В процессе моделирования рассчитывалась силовая 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».

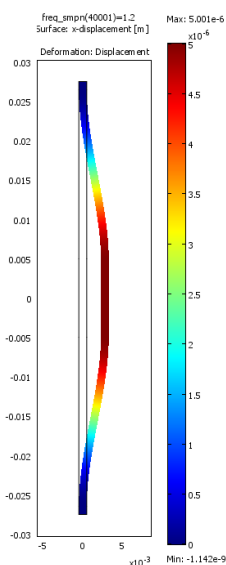


Рисунок 4.5 – Схема численной модели и шкала горизонтальных смещений

На рисунке 4.6 показаны положения гистерезисной петли при преобладании потерь вида «сухое трение» (а), вязкого трения (б), а также средней части петли, по которой определялись параметры F' и F'' формулы (2.3). На этом рисунке z – смещения центра образца относительно его оси; q – силовая реакция образца на смещения.

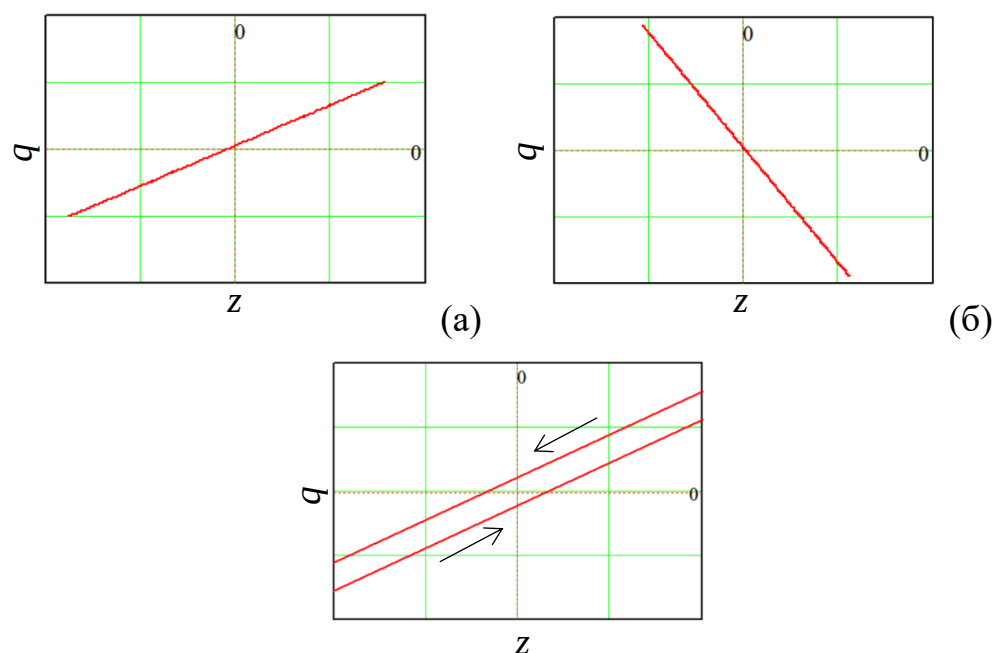


Рисунок 4.6 – Иллюстративные графики наклонов гистерезисных петель при частотах воздействия 1, 10, 20 Гц – возрастание силы с увеличением смещения центра пластины (а), 0,1 и 0,01 Гц – уменьшение силы с увеличением смещения (б), а также средняя часть петли гистерезиса в увеличенном виде (в). z – смещения центра образца относительно его оси; q – силовая реакция образца на смещения

Изменение преобладающего вида потерь при приходе через граничную частоту приводит к изменению фазовых соотношений между гармоническими нагрузкой и смещением, что, в свою очередь, приводит, к изменению ориентации гистерезисной петли. Этот вывод подтверждает **третье научное положение**.

4.4 Выводы по главе 4

В результате экспериментов по циклическому деформированию образцов пластин габбро были получены зависимости коэффициента механических потерь от частоты в диапазоне частот от 0,05 до 20 Гц. Были сделаны следующие выводы:

1. Аппроксимация экспериментальных данных обратно пропорциональной частоте частью рэлеевской модели в логарифмическом масштабе имеет вид прямой и существенно различается с экспериментальной зависимостью, что объясняется наличием кроме упруго-вязких потерь, описываемых рэлеевской моделью, потерь фрикционных.

2. Изменение внутренних механических потерь в горных породах в инфразвуковом диапазоне циклических воздействий может быть описано суммой обратно пропорциональной частоте части рэлеевской модели, характеризующей вязкие потери, и постоянной величины для фрикционных потерь, что подтверждает **второе научное положение**.

3. Для образцов пластин габбро определены частоты, находящейся в зависимости от конкретного образца в диапазоне от 0,04 до 0,14 Гц, ниже которых преобладают упруго-вязкие потери, а выше потери вида «сухое трение». Изменение преобладающего вида потерь приводит к изменению фазовых соотношений между гармоническими нагрузкой и смещением, что влияет на положение гистерезисной петли. Результаты моделирования подтверждают гипотезу о смене знака оси гистерезисной петли при превышении доли упруго-вязких потерь над долей потерь вида «сухое трение», а также **третье научное положение**.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей собой законченную научно-квалификационную работу, на основании выполненных автором экспериментальных исследований содержится решение актуальной научной задачи установления взаимосвязей между частотой механических воздействий и коэффициентом потерь на частотах ниже 0,1 Гц для горных пород различных типов и происхождения при различных режимах их циклического деформирования, что имеет важное значение для развития методов геомеханики горных пород и массивов.

Основные научные результаты работы и выводы, полученные лично автором, заключаются в следующем.

1. Для горных пород различных генотипов установлено, что в области инфразвуковых частот для них характерно возрастание коэффициента потерь Q^{-1} при уменьшении частоты.

2. Испытания образцов-балок при изгибе в диапазоне частот 0,0024 – 0,104 Гц показало широкий диапазон изменения коэффициента детерминации R^2 в диапазоне от 0,32 до 0,97 при аппроксимации экспериментальных зависимостей коэффициента потерь Q^{-1} рэлееской моделью упруго-вязких потерь, включающей сумму двух составляющих – прямо и обратно пропорциональных частоте воздействия. Основной причиной малых значений R^2 являются наличие не только упруго-вязких потерь, но и механических потерь других видов, что свидетельствует о неудовлетворительном соответствии рэлееской модели упруго-вязких потерь экспериментальным результатам.

3. Зависимость внутренних механических потерь в горных породах от частоты в инфразвуковом диапазоне циклических воздействий может быть представлена суммой обратно пропорциональной функции, характеризующей вязкие потери, и постоянной величины, описывающей потери вида «сухое

трение», при этом установленная закономерность в части упруго-вязких потерь соответствует рэлеевской модели, описывающей их увеличение при уменьшении частоты воздействий.

4. Для исследованных типов горных пород 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, выше этой частоты преобладают потери вида «сухое трение», а ниже – вязкие потери.

5. 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», в области нижних частот преобладают вязкие потери и петля имеет разную ориентацию.

6. По результатам исследований разработаны «Методические рекомендации для оценки коэффициента потерь в горных породах различного генезиса при изгибе образца балки по трехточечной схеме», которые переданы в заинтересованные организации, где приняты к практическому использованию.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Горное дело. Терминологический словарь / Л. И. Барон, Г. П. Демидюк, Г. Д. Лидин и др. 3-е изд., перераб и доп.– М.: Недра, 1981.– 479 с.
- 2 ГОСТ Р ИСО 5577–2009. Контроль неразрушающий. Ультразвуковой контроль. Словарь. М.: Стандартиформ. –2011.– 30 с.
- 3 ГОСТ 16821-91. Сейсморазведка. Термины и определения. М.: Изд. стандартов. – 1992.– 28 с.
- 4 ГОСТ Р 56801–2015. (ИСО 6721-1:2011). Пластмассы. Определение механических свойств при динамическом нагружении. Часть 1. Общие принципы. М.: Стандартиформ. 2016.– 23 с.
- 5 ГОСТ 34081–2017. Здания и сооружения, Определение параметров основного тона собственных колебаний. М.: Стандартиформ.– 2017.– 17 с.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 Wang H., He M., Zhu J., Guo S., Chen Y., Li N. Experimental investigation of linear damping characteristics on granite and red sandstone under dynamic cyclic loading // European Journal of Environmental and Civil Engineering.– 2022.– Vol. 26.– №3. DOI: 10.1080/19648189.2021.1890230.
- 9 Головин И. С. Неупругость, внутреннее трение и механическая спектроскопия металлических материалов. М.: Изд. Дом НИТУ «МИСИС», 2020.– 284 с.

- 10 Blanter M. S., Golovin I. S., Neuhäuser H., Sinning H. R. Internal friction in metallic materials: a handbook, in: Springer Ser. Mater. Sci, 2007, P. 901–935.
- 11 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.– №7.– P. 1815–1821. DOI: 10.1007/BF02651931.
- 12 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.
- 13 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. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.165806.
- 14 Duffy W., Umstattd R. Acoustic quality factor of niobium and vanadium at low temperatures // Journal of Applied Physics.– 1994.– Vol. 75.– P. 4489–4495. DOI: 10.1063/1.355939.
- 15 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.– P. 13556–13571. DOI: 10.1007/s10853-025-11165-1.
- 16 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 // Mater. Lett.– 2021.– Vol. 300. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.130162.
- 17 Trojanová Z., Lukáč P., Riehemann W., Mordike B. L. Study of relaxation of residual internal stress in Mg composites by internal friction // Materials Science and

- Engineering: A.– 2002.– Vol. 324.– P. 122–126. DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01293-X.
- 18 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.– P. 127822. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127822.
 - 19 Göken J. Temperature-dependent damping of the tonewood spruce // *Journal of Alloys and Compounds*.– 2021.– Vol. 856.– P. 158182. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.158182.
 - 20 Trojanová Z., Lukáč P., Rudajevová A. (2004). Internal friction in a QE22 hybrid composite // *Materials Science and Engineering: A*.– 2004.– Vol. 370.–P. 542–545. DOI: 10.1016/j.msea.2003.08.113.
 - 21 Mielczarek A., Trojanová Z., Riehemann W., Lukáč P. (2006). Influence of mechanical cycling on damping behaviour of short fibre-reinforced magnesium alloy QE22 // *Materials Science and Engineering: A*.– 2006.– Vol. 442.– № 1.– P. 484–487. DOI: 10.1016/j.msea.2006.02.228.
 - 22 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.
 - 23 Dhotare S. A., Murali Mohan V., Chikurdekar P. R. Effect of damping in layered beam using structural joints // *International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)*. India.– 2017.– P. 1–7. DOI: 10.1109/ICNTE.2017.7947976.
 - 24 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.– № 1.– P 100480. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100480.
 - 25 Меркулова В. М. Изменение коэффициента затухания ультразвука в горных породах после нагрева // *Акустический журнал. АН СССР*. – 1973. – № 6. – С. 920–922.

- 26 Меркулова В. М., Пигулевский Е. Д., Цаплиев В. М. Измерение поглощения звука в горных породах при одноосном сжатии // Изв. АН СССР, Физика Земли. – 1972. – № 3.
- 27 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.– P. 81–87. DOI: 10.1134/1.1537392.
- 28 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.– № B10. DOI: 10.1029/2002JB002135.
- 29 Müller T. M., Gurevich B., Lebedev M. Seismic wave attenuation and dispersion resulting from wave-induced flow in porous rocks - A review // In Geophysics.– 2010.– Vol. 75.– № 5. DOI: 10.1190/1.3463417.
- 30 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. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.12.010.
- 31 Khaledi K., Mahmoudi E., Datcheva M., Schanz T. Stability and serviceability of underground energy storage caverns in rock salt subjected to mechanical cyclic loading // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.– 2016.– Vol. 86.– P. 115–131. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.04.010.
- 32 Shkuratnik V. L., Danilov G. V. Investigation into the influence of stresses on the velocities of elastic waves in the vicinity of an elliptical mine working // Journal of Mining Science.– 2005.– Vol. 41.– № 3.– P. 195–201. DOI: 10.1007/s10913-005-0083-3.
- 33 Tittmann B., Abdel-Gawad M., Housley. Elastic velocity and Q factor measurements on Apollo 12, 14, and 15 rocks // Proceedings of 3rd Lunar Scientific Conference.– 1972.

- 34 Wassermann, J., Senfaute, G., Amitrano, D., & Homand, F. (2009). Evidence of dilatant and non-dilatant damage processes in oolitic iron ore: P-wave velocity and acoustic emission analyses // *Geophysical Journal International*.– 2009.– Vol. 177.– № 3.– P. 1343–1356. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2008.04017.x.
- 35 Еременко А. А., Марысюк В. П., Конурин А. И., Дарбинян Т. П., Самосенко И. В. Оценка сейсмической активности массива горных пород при отработке полиметаллического месторождения в сложных горных и гидрогеологических условиях // *ФТПРПИ*.– 2024. № 4.– С. 52–57. DOI: 10.15372/FTPRPI20240404.
- 36 Кочарян Г. Г. Геомеханика разломов. М.: Издательство ГЕОС, 2018.– 424 с.
- 37 Rudziński Ł., Mirek K., Mirek J. Rapid ground deformation corresponding to a mining-induced seismic event followed by a massive collapse // *Natural Hazards*.– 2019.– Vol. 96.– № 1.– P. 461–471. DOI: 10.1007/s11069-018-3552-0.
- 38 Jiao Y. Y., Wu K., Zou J., Zheng F., Zhang X., Wang C., Li X., Zhang C. On the strong earthquakes induced by deep coal mining under thick strata-a case study // *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*.– 2021.– Vol. 7.– № 4. DOI: 10.1007/s40948-021-00301-1.
- 39 Yang J., Lu W., Jiang Q., Yao C., Jiang S., Tian L. (2016). A Study on the Vibration Frequency of Blasting Excavation in Highly Stressed Rock Masses // *Rock Mechanics and Rock Engineering*.– 2016.– Vol. 49.– №. 7.– P. 2825–2843. DOI: 10.1007/s00603-016-0964-6.
- 40 Yari M., Bagherpour R. Implementing Acoustic Frequency Analysis for Development the Novel Model of Determining Geomechanical Features of Igneous Rocks Using Rotary Drilling Device // *Geotechnical and Geological Engineering*.– 2018.– Vol. 36.– №. 3.– P. 1805–1816. DOI: 10.1007/s10706-017-0433-3.
- 41 Зверева А.С., Собисевич А.Л., Габсатарова И.П. Добротность геофизической среды восточной зоны Северного Кавказа // *Физика Земли*.– 2024.– № 1. – С. 1–17. 10.31857/S0002333724010091.

- 42 Добрынина А. А., Чечельницкий В. В., Саньков В. А., Черных Е. Н. Добротность литосферы и очаговые параметры землетрясений Байкальской рифтовой системы. Saarbrücken: LAP LAMBERT.–2014.– 182 с.
- 43 Добрынина А.А., Чечельницкий В.В., Саньков В.А. Сейсмическая Добротность литосферы юго-западного фланга байкальской рифтовой системы // Геология и геофизика.– 2011.– Т. 52.– № 5.– С. 712–724.
- 44 Fuenkajorn K., Phueakphum D. (2010). Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt // Engineering Geology.– 2010.– Vol. 112.– № 1.– P. 43–52. DOI: 10.1016/j.enggeo.2010.01.002.
- 45 Yang J., Ishikawa T., T. Lin, Tokoro T., Nakamura T., Momoya Y. Influence of aging on hydro-mechanical behavior of unsaturated ballast // Transportation Geotechnics.– 2021.– Vol. 27.– P. 100480. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100480.
- 46 Kosilov A. T. Dissipative properties of materials with thermoelastic martensite conversion // Soviet Physics Journal.– 1985.– Vol. 28.– P. 380–389. DOI: 10.1007/BF00892271.
- 47 Krishnan R. V., Delaey L., Tas H., and Warlimont H. Thermoplasticity, pseudoelasticity and the memory effects associated with martensitic transformations - Part 2 The macroscopic mechanical behaviour // Journal of Materials Science.– 1974.– Vol. 9.– P. 1536–1544. DOI: 10.1007/BF00552940.
- 48 Schröder E., Sievi A. New measurement method for bending loss factor and the bending stiffness: Test method // Proceedings of Forum Acusticum.– 2023. DOI: 10.61782/fa.2023.0878.
- 49 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.– № 3. <https://doi.org/10.1122/8.0000207>.
- 50 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.— № 2.— P. 164194. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.164194.
- 51 Karato, S.I. Importance of anelasticity in the interpretation of seismic tomography // Geophysical Research Letters.— 1993.— Vol. 20.— № 15.— P. 1623–1626. DOI: 10.1029/93GL01767.
- 52 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.— № 5.— P. 1203–1230. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.03.012.
- 53 Tang J., Fang B., Lan Y. Analysis of rock nonlinear deformation behavior with loading and unloading hysteresis effect. Shiyou Diqiu Wuli Kantan/Oil // Geophysical Prospecting.— 2014.— Vol. 49.— № 6.— P. 1131–1137.
- 54 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.— № 2.— P. 4066–4073.
- 55 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.
- 56 Morozov I. B., Deng W., Cao D. Mechanical analysis of viscoelastic models for Earth media // Geophysical Journal International.— 2020.— Vol. 220.— № 3.— P. 1762–1773. DOI: 10.1093/gji/ggz445.
- 57 Dill E. H. Method for Mechanics of Solids with ANSYS Applications // London, New York: CRC Press.— 500 p.
- 58 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.— № 4.— P. 935–957. DOI: 10.1002/eqe.3598.

- 59 Rayleigh B. The theory of sound, volume 2. – Reprinted: Dover, New York, 1945. – 528 p. Перевод: Стретт (Лорд Рэлей), Дж. В. Теория звука: Т. 2. – М.: Гос. изд. технико теоретической литературы, 1955. – 475 с.
- 60 Liu M., Gorman D. G. (1995). Formulation of Rayleigh damping and its extensions // Computers and Structures.– 1995.– Vol .57. № 2.– P. 277–285. DOI: 10.1016/0045-7949(94)00611-6.
- 61 Cronin, D. L. (1990). Eigenvalue and eigenvector determination for nonclassically damped dynamic systems // Computers and Structures.– 1990. Vol. 36.– № DOI: 10.1016/0045-7949(90)90182-2.
- 62 Cai C., Zheng H., Khan M. S., Hung K. C. Modeling of Material Damping Properties in ANSYS // CADFEM Users' Meeting & ANSYS Conference. Friedrichshafen, Germany, October 9–11, 2002, 16 p.
- 63 Fangping Yan, Hao Lu. Dynamics of a cross beam with a straight crack in a mining linear vibrating screen // Heliyon. 2024.– Volume 10.– № 15, 1, e35017. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35017>.
- 64 Ghahari F.Sargsyan K.Taciroglu E. Quantification of modeling uncertainty in the Rayleigh damping model // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2024.–Vol. 53.– P. 2950–2956. DOI: 10.1002/eqe.4143/
- 65 Cruz C., Miranda E. Evaluation of the Rayleigh damping model for buildings // Engineering Structures. 2017.– Vol. 138.– N. 1.–, P. 324–336.
- 66 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.– № 1. DOI: 10.1007/s40789-025-00802-4.
- 67 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.– № 6.– P. 527–539. DOI: 10.1680/jgeot.21.00198.

- 68 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.– № 4.– P. 1933–1947. <https://doi.org/10.2118/218406-PA>.
- 69 Winkler K. W., Murphy W. F. Acoustic Velocity and Attenuation in Porous Rocks // Rock Physics & Phase Relations: A Handbook of Physical Constants.– 1995.– P. 20–34. DOI: 10.1029/rf003p0020.
- 70 Erenburg A. I., Zakharov A. Y., Leont'eva, A. V., Prokhorov, A. Y. Low-frequency internal friction as express-method for identification of cryocrystals in pores of the solids // Cryogenics.– 2016.– Vol. 78. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2016.06.002.
- 71 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. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104901.
- 72 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.– № 1. DOI: 10.1007/s40789-023-00618-0.
- 73 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.– № 1. DOI: 10.1007/s40948-023-00574-8.
- 74 Mashinskii E. I. (2021). Amplitude-dependent hysteresis of wave velocity in rocks in wide frequency range: An experimental study // Mining Science and Technology.– 2021.– Vol. 6.– № 1.– P. 23–30. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-23-30>
- 75 Машинский Э.И. Аномалии затухания амплитуды акустических волн малой интенсивности в горных породах // ФТПРПИ. – 2008. – № 5. С. 24–31.
- 76 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.— № 3. DOI: 10.16285/j.rsm.2023.1063.
- 77 Dellepiane 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.— №1. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu148>.
- 78 Voznesenskii A. S., Kutkin Y. O., Krasilov M. N., Komissarov A. A. Predicting fatigue strength of rocks by its interrelation with the acoustic quality factor // *International Journal of Fatigue*.— 2015.— Vol. 77. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2015.02.012.
- 79 Voznesenskii A. S., Kutkin Y. O., Krasilov M. N., Komissarov A. A. (2016). The influence of the stress state type and scale factor on the relationship between the acoustic quality factor and the residual strength of gypsum rocks in fatigue tests // *International Journal of Fatigue*.— 2016.— Vol. 84. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2015.11.016
- 80 Peselnick L., Zietz I. Internal friction of fine-grained limestones at ultrasonic frequencies // *Geophysics*.— 1959.— Vol. 24. № 2. P. 258–296. <https://doi.org/10.1190/1.1438583>.
- 81 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.— № 1. DOI: 10.1007/s40789-023-00564-x.
- 82 Pang S., Stovas A., Xing H. (2021). Frequency-dependent anisotropy in partially saturated porous rock with multiple sets of mesoscale fractures // *Geophysical Journal International*.— 2021. Vol. 227.— №1. DOI: 10.1093/gji/ggab204.
- 83 Скоркина А. А., Гусев А. А. Определение набора характерных частот очаговых спектров для субдукционных землетрясений Авачинского залива (Камчатка) // *Геология и геофизика*.— 2017.— Т. 58.— № 7.— С. 1057–1068.

- 84 Дреннов А. Ф., Джурик В. И., Серебренников С. П., Брыжак Е. В., Дреннова Н. Н. Основные параметры спектров ускорений при землетрясениях для байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика.– 2015.– Т. 56ю– № 5.– С. 984–994.
- 85 Mogi Y., Nakamura N., Ota A. Application of extended Rayleigh damping model to 3D frame analysis // Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ).– 2022.– Vol. 6. № 1.– P. 738–748, DOI: 10.3130/aijs.86.738.
- 86 Кочарян Г. Г., Кишкина С. Б., Новиков В. А., Остапчук А. А. Медленные перемещения по разломам: параметры, условия возникновения, перспективы исследований // Геодинамика и тектонофизика.– 2014.– Т. 5.– №. 4.– С. 863–891. DOI:10.5800/GT-2014-5-4-0160.
- 87 Lipovsky B. P., Dunham E. M. Tremor during ice-stream stick slip // The Cryosphere Discussions.– 2016.– Vol. 10.– № 5.– P. 385–399. DOI:10.5194/tc-10-385-2016.
- 88 Черепанцев А. С. Аппаратурно-методические особенности регистрации сверхмалых сейсмических сигналов в широкой полосе частот // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле.– 2014.– № 1.– С. 50–57.
- 89 Коган С. Я. Сейсмическая энергия и методы ее определения. М.: Наука, 1975.– 152 с.
- 90 B. Rayleigh. The theory of sound, volume 2. Reprinted: Dover, New York, 1945.– 528 p.
- 91 Бидерман В. Л. Теория механических колебаний.– М.: Высшая школа, 1980.– 408 с.
- 92 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.

- 93 Salyukov V.S., Kutkin Y.O., Voznesenskii A.S. Internal mechanical losses in rocks of different genesis, Mendeley Data, V1 [Электронный ресурс].– URL: <https://data.mendeley.com/datasets/83jvs6ynrn/1> (Дата обращения 17.05.2025). DOI: 10.17632/83jvs6ynrn.1.

Приложение А

Методические рекомендации по оценке коэффициента механических потерь в горных породах различного генезиса при изгибе образца балки по трехточечной схеме

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования**

«Национальный исследовательский технологический университет МИСИС»

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке и инновациям

НИТУ МИСИС, д.т.н., проф.

_____ М.Р. Филонов

«__» _____ 2026 г.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНКЕ
КОЭФФИЦИЕНТА МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ГОРНЫХ
ПОРОДАХ РАЗЛИЧНОГО ГЕНЕЗИСА ПРИ ИЗГИБЕ ОБРАЗЦА
БАЛКИ ПО ТРЕХТОЧЕЧНОЙ СХЕМЕ**

Москва, 2026

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Аспирант каф. ФизГео

В. С. Салюков

Профессор каф. ФизГео,

д. т. н.

А. С. Вознесенский

Методические рекомендации рассмотрены на заседании кафедры ФизГео
«26» мая 2026 г, протокол № 9.

Заведующий кафедрой ФизГео,

д. ф.-м. наук, доц.

В. А. Винников

Уч. секретарь

А. С. Пугач

СОДЕРЖАНИЕ

<u>ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ</u>	92
<u>ВВЕДЕНИЕ</u>	93
<u>1 Общие положения</u>	94
<u>2. Сущность метода определения коэффициента механических потерь</u>	96
<u>3 Образцы, испытательная установка и схемы нагружения</u>	97
<u>4 Примеры испытаний образца и обработки данных</u>	100
<u>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</u>	103

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1. Комплексный модуль упругости M^* , Па – Отношение динамического напряжения к динамической деформации вязкоупругого материала, который подвергают воздействию синусоидальных колебаний.

2. Модуль упругости M' , Па – Действительная часть комплексного модуля упругости M^* . Примечание. Модуль упругости пропорционален максимальной энергии, запасенной во время цикла нагружения, и является мерой жесткости вязкоупругого материала.

3. Модуль потерь M'' , Па – Мнимая часть комплексного модуля M^* . Примечание. Модуль потерь пропорционален энергии, которая рассеивается (теряется) во время цикла нагружения.

4. Абсолютное значение комплексного модуля $|M|$, Па – среднеквадратичное значение модуля упругости и модуля потерь.

5. Фазовый угол δ , радианы – разность фаз между динамическим напряжением и динамической деформацией в вязкоупругом материале, подвергнутом воздействию синусоидальных колебаний.

6. Тангенс угла механических потерь, коэффициент механических потерь $\operatorname{tg} \delta$ – отношение модуля потерь к модулю упругости, вычисляемое по формуле, обозначается также, как Q^{-1} .

7. Петля упругого гистерезиса – отображение напряжения как функции деформации вязкоупругого материала под действием синусоидальных колебаний.

ВВЕДЕНИЕ

Внутренние механические потери относятся к физическим свойствам горных пород, которые наряду с упругими, пластическими, прочностными свойствами должны учитываться в ряде расчетов и моделей. Они имеют большое значение при оценке сейсмического действия землетрясений и горных ударов, промышленных взрывов, вибрационных источников на породные массивы вокруг выработок и на подземные сооружения. Их величина оценивается либо добротностью Q , либо коэффициентом механических потерь Q^{-1} (обратной добротностью). Под действием внутренних механических потерь материалы, подвергнутые циклическим нагрузкам, поглощают и рассеивают энергию. При этом на диаграмме напряжения-деформации возникает петля механического гистерезиса, площадь которой характеризует энергию, затраченную на деформирование.

Внутренние механические потери и, в частности, явление механического гистерезиса широко исследуются в нашей стране для различных материалов. Методы оценки коэффициента потерь при механических воздействиях на полимерные материалы приведены в ГОСТ Р 56801–2015. Однако методических рекомендаций для оценки коэффициента механических потерь на образцах-балках горной породы, которые можно было бы внедрять на горнопромышленных предприятиях, не существует.

1 Общие положения

При воздействии на материал синусоидальных колебаний возникает фазовый сдвиг $\delta/2\pi f$ между напряжением σ и деформацией ε [1], показанный на рисунке 1.

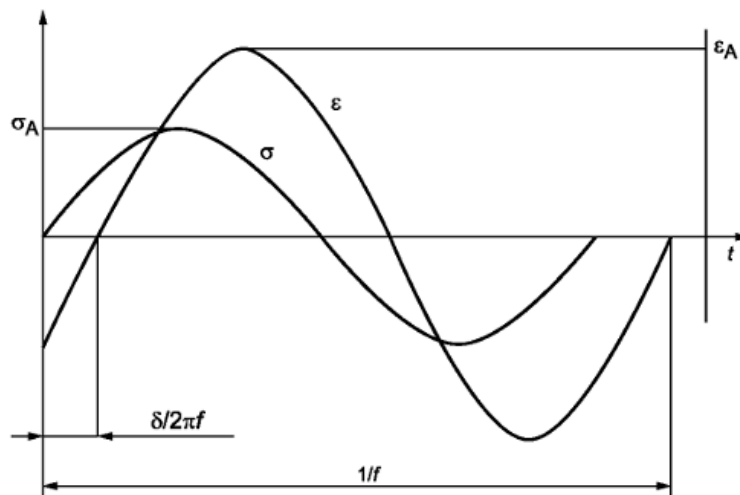


Рисунок 1 – Фазовый сдвиг $\delta/2\pi f$ между напряжением σ и деформацией ε в материале под действием синусоидальных колебаний (σ_A и ε_A – соответствующие амплитуды, f – частота)

Связь между модулем упругости M' , модулем потерь M'' , фазовым углом δ и абсолютным значением $|M|$ комплексного модуля M^* , отображена на рисунке 2. Таким образом коэффициент механических потерь можно Q^{-1} можно выразить формулой:

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

где Q^{-1} – коэффициент механических потерь, M'' – модуль потерь, M' – модуль упругости.

Вследствие фазового сдвига между напряжением σ и деформацией ε формируется петля упругого гистерезиса, показанная на рисунке 3.

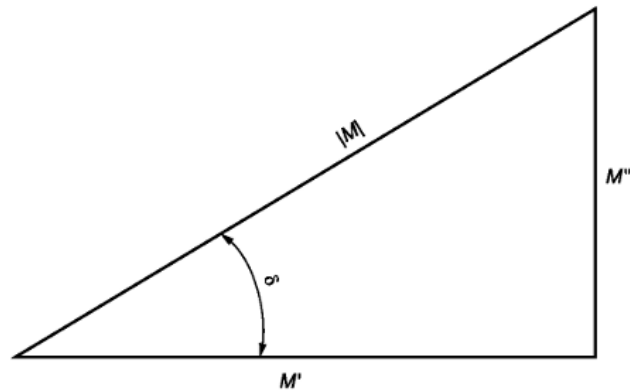


Рисунок 2 – Связь фазового угла и абсолютного значения комплексного модуля

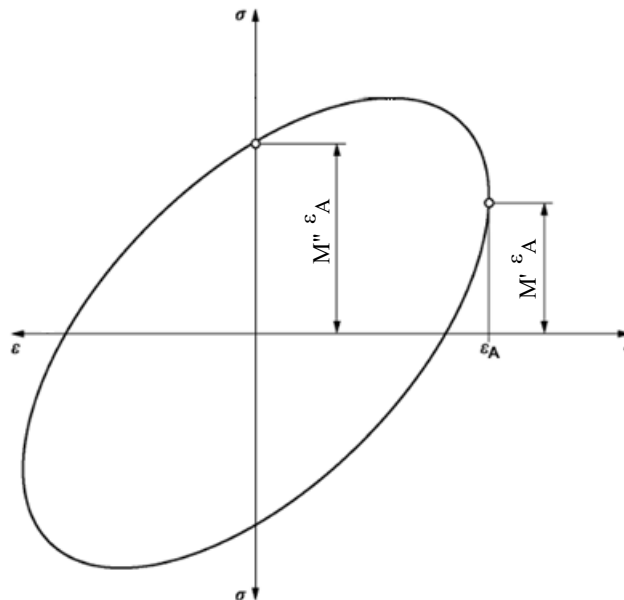


Рисунок 3 – Петля упругого гистерезиса, где σ – напряжение, ϵ – деформация, M'' – модуль потерь, M' – модуль упругости, ϵ_A – максимальная амплитуда деформации

Таким образом, коэффициент механических потерь Q^{-1} вычисляется как, отношение усилия изгиба F'' в точке пересечения гистерезисным эллипсом вертикальной оси к усилию изгиба F' при максимальном прогибе балки y_{max} .

2. Сущность метода определения коэффициента механических потерь

Коэффициент потерь в случае изгиба балки по трехточечной схеме можно вычислить, построив петлю гистерезиса зависимости усилия изгиба от прогиба, центр которой нужно привести в начало координат (рисунок 4). Центровка необходима для снятия корректных приращений усилий изгиба F' при максимальном прогибе y_{max} и усилия F'' в точке пересечения гистерезисным эллипсом вертикальной оси.

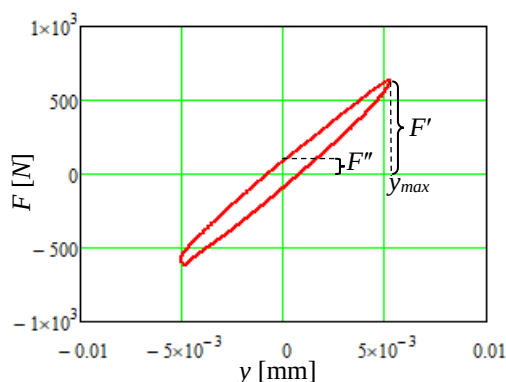


Рисунок 4 – Пример центрированной петли гистерезиса для одного цикла деформирования образца

При этом связь усилия изгиба F' при максимальном прогибе балки y_{max} с модулем упругости и связь усилия изгиба F'' в точке пересечения гистерезисным эллипсом вертикальной оси с модулем потерь определялись формулами (2) и (3) соответственно.

$$F' = M' y_{max}, \quad (2)$$

где F' – усилие изгиба при максимальном прогибе балки y_{max} , M' – модуль упругости, а y_{max} – максимальный прогиб балки.

$$F'' = M'' y_{max}, \quad (3)$$

где F'' – усилие изгиба в точке пересечения гистерезисным эллипсом вертикальной оси. Это позволяет преобразовать формулу (1) в формулу (4):

$$Q^{-1} = F''/F' . \quad (4)$$

Таким образом, коэффициент механических потерь Q^{-1} вычисляется как, отношение усилия изгиба F'' в точке пересечения гистерезисным эллипсом вертикальной оси к усилию изгиба F' при максимальном прогибе балки u_{max} .

Для определения корректного коэффициента потерь горной породы необходимо испытать не менее трех образцов балок этой породы. Для расчёта коэффициента потерь не использовать первые два цикла нагрузки–разгрузки для каждой серии испытаний с одной максимальной нагрузкой, так как на них устанавливался стационарный режим для дальнейших циклов.

3 Образцы, испытательная установка и схемы нагружения

Образцы для определения коэффициента механических потерь по трехточечной схеме размерами 40×40×150 мм, должны обладать взаимно перпендикулярными гранями, также грани должны быть отшлифованы для минимизации трения.

Испытания должны проводиться на машине нагружения по программе испытаний, задаваемой с помощью компьютера. Настроить алгоритм циклических испытаний с указанием количества циклов, максимальной и минимальной деформации и скорости перемещений рамы испытательной машины. Нагрузку измерять тензометрическим динамометром с диапазоном измерения до 30 кН. Прогиб образца регистрировать двумя преобразователями линейных перемещений (LVDT) с диапазоном измерения до 10 мм непосредственно на образце, закрепляя их на оси приложения нагрузки соосно к двум взаимно параллельным сторонам образца

перпендикулярным направлению приложения нагрузки. Схема закрепления представлена на рисунке 5.

Образцы испытывались по трехточечной схеме [35] со специально разработанным приспособлением для циклических нагружений по рекомендациям ISRM [36], позволяющего минимизировать трение в опорах и измерять прогиб γ непосредственно на образцах. Для этого использовалась установка, показанная на рис. 1. Ее основа — испытательный комплекс АСИС (ООО НПО “Геотек”, Россия). Программное обеспечение АСИС настроило алгоритм циклических испытаний с указанием количества циклов, максимального и минимального перемещения рамы испытательной машины и скорости ее перемещений. Нагрузка измерялась тензометрическим динамометром с диапазоном до 30 кН. Два преобразователя линейных перемещений LVDT с диапазоном до 10 мм регистрировали прогиб на образце. Они подключались к 18-битному АЦП измерительной системы QMBox (R-Technology, Россия), который регистрировал нагрузку и прогиб образца на диске компьютера.

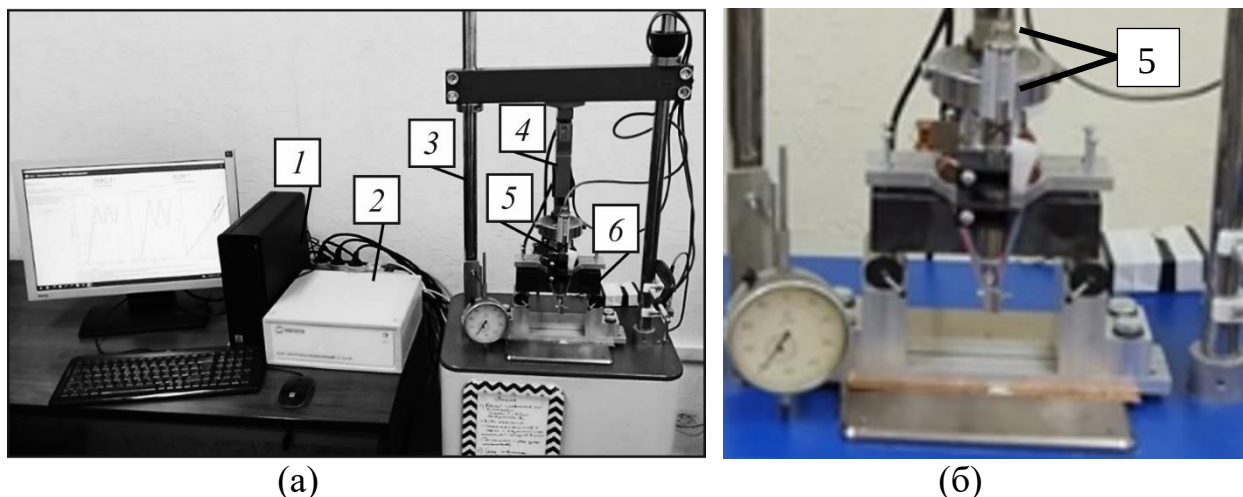


Рисунок 5. Экспериментальная установка (а) и размещение образца в ней (б): 1 — персональный компьютер; 2 — блок управления пресса; 3 — пресс; 4 — тензометрический динамометр; 5 — преобразователи линейных перемещений LVDT; 6 — образец горной породы

Место установки образца для проведения испытания должно обеспечивать минимизацию трения в опорах. Количество циклов нагрузки – разгрузки для одного образца из группы должно быть не менее шести. На рисунке 6 представлен текст программы в среде MathCAD для расчёта коэффициента механических потерь.

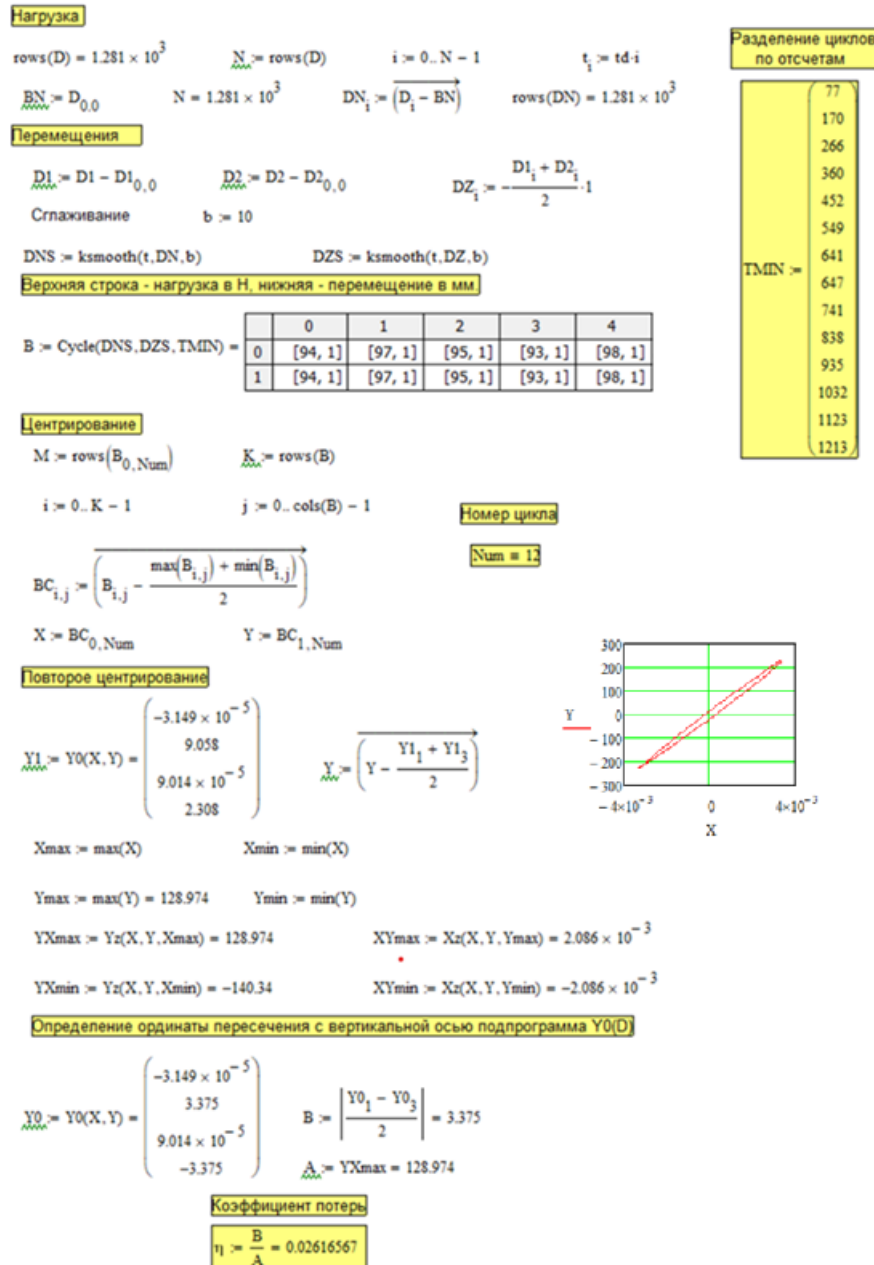


Рисунок 6 – Текст программы для определения коэффициента механических потерь по гистерезисным петлям

4 Примеры испытаний образца и обработки данных

Значения переменной «TMIN» снимаются вручную в точках минимума графиков нагрузки и деформации в отсчетах АЦП, представленных на рисунке 6.

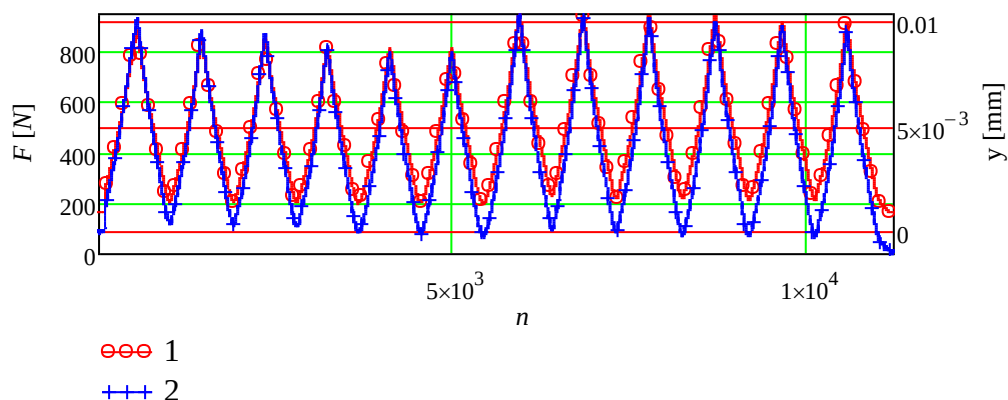


Рисунок – 7 Вид графиков нагрузки F (1) и прогиба y (2) образца известняка от номера отсчета АЦП на скорости перемещения рамы 0.15 мм/мин

Пример результатов расчёта коэффициента потерь Q^{-1} для образца балки известняка представлен в таблице 1.

Таблица 1. Результаты испытаний для образца №1 известняка.

Номер образца	Границы перемещения, мм	Скорости перемещения рамы, мм/мин	Период нагрузки-разгрузки, с	Частота перемещения, Гц	Коэффициент потерь Q^{-1}
1	От 0.05 до 0.15	0.15	180	0.0055	0.025
		0.25	115.2	0.0087	0.0038
		0.5	60.8	0.0164	0.0096
		0.75	36.8	0.0272	0.011
		1	28	0.036	0.022
		2	14.6	0.064	0.033
		4	9.6	0.104	0.042
	От 0.075 до 0.0175	0.15	180	0.0055	0.0034
		0.25	115.2	0.0087	0.014
		0.5	60.8	0.0164	0.022
		0.75	36.8	0.0272	0.008
		1	28	0.036	0.025
		2	14.6	0.064	0.037
		4	9.6	0.104	0.072

Коэффициенты рэлеевской модели упруго-вязких потерь α и β находятся методом наименьших квадратов путем аппроксимации экспериментальных данных зависимостью вида

$$Q^{-1} = \frac{1}{2\pi f} \alpha + 2\pi f \beta,$$

где Q^{-1} – коэффициент потерь; f – частота воздействия; α , β – коэффициенты, характеризующие обратно и прямо пропорциональные зависимости потерь от частоты и имеющие размерности [Гц] и [с] соответственно. Текст программы представлен на рисунке 7.

Начало текста программы

```

Y := ( 0.08
      0.028
      0.031
      0.042
      0.037
      0.056 )
X := ( 0.0053
      0.028
      0.036
      0.052
      0.0625
      0.0833 )
X это частота, Y это коэф.потерь

b := ( 1.948 × 10-3
      0.014 )
Параметры рассчитанные ниже, можно любые

f(x,b) :=  $\frac{b_0}{2 \cdot \pi \cdot x} + b_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot x$ 

F(x,b) := stack(f(x,b), ∇b f(x,b)) →  $\begin{pmatrix} \frac{b_0}{2 \cdot \pi \cdot x} + 2 \cdot \pi \cdot x \cdot b_1 \\ \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot x} \\ 2 \cdot \pi \cdot x \end{pmatrix}$ 

guess := ( 1.5
          0.5 )
cgl := genfit(X,Y,guess,f)

```

(а)

Окончание текста программы

```

Параметры частотной зависимости Рэля
cgl := ( 2.544 × 10-3
        0.092 )
h1(x) := f(x,cgl)
B := h1(X)

Для непрерывного графика
N := 200
j := 0..N-1
f_j := X_0 +  $\frac{X_{\text{rows}(X)-1} - X_0}{N-1} \cdot j$ 



MEAN(B) :=  $\frac{1}{\text{rows}(B)} \cdot \sum_{i=0}^{\text{rows}(B)-1} Y_i$ 
MEAN(B) = 0.046

SKO(Y,B) :=  $\sqrt{\frac{1}{\text{rows}(B)-1} \cdot \sum_{i=0}^{\text{rows}(B)-1} (Y_i - B_i)^2}$ 
C := SKO(Y,B)
C = 3.634 × 10-3

Kvar :=  $\frac{C}{\text{MEAN}(B)}$  = 0.08

corr(B,Y)2 = 0.968
α := cgl0 = 2.544 × 10-3
β := cgl1 = 0.092

```

(б)

Рисунок 8 – Текст программы нахождения коэффициентов рэлеевской модели α и β : (а) – начало, (б) – окончание

На рисунке 8 приведены примеры эмпирической и аналитической зависимостей коэффициента потерь Q^{-1} от частоты f нагружения образцов известняка, доломита, мрамора и габбро

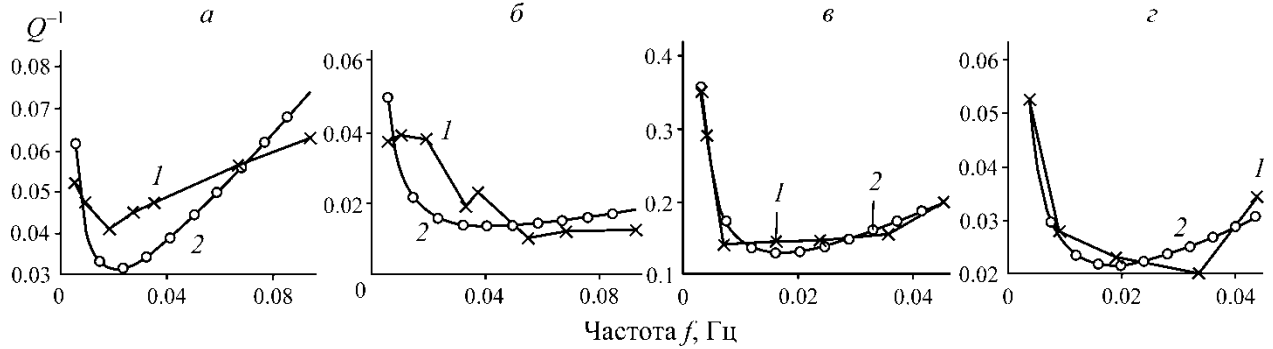


Рисунок 9 – Эмпирическая (1) и аналитическая (2) зависимости коэффициента потерь Q^{-1} от частоты f нагружения образца: *a* – известняк LM002 при перемещении рамы от 0.05 до 0.15 мм; *б* – доломит DLM002 при перемещении рамы от 0.025 до 0.100 мм; *в* – мрамор MRB001 при перемещении рамы от 0.1 до 0.2 мм; *г* – габбро G2 при перемещении рамы от 0.3 до 0.4 мм

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 56801–2015. (ИСО 6721-1:2011). Пластмассы. Определение механических свойств при динамическом нагружении. Часть 1. Общие принципы. М.: Стандартинформ. 2016.– 23 с.

2. 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.

3. Салюков В. С., Вознесенский А. С., Куткин Я. О. 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/FTPRPI10250302

4. 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.

Приложение Б

Справка о внедрении результатов диссертации

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
(ФИЦ КНЦ РАН)

**ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ
(ГоИ КНЦ РАН)**

ул. Ферсмана, 24, Апатиты,
Мурманская обл., Россия, 184209
Факс: (815 55) 74625
Тел.: (815 55) 74342, 79520
E-mail: goi@knc.ru

ОКПО 24903563, ОГРН 1025100508333
ИНН/ КПП 5101100280/511845007

от 19.06.2026 г. № 186.04-26.1-18/213
на № _____ от _____

СПРАВКА

Результаты диссертации Салюкова Владислава Сергеевича «Изучение закономерностей изменения внутренних механических потерь в горных породах при механических воздействиях инфразвукового диапазона частот» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» в виде документа «Методические рекомендации по оценке коэффициента механических потерь в горных породах различного генезиса при изгибе образца балки по трехточечной схеме» приняты в Горном институте - обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ГоИ КНЦ РАН), представляют интерес для организации и предполагаются к практическому использованию.

Директор института, чл.-корр. РАН



С.В. Лукичев

Исп.: Рыбин В.В.
тел.: 8(81555) 79-199