

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС»

САЛЮКОВ Владислав Сергеевич

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

Специальность 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная
аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

Москва, 2026

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы 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 модель¹, 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».

Цель работы

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

Основная идея работы – использование параметров гистерезисных петель в координатах деформация-нагрузка при циклических механических

¹ 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.

деформациях в области инфразвуковых частот для оценки частотных зависимостей коэффициента потерь.

Для достижения поставленной цели в работе решаются 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.

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 горных пород различного генезиса экспериментально и расчетным путем установлено наличие граничной частоты изменения преобладающего механизма потерь, находящейся в диапазоне от 0,04 до

0,14 Гц, при этом 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 научных положений обусловлена

- 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.

Апробации 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 объем диссертационной 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 приложение (включая 9 рисунков и 1 таблицу).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ современного состояния исследований ВМП при циклических механических испытаниях горных пород, направленных на изучение коэффициента потерь горных пород, видов потерь в горных породах в области инфразвуковых частот воздействия, сформулированы цель и задачи исследования.

ВМП в различных материалах в мировой практике изучаются весьма широко как в форме непосредственно добротности Q , так и обратной добротности Q^{-1} . Так, например, в металлах, их сплавах и композитах исследования проводили Головин И.С., Chen Y., Wang S., Wang, E. И др.

Исследования источников упругих волн и их спектров в горных породах в области инфразвуковых частот проводили Кочарян Г. Г., Кишкина С. Б., Новиков В. А., Остапчук А. А., Скоркина А. А., Гусев А. А. Еременко А. А., Марысюк В. П., Конурин А. И., Rudziński, Ł., Mirek, K. и др.

В отечественной практике одними из первых в области исследования ВМП проводили свои работы Меркулова В. М., Пигулевский Е. Д., Цаплев В. М., Лебедев А. В., Островский Л. А., Сутин А. М., Соустова И. А. Именно в низкочастотной области воздействий проводят исследования ВМП Добрынина А.А., Чечельницкий В.В., Саньков В.А., Собисевич А. Л., Габсатарова И. П., Зверева А. С. и др. В горных породах при воздействии в различных полосах частот проводили Вознесенский А. С., Красилов М. Н., Куткин Я.О., Машинский Э. И. Liu Y., Dai F., Deng W., Cao D., и др.

ВМП горных пород в областях частот от единиц герц до сотен килогерц исследованы достаточно подробно. Необходимость дальнейшего исследования внутренних механических потерь в инфразвуковом диапазоне в горных породах разного происхождения обуславливает актуальность выбранной темы диссертационной работы.

Во второй главе приведены теоретические основы работы, а также описаны испытательные установки, используемые образцы и методы испытаний.

Теоретическое обоснование методики измерений

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

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + kx + R\text{sign}(\dot{x}) = F(t), \quad (1)$$

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

Уравнение (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 рэлеевской моделью, учитывающей две составляющие. что выражается формулой

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

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), 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, что 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 (1) и вносящее значительный вклад в общую картину механических потерь.

Экспериментальные установки и режимы испытаний

Эксперименты были основаны на регистрации петли гистерезиса при циклическом изгибном деформировании образцов и проводились на двух различных установках, что позволило обеспечить достоверность полученных результатов и выводов. Внешний вид первой установки показан на рисунке 1. В качестве второй установки использовался динамический механический анализатор DMA Q800 (DMA – Dynamic Mechanical Analysis).

Первая экспериментальная установка применялась для циклических испытаний при изгибе образцов–балок горных пород размером 40×40×150 мм. Эксперименты проводились по программе испытаний, задаваемой с помощью компьютера, по трехточечной схеме с использованием приспособления, специально разработанного по рекомендациям ISRM и позволяющего минимизировать трение в опорах, а также измерять прогиб непосредственно на образцах.

Основой первой 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 скорости ее перемещения. 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.

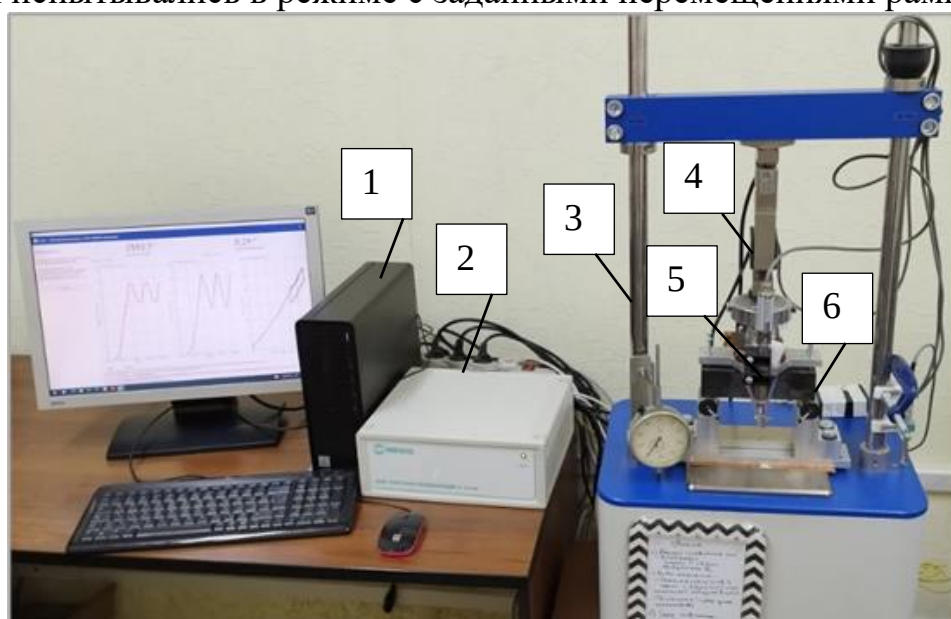


Рисунок 1 – Экспериментальная установка для испытания образцов-балок при изгибе: 1 – персональный компьютер, 2 – блок управления пресса, 3 – пресс, 4 – тензометрический динамометр, 5 – преобразователи линейных перемещений (LVDT), 6 – образец горной породы

В процессе испытаний образцов при изгибе задавались пределы и скорости перемещения рамы, которые определяли периоды циклов деформирования. Полученные периоды циклов пересчитывались в частоты как обратные величины. Испытываемые образцы представлены на рисунке 2. Были приняты следующие обозначения пород образцов: LM – известняк; DLM – доломит; MRB – мрамор; G – габбро. Испытания проводились при двух диапазонах прогиба, задаваемых соответствующим перемещением рамы. Режимы деформирования образцов представлены в таблице 1.

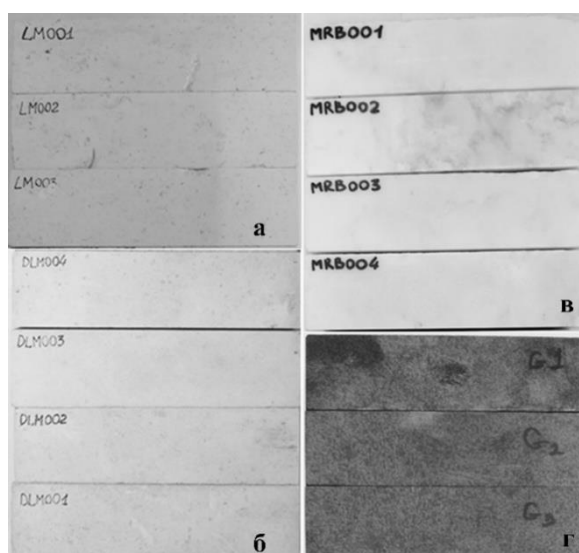


Рисунок 2 – Образцы а) известняка, б) доломита, в) мрамора, г) габбро

Таблица 1. Режимы деформирования 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 – 0,0175	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 – 0,0175	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 – 0,0175	от 0,15 до 4	от 0,0055 до 0,104
Доломит	DLM001	0,025 – 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

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.

Динамический механический анализатор Q800, использованный в качестве второй экспериментальной установки, включал узел размещения образца с опорой его концов, обеспечивающий изгиб поперек оси симметрии максимального размера, при циклическом перемещении центральной части. Этот прибор осуществлял высокоточное управление нагрузкой с помощью воздушных струй с использованием бесконтактного линейного двигателя, что практически исключало трение, и измерение смещения оптическим кодером с высоким разрешением. При испытаниях на динамическом механическом анализаторе Q800 использовались образцы–пластины габбро размерами $30 \times 10 \times 0,9$ мм.

В третьей главе отражено исследование частотных закономерностей коэффициента потерь осадочных, метаморфических и изверженных горных пород при циклических изгибных деформациях на первой установке.

Последовательность измерений и результаты

Для оценки частотных зависимостей коэффициента потерь были проведены эксперименты по циклическому изгибу горных пород различных генотипов. Всего было испытано 14 образцов, имевших размеры $150 \times 40 \times 40$ мм. 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 приводило к их разрушению.

Пример графиков нагрузки F и деформации образца y от времени t на одной из скоростей деформирования образца мрамора MRB001 приведен на рисунке 3.

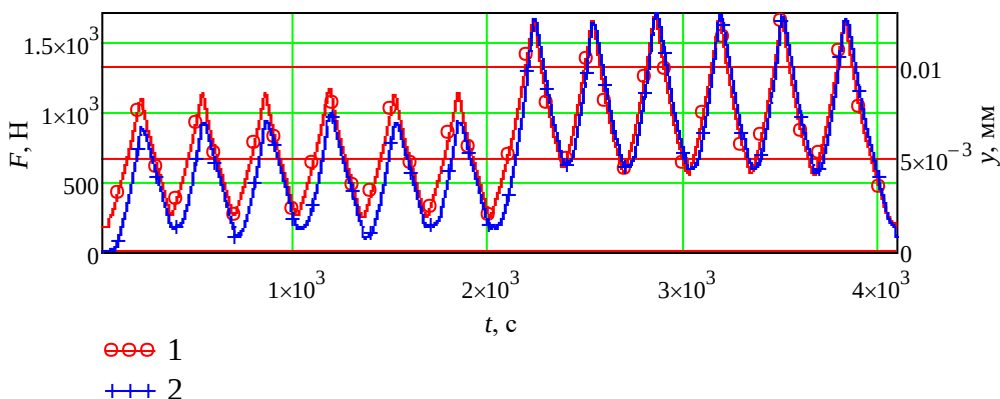


Рисунок 3 – Пример графиков циклической нагрузки F (1) и деформации y (2) образца мрамора MRB001 от времени t на скорости перемещения рамы 0,05 мм/мин

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_{cp} и нагрузки F_{cp} , необходимая для снятия корректных усилий

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

при максимальной деформации образца y_{max} и усилий

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

в точке пересечения гистерезисной петель вертикальной оси.

Пример одной из центрированных петель гистерезиса показан на рисунке 4. Центр петли в данном случае находится в точке с координатами (0,0). Отклонения от центра принимают как положительные, так и отрицательные знаки, соответствующие минимальным и максимальным значениям деформаций и усилий положительных знаков в циклах в соответствии с рисунком 3.

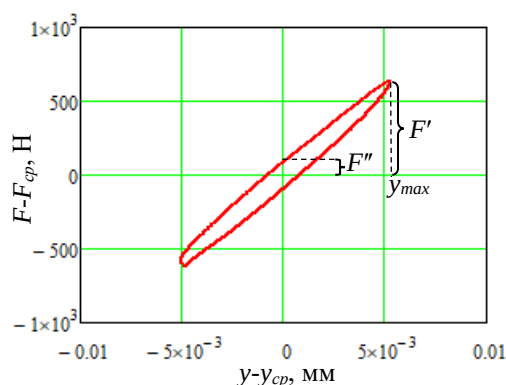


Рисунок 4 – Пример центрированной петли гистерезиса для одного цикла деформирования образца. F – усилие прогиба, y – деформация образца

Коэффициент потерь в случае изгиба балки по трехточечной схеме вычислялся по петле гистерезиса через зависимость усилий F'' в точке пересечения гистерезисной петель вертикальной оси от усилий F' при максимальной деформации образца y_{max} , по модифицированной формуле (3), приведенной в ГОСТ 56801-2015

$$Q^{-1} = F''/F', \quad (3)$$

где Q^{-1} – коэффициент потерь (обратная добротность), F' – усилие центрированной петли при максимальной деформации образца y_{max} , а F'' –

усилие в точке пересечения центрированной гистерезисной петлей вертикальной оси.

В качестве примера на рисунках 5, 6, 7, 8 представлены графики нагрузки и деформации образцов известняка, доломита, мрамора и габбро соответственно на одной из скоростей перемещения рамы испытательной установки.

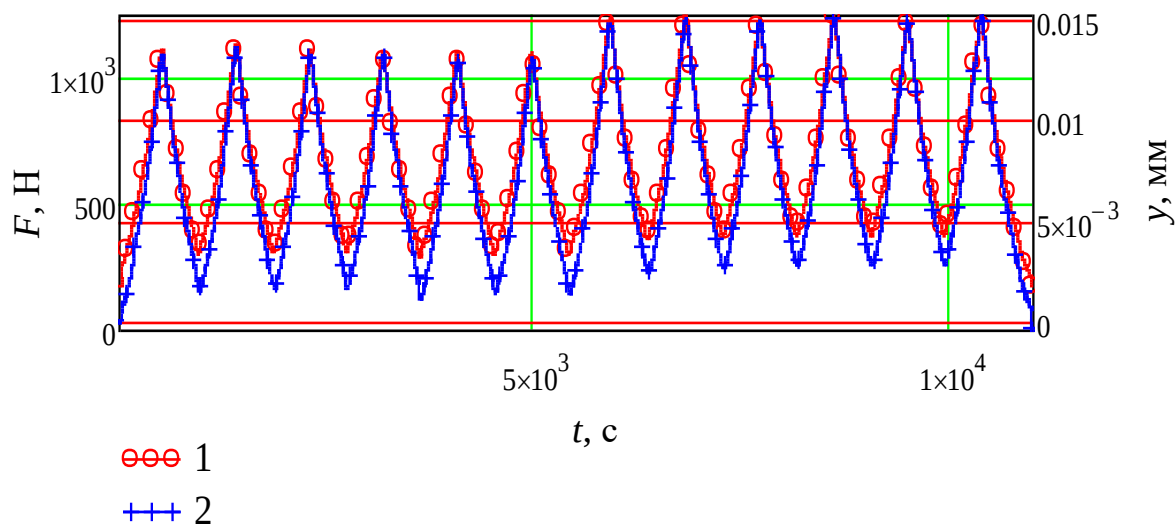


Рисунок 5 – Вид графиков нагрузки F (1) и деформации y (2) образца LM002 от времени на скорости перемещения рамы испытательной установки 0,15 мм/мин

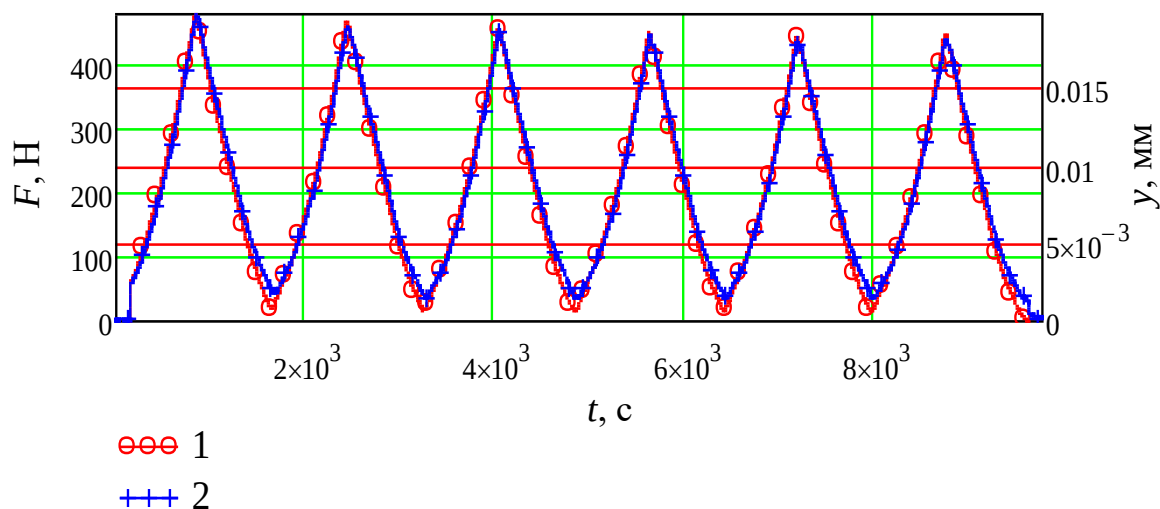


Рисунок 6 – Вид графиков нагрузки F (1) и деформации y (2) образца DLM004 от времени на скорости перемещения рамы 0.075 мм/мин

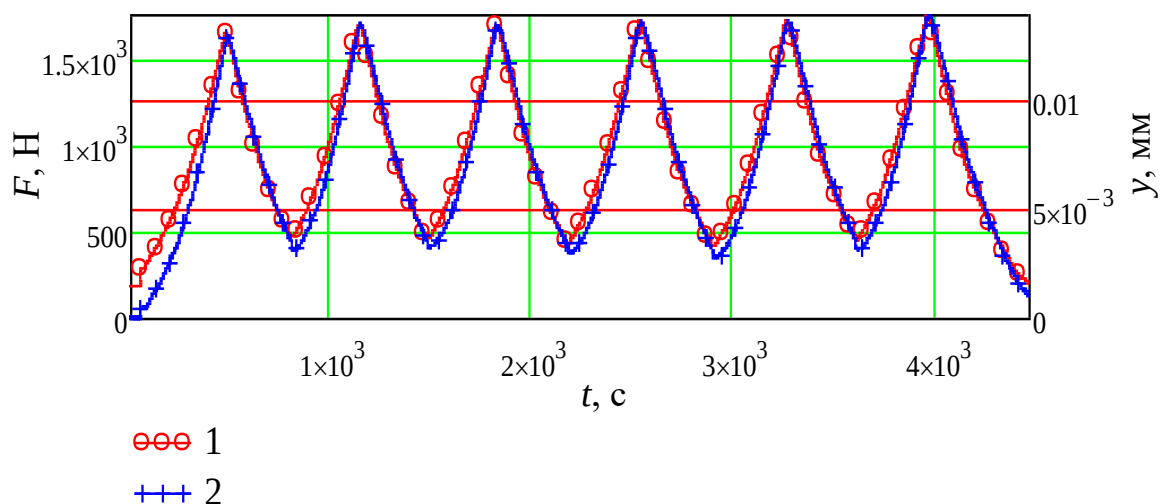


Рисунок 7 – Вид графиков нагрузки F (1) и деформации y (2) образца MRB001 от времени на скорости перемещения рамы 0,25 мм/мин

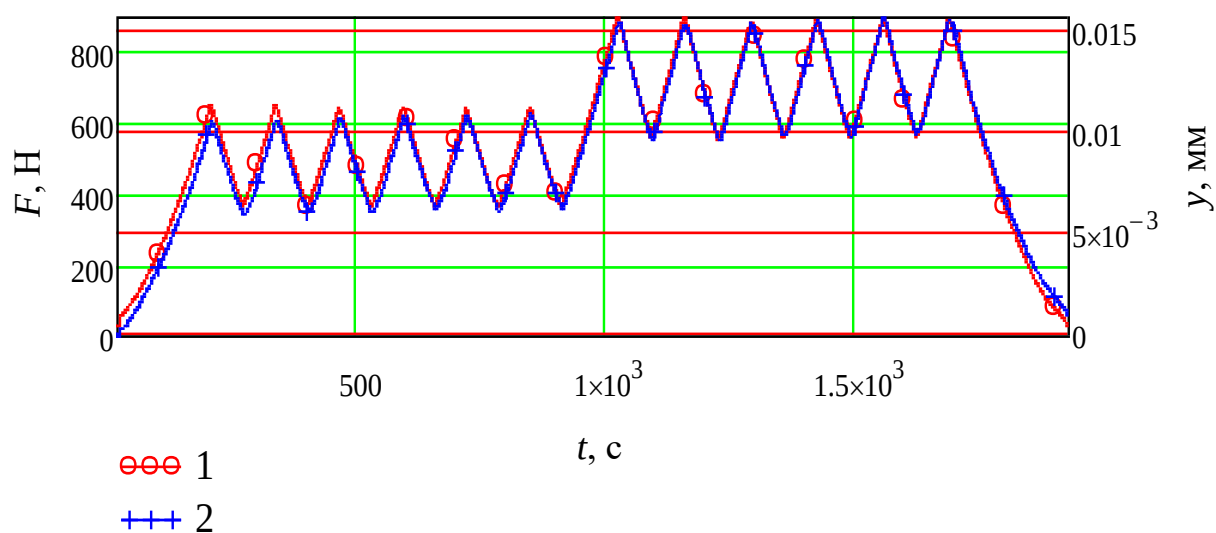


Рисунок 8 – Вид графиков нагрузки F (1) и прогиба y (2) образца G2 от времени на скорости перемещения рамы 0,1 мм/мин

На рисунке 9 представлены нецентрированные гистерезисные петли всех циклов деформирования, полученные при испытаниях образцов известняка, доломита, мрамора и габбро на указанных скоростях перемещения рамы испытательной установки.

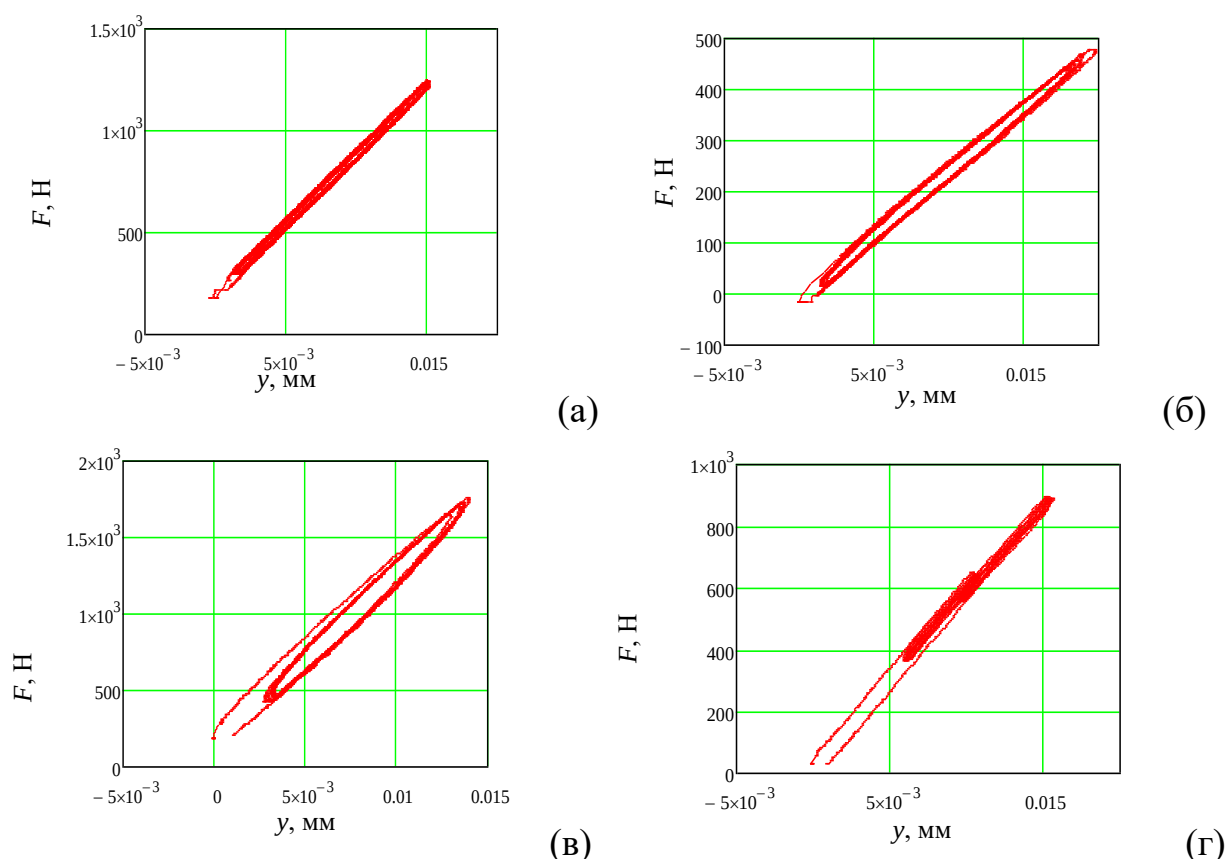
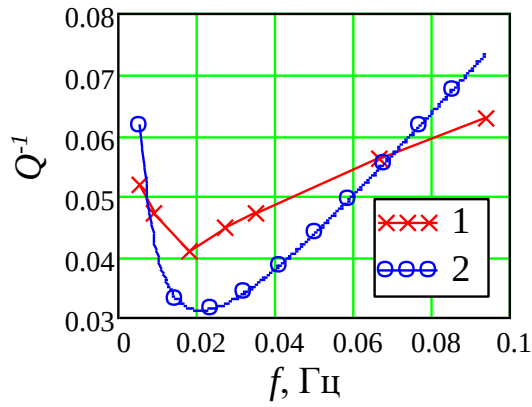


Рисунок 9 – Вид гистерезисных петель, полученных при циклических деформациях образца LM002 на скорости перемещения рамы 0,15 мм/мин (а), образца DLM004 на скорости перемещения рамы 0,075 мм/мин (б), образца MRB001 на скорости перемещения рамы 0,25 мм/мин (в), образца G2 на скорости перемещения рамы 0,1 мм/мин (г)

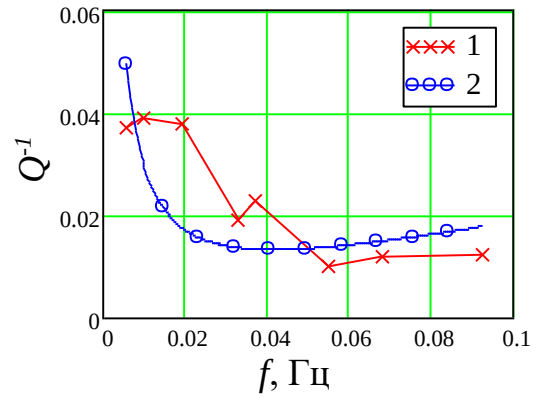
Обработка результатов

В процессе обработки результатов эксперимента коэффициенты потерь усреднялись для каждого пикового перемещения рамы на каждой частоте нагрузки–разгрузки. После расчётов производилась аппроксимация зависимости коэффициента потерь Q^{-1} от частоты f методом наименьших квадратов в соответствии с рэлеевской моделью механических потерь (2).

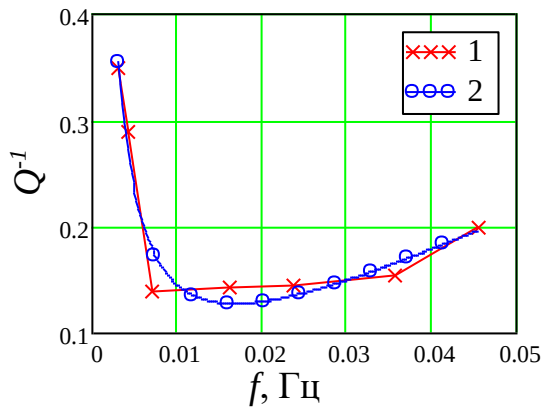
Примеры некоторых эмпирических и аналитических графиков зависимостей коэффициента потерь от частоты для образцов пород каждого типа приведены на рисунке 10. Полные данные по этим экспериментам приведены на интернет-ресурсе [5].



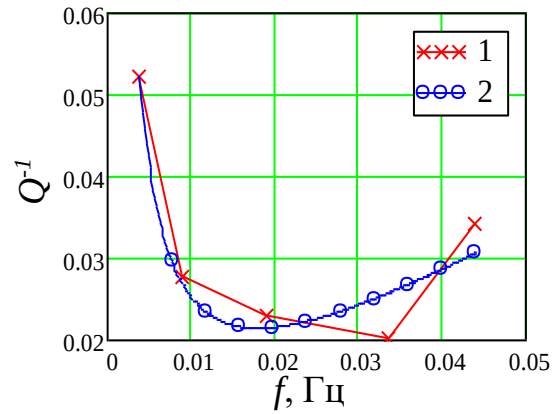
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 10 – Эмпирическая (1) и аналитическая (2) зависимости коэффициента потерь Q^{-1} от частоты f нагружения образца известняка LM002 (а) доломита DLM002 (б), мрамора MRB001 (в), габбро G2 (г). Q^{-1} – коэффициент потерь, f – частота

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

Таблица 2. 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.

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. Указанный факт может быть объяснен наличием других видов механических потерь, которые не учитываются вязкоупругой рэлеевской моделью (2).

В этой связи представляет интерес более глубокий анализ полученных результатов. Как следует из графиков для образцов DLM002 и MRB001 на рис. 5, для них характерна значительная горизонтальная или близкая к горизонтали протяженность участков, наблюдаемая выше 0.05 Гц для первого и выше 0.008 Гц для второго образца. 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, а также отвечает линейному режиму деформаций, что также является причиной различий между экспериментальными результатами и теоретической моделью, используемой для аппроксимации.

Полученные результаты подтверждают **первое научное положение**.

В четвертой главе приведены результаты исследования частотных закономерностей коэффициента потерь изверженных горных пород на примере габбро при циклическом изгибе тонких пластин на второй установке.

Эта часть работ предусматривала лабораторные испытания образцов–пластин габбро при изгибе с закрепленными краями на максимальной оси в диапазоне частот от 0,05 – 20 Гц с дальнейшим построением графиков частотных зависимостей механических потерь и их анализ, аппроксимацию полученных зависимостей различными функциями;

Это было сделано для обоснования вида внутренних механических потерь в образцах по полученным модельным зависимостям, оценки применимости рэлеевской модели упруго-вязких потерь для горных пород, установления закономерности изменения доли упруго-вязких потерь в общем балансе.

В качестве экспериментального материала рассматриваются результаты испытания образцов–пластин габбро размерами 30×10×0,9 мм. Измерения проводились на динамическом механическом DMA–анализаторе Q800 в диапазоне частот от 0,05 до 20 Гц при комнатной температуре и влажности. Размер образцов был выбран в соответствии с техническими требованиями прибора.

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

$$y(f) = \frac{a_1}{2\pi f}, \quad (4)$$

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

Результаты аппроксимации экспериментальных данных по формуле (4), приведенные для примера на рисунке 11, демонстрируют существенное отличие частотной зависимости коэффициента потерь Q^{-1} от обратно пропорциональной зависимости (4) для низкочастотной области. Обратная зависимость (линия 2 на графике на рисунке 11) 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.

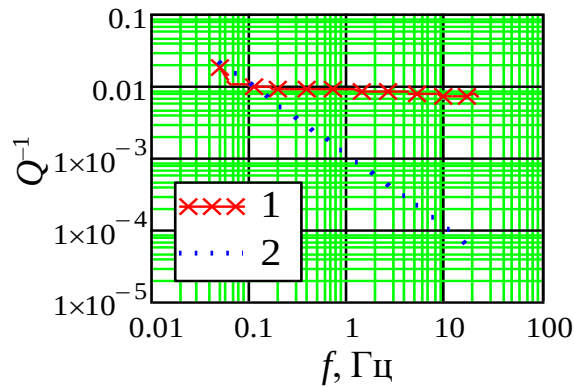


Рисунок 11 – Частотные зависимости коэффициента потерь Q^{-1} : экспериментальная (кривая 1) и зависимость по формуле (4) (кривая 2), Q^{-1} – коэффициент потерь, f – частота

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

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

$$y(f) = a_0 + \frac{a_1}{2\pi f}, \quad (5)$$

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

$$y(f) = a_0 + \frac{a_1}{2\pi f} + a_2 2\pi f, \quad (6)$$

где коэффициенты a_1 и a_2 являются соответствующими коэффициентами рэлеевской модели.

Результаты и их обработка

На рисунке 12 представлены зависимости коэффициента потерь от частоты воздействия, полученные на четырех образцах, а также результаты аппроксимации по формулам (5) и (6).

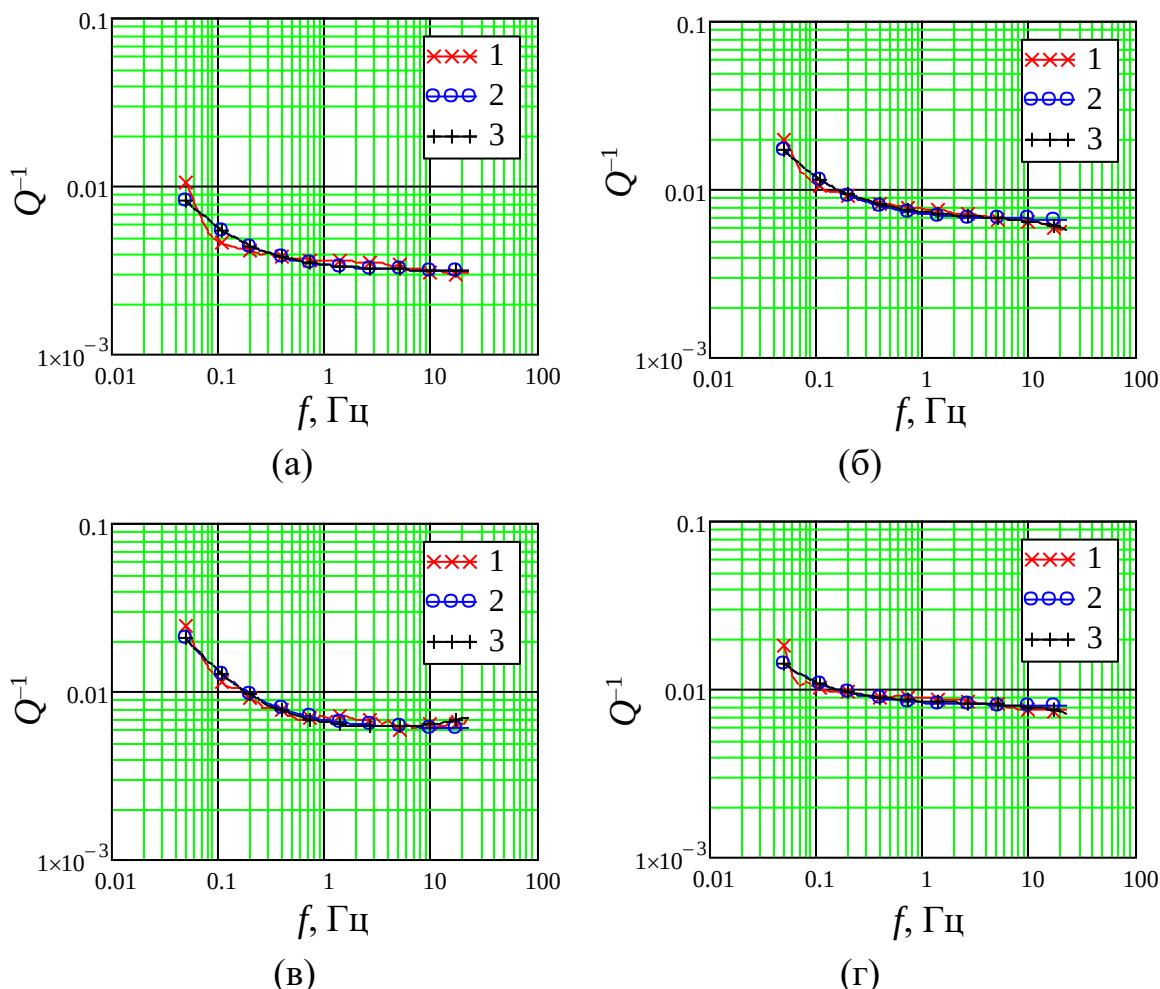


Рисунок 12 – Зависимости коэффициента потерь Q^{-1} от частоты для образцов G01 (а), G02 (б), G03 (в), G04 (г) экспериментальные (1) и аппроксимированные функциями вида (5) (номер 2 на графиках) и (6) (номер 3 на графиках). Q^{-1} – коэффициент потерь, f – частота

В таблице 3 показаны результаты аппроксимации частотных зависимостей коэффициента Q^{-1} .

Таблица 3 – Результаты аппроксимации частотных зависимостей коэффициента Q^{-1}

Образец	Модель 1, формула (7)	Модель 2, формула (8)			Модель 3, формула (9)			
	a_1	a_0	a_1	R^2	a_0	a_1	a_2	R^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

В модели 2 коэффициент a_1 представляет собой коэффициент α_{dm} рэлеесвской модели (2). В таблице 3 столбец с этими значениями выделен жирным шрифтом. Коэффициент a_0 физически может быть интерпретирован как составляющая коэффициента потерь, обусловленная сухим трением.

Таким образом, изменение внутренних механических потерь в горных породах в инфразвуковом диапазоне циклических воздействий может быть описано суммой обратно пропорциональной функции, характеризующей вязкие потери, и постоянной величины для вида «сухое трение», что подтверждает **второе научное положение**.

Далее в четвертой главе произведена оценка вклада в общий процесс колебаний потерь различных видов.

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

$$Q_e^{-1} = \frac{\alpha_{dM}}{2\pi f} = \frac{a_1}{2\pi f}. \quad (7)$$

При допущении, что потери вида «сухое трение» не зависят от частоты и определяются коэффициентом a_0 в формуле (5), суммарные потери на частоте f составят

$$Q^{-1} = Q_e^{-1} + Q_c^{-1} = a_0 + \frac{a_1}{2\pi f}, \quad (8)$$

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

Относительная доля упруго-вязких потерь составит

$$\delta = \frac{Q_e^{-1}}{Q_e^{-1} + Q_c^{-1}}, \quad (9)$$

где δ – относительная доля упруго-вязких потерь.

На рисунке 13 представлены графики зависимостей относительной доли упруго-вязких потерь δ от частоты воздействий для исследованных образцов.

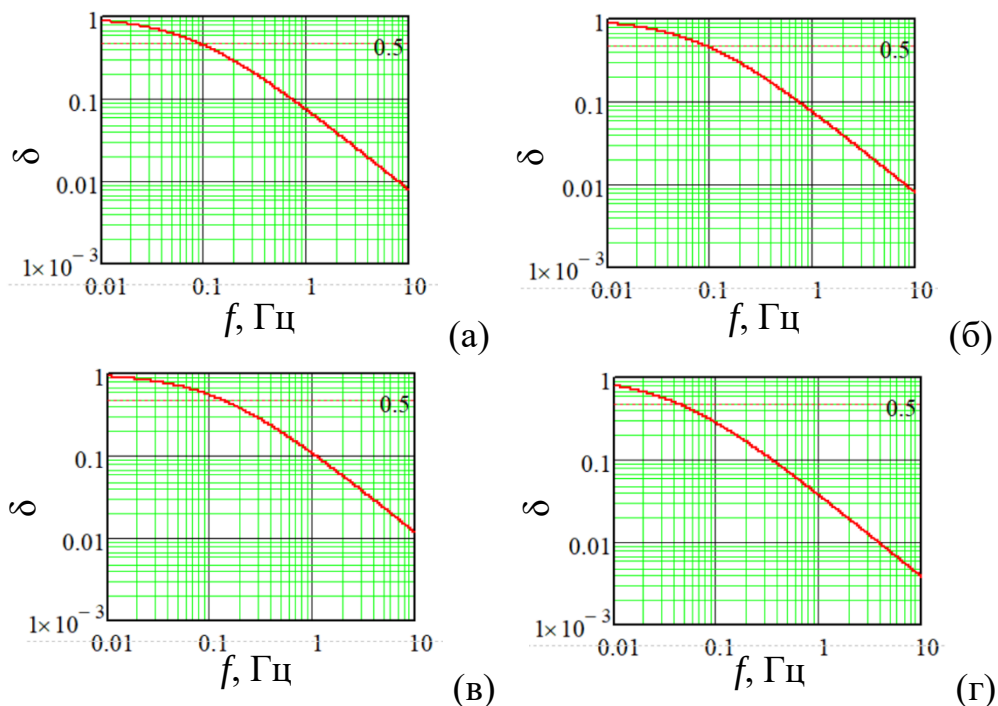


Рисунок 13 – Графики результатов расчета по формуле (9), иллюстрирующие долю упруго-вязких потерь в их общей совокупности для образцов GBR01 (а), GBR02 (б), GBR03 (г), GBR04 (д). δ – относительная доля упруго-вязких потерь, f – частота

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, находится в диапазоне от 0,04 до 0,14 Гц.

Влияние преобладающего вида потерь на ориентацию гистерезисной петли

Изменение преобладающего вида потерь приводит к изменению фазовых соотношений между гармоническими нагрузкой и смещением. Экспериментально установлено, что это приводит, в частности, к изменению ориентации гистерезисной петли.

Для подтверждения этого механизма в среде COMSOL Multiphysics было проведено численное моделирование изгиба пластины. Схема закрепления и результаты расчета показаны на рисунке 14. В расчетах модуль упругости пластины задавался равным 60 ГПа, коэффициент Пуассона 0,25, что соответствовало свойствам габбро, размеры пластины 30×10×0,9 мм. Коэффициенты рэлеевской модели (2) $\alpha_{dm}=0,04$ Гц, $\beta_{dk}=0$. При задании граничных условий пластина жестко закреплялась на концах, а к средней части прикладывали гармонические перемещения с различными частотами в диапазоне от 0,01 до 20 Гц в направлении, перпендикулярном оси пластины. 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».

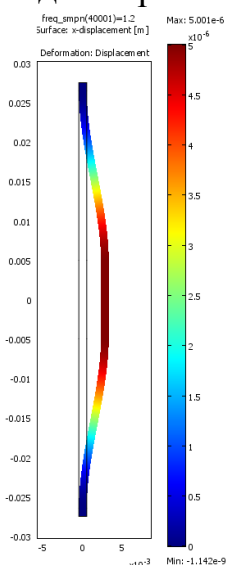


Рисунок 14 – Схема численной модели и шкала горизонтальных смещений

На рисунке 15 показаны положения гистерезисного эллипса при преобладании потерь вида «сухое трение» (а), вязкого трения (б), а также средней части эллипса, по которой определялись параметры F' и F'' формулы (3). На этом рисунке z – смещения центра образца относительно его оси; q – силовая реакция образца на смещения.

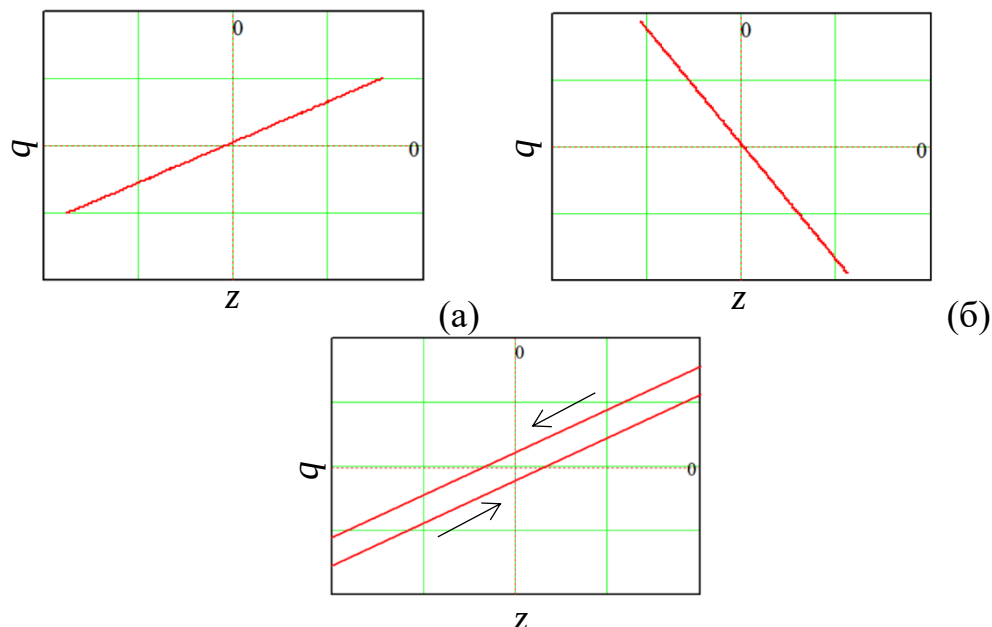


Рисунок 15 – Иллюстративные графики наклонов гистерезисных петель при частотах воздействия 1, 10, 20 Гц – возрастание силы с увеличением смещения центра пластины (а), 0,1 и 0,01 Гц – уменьшение силы с увеличением смещения (б), а также средняя часть петли гистерезиса в увеличенном виде (в). z – смещения центра образца относительно его оси; q – силовая реакция образца на смещения

Результаты моделирования подтверждают гипотезу о смене знака оси гистерезисной петли при увеличении доли упруго-вязких потерь выше доли 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} рэлеевской 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 рэлеевской 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.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

– в журналах из списка ВАК РФ и в изданиях, индексируемых в наукометрических базах WoS и Scopus:

1. 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.

2. 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/FTPRI10250302

3. 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.

– в других изданиях

4. Салюков В.С. Внутренние механические потери в горных породах в низкочастотном диапазоне // В сб.: Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 16 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. 23-27 октября 2023 г. – М: ИПКОН РАН, 2023.– С.140–142.

5. Салюков В.С., Вознесенский А.С. // Внутренние механические потери в горных породах в низкочастотной области воздействий // XXVI международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». Москва, 29 сентября – 3 октября 2025 г. – М: ИФЗ РАН, 2025. – с. 185–187.