МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

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

На правах рукописи

_____
Подпись

Красилов Максим Николаевич

ВЗАИМОСВЯЗИ ПРОЧНОСТНЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ И РЕЖИМАХ ЦИКЛИЧЕСКИХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЙ

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук,
профессор кафедры ФизГео
Вознесенский Александр Сергеевич

Москва, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5
1 Анализ современного состояния исследований прочностных и акустических свойств горных пород при циклических механических нагружениях 10
1.1 Объекты, в которых горные породы находятся при циклических силовых воздействиях 10
1.2 Исследования механического поведения горных пород при циклических нагрузках 15
1.3 Совместные циклические механические и акустические испытания образцов горных пород с целью прогнозирования их прочности 25
1.4 Выводы и постановка задачи исследования 30
2 Аппаратное и методическое обеспечение исследований 33
2.1 Общие требования к системе для лабораторных исследований и ее описание 33
2.2 Лабораторная установка для испытания образцов-балок горных пород при медленных нагружениях сжатия, растяжения и изгиба 34
2.3 Лабораторная установка для испытаний образцов горных пород при динамических нагружениях 38
2.4 Методики проведения циклических испытаний образцов горных пород 46
2.4.1 Методика циклических изгибных нагружений образцов гипсосодержащих пород 46
2.4.2 Методика медленных циклических и импульсных повторяющихся нагружений образцов каменной соли и мраморизованного известняка 47
2.5 Выводы по главе 2 50
3 Закономерности изменения прочностных и акустических свойств пород сложной текстуры доломит–гипс при циклических изгибных нагружениях 52

3.1 Оценка циклических воздействий на участки обнажений массива горных пород вокруг подземных выработок 52
3.2 Оценка предела прочности образцов горных пород при изгибе по акустическим свойствам с помощью регрессионных зависимостей и определение их точностей 57
3.2.1 Цель и постановка задач исследования 57
3.2.2 Результаты испытаний 60
3.2.3 Анализ и обсуждение результатов 62
3.3 Оценка изменений акустических свойств и параметра поврежденности пород сложной текстуры с границами доломит-гипс при изгибных циклических нагружениях образцов 67
3.3.1 Цель и задачи исследований 67
3.3.2 Образцы и методики испытаний 68
3.3.3 Результаты испытаний 71
3.3.4 Анализ и обсуждение результатов испытаний 76
3.3.5 Моделирование зависимости акустической добротности от нарушенности границ между доломитом и гипсом 84
3.3.6 Регрессионные зависимости для расчета параметра поврежденности по акустическим свойствам и оценка точности 88
3.4 Выводы по главе 3 92
4 Закономерности изменения прочностных и акустических свойств горных пород при медленных циклических и импульсных повторяющихся нагружениях 94
4.1 Оценка циклических силовых воздействий на массив каменной соли вокруг хранилища газа в процессе эксплуатации 94
4.2 Результаты испытаний образцов каменной соли при медленных циклических нагружениях 95
4.3 Результаты испытаний образцов каменной соли при импульсных повторяющихся нагружениях 108

4.4 Результаты испытаний образцов мраморизованного известняка при медленных циклических нагружениях 111
4.5 Результаты испытаний образцов мраморизованного известняка при импульсных повторяющихся нагружениях 113
4.6 Выводы по главе 4 115
5 Сравнение прочностных и акустических свойств известняка при циклических нагружениях в одном, а также в одном и перпендикулярном направлениях 116
5.1 Сравнительная оценка степени воздействия на массив горных пород повторяющихся взрывов из одного, а также последовательно из одного, а затем из другого направлений 116
5.2 Образцы, используемые при сравнительных нагружениях в одном, а также в одном, а затем в другом направлениях, и режимы их испытаний 122
5.3 Влияние последовательных циклических нагружений в одном, а также в одном, а затем в перпендикулярном направлениях на прочностные и акустические свойства образцов известняка 124
5.4 Выводы по главе 5 130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 132
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 135

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Повторяющиеся или циклические нагружения горных пород встречаются в ряде объектов горного производства. Это, например, массив каменной соли вокруг подземных хранилищ углеводородов при сезонных и оперативных закачках/отборе сырья; массив пород вокруг подземных выработок и карьеров при движении крупногабаритного транспорта, а также под влиянием вибраций от вращающихся частей мощных вентиляторов и т.д. При таких режимах эксплуатации максимальные значения нагрузок, как правило, не превышают определенного опасного уровня, а разрушение происходит из-за снижения прочности, происходящего в результате длительных циклических механических воздействий. В настоящее время значительное число стандартов и нормативных документов ориентируются на пределы прочности, полученные путем однократного, а не циклического нагружения образцов пород в условиях увеличивающейся нагрузки, что не дает адекватной оценки прочности сооружений по используемым на практике регрессионным зависимостям между ею и акустическими свойствами. Циклические режимы нагружения достаточно подробно исследованы на металлах, бетонах, полимерах и композитных материалах, а для горных пород такие режимы изучены в недостаточной степени, что определяет актуальность темы исследования.

Данная работа посвящена экспериментальному установлению взаимосвязей прочностных и акустических свойств осадочных горных пород при различных схемах и режимах их циклического механического нагружения.

Материалом для данной диссертационной работы послужили результаты, полученные автором при выполнении исследований в рамках грантов Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ): проект № 14-05-00362 «Оценка устойчивости конструктивных элементов систем разработки месторождений полезных ископаемых по взаимосвязям динамических акустических характеристик с остаточной прочностью горных пород»; проект № 17-

35-80028 «Влияние динамической механической нагрузки на взаимосвязь между изменениями прочности и акустической добротности образцов горных пород»; проект № 17-05-00570 «Закономерности влияния усталостных циклических нагружений и воздействий различной физической природы на прочность горных пород и ее взаимосвязи с акустической добротностью».

Цель работы

Целью работы является установление взаимосвязей между прочностными и акустическими свойствами осадочных горных пород при различных схемах и режимах их циклического механического нагружения для последующего обоснования новых способов определения прочностных свойств горных пород.

Основная идея работы – использование различных режимов циклических механических нагружений для создания нарушенности геоматериала и получение на этой основе зависимостей между акустическими и прочностными свойствами горных пород.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **задачи**:

1) разработка аппаратурного и методического обеспечения для испытаний образцов горных пород при различных режимах циклического нагружения;

2) установление закономерностей изменения прочностных и акустических свойств пород при медленно меняющихся циклических изгибных нагружениях гипсосодержащих горных пород сложной текстуры;

3) установление закономерностей изменения прочностных и акустических свойств каменной соли и мраморизованного известняка при медленно меняющихся циклических и импульсных повторяющихся нагружениях;

4) установление закономерностей изменения прочностных и акустических свойств известняков при воздействии на образец $2M$ циклов одноосного механического нагружения и воздействии M циклов сначала в одном, а затем M циклов во втором, перпендикулярном первому, направлении.

Методы исследований предусматривали комплексный подход к решению поставленных задач и включали: анализ современного состояния исследований в рассматриваемой области; лабораторные экспериментальные исследования, предусматривающие задание различных видов, схем и режимов нагружения, а также измерение акустических свойств в процессе нагружений; обработку результатов испытаний методами спектрального анализа и статистики 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 и их новизна

1. Разрушение контактов между доломитом и гипсом двухкомпонентной горной породы сложной текстуры при циклических изгибных нагружениях приводит к возрастанию акустической добротности образца, что связано со снижением демпфирующего влияния гипса, имеющего меньшие скорости распространения упругих волн и акустическую добротность, на доломит, у которого эти параметры больше; при последующем циклическом нагружении происходит разрушение, приводящее к уменьшению добротности.

2. Медленное циклическое одноосное нагружение образцов каменной соли и мраморизованного известняка сопровождается как процессами деструкции, так и процессами восстановления геоматериала, что при увеличении количества циклов проявляется в снижении и последующем увеличении предела прочности, а также скоростей упругих волн и акустической добротности; при импульсных повторяющихся воздействиях на эти же породы наблюдаются только процессы деструкции и снижение значений параметров, характеризующих указанные прочностные и акустические свойства.

3. Изменение прочностных и акустических свойств образца известняка различно при воздействии на него $2M$ циклов одноосного механического нагружения и воздействии M циклов сначала в одном, а затем M циклов во

втором, перпендикулярном первому, направлении. При этом в условиях нагружения в двух перпендикулярных направлениях по сравнению с нагружением в одном направлении предел прочности при сжатии, скорости распространения упругих волн и число импульсов акустической эмиссии больше, а акустическая добротность меньше.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

- непротиворечивостью полученных результатов общим законам физики, теории прочности и акустики;

- применением в экспериментах комплекса хорошо зарекомендовавших методов, методик, высокоточного измерительного и испытательного оборудования, используемых при схожих испытаниях горных пород и других материалов и позволяющих получать достоверные результаты, как при усталостных прочностных испытаниях, так и при определении их акустических свойств;

- положительными результатами проверки на модельных задачах разработанных алгоритмов и компьютерных программ, использованных для обработки и анализа результатов экспериментов;

- удовлетворительной сходимостью результатов, полученных с помощью лабораторных физических экспериментов на образцах горных пород и численным моделированием методом конечных элементов.

Научное значение работы состоит в установлении закономерностей изменения акустических и прочностных свойств осадочных горных пород при различных видах медленных и импульсных повторяющихся нагруженииий и создании основы для определения прочностных свойств горных пород акустическими методами.

Практическая значимость

Выводы и рекомендации, полученные на основе проведенных исследований, позволили разработать «Методические рекомендации по исследованию

прочностных и акустических свойств горных пород на образцах при различных схемах и режимах циклических механических нагружений», переданные в ООО «Газпром геотехнологии» для практического использования.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на следующих научных конференциях и симпозиумах: научный симпозиум «Неделя горняка» (2016–2020, Москва), XIX Уральская молодежная научная школа по геофизике (28-30 марта 2018, г. Екатеринбург), Семнадцатая международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле» (26-28 сентября 2016, г. Москва), Девятнадцатая международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле» (24-26 сентября 2018, г. Москва), II Всероссийская акустическая конференция, совмещенная с XXX сессией Российского акустического общества (6-9 июня 2017, Нижний Новгород), V-я Международная конференция «Триггерные эффекты в геосистемах» (4-7 июня 2019, Москва), 148th Annual Meeting of the Minerals, Metals & Materials Society TMS, (March 10-14, 2019, San Antonio, Texas, USA).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 8 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России и в изданиях, индексируемых в наукометрических базах Web of Science и Scopus, из них 2 в изданиях квартиля Q1 по SJR.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав и заключения, изложенных на 146 страницах машинописного текста, включает 52 иллюстрации, 17 таблиц, библиографический список из 103 наименований.

1 Анализ современного состояния исследований прочностных и акустических свойств горных пород при циклических механических нагружениях

1.1 Объекты, в которых горные породы находятся при циклических силовых воздействиях

Горные породы вокруг выработок находятся под воздействием долговременных статических нагрузок и ряда других внешних факторов, приводящих к их разрушению. К таким факторам, в частности, относятся механические усталостные повторяющиеся и циклические воздействия природного и техногенного характера, что должно быть учтено при проектировании и эксплуатации шахт, рудников, карьеров, подземных сооружений. Перечислим основные из них.

Массив горных пород при взрывах.

Взрывное разрушение горных пород является одним из основных методов технологии добычи полезных ископаемых. Многократное воздействие взрывов на участки массива вокруг выработок может приводить к нежелательным последствиям. В своих работах Мец Ю.С. [1, 2] отмечает особенность усталостного эффекта, возникающего при многократных нагрузках. Даже при их величине ниже статической прочности в нагруженном объеме горных пород нарастает ряд локальных ослабленных областей в виде микротрещин, что приводит к разрушению пород.

Поэтому понятно, что расчеты и моделирование взрывных воздействий на массив пород были и остаются предметом исследований. Так, например, для прогнозирования, анализа и контроля вибрации грунта, вызванной взрывом, Zhi Yu и др. [3] использовали модель «случайного леса» (RF), алгоритм оптимизации Харриса Хокса (HHO) и метод моделирования Монте-Карло. База данных из 137 наборов была собрана в разных местах вокруг карьера Тонглвшан в Китае. Для анализа в качестве входных переменных были выбраны семь исходных параметров, а в качестве выходной переменной была получена

пиковая скорость частиц. Для рассматриваемых условий в результате анализа средняя скорость частиц составила 0,98 см/с, а максимальная скорость частиц не превышала 1,95 см/с.

Массив горных пород вокруг подземных хранилищ углеводородов.

Мазуров В.А. в своей монографии [4] отмечает, что горные породы, расположенные вокруг подземных хранилищ углеводородов различных типов, подвергаются циклическим воздействиям давления газа. В работе [5] Labaune P. и др. анализируют режимы работы и методы проектирования каверн в соляных отложениях, предназначенных для хранения газа в условиях изменения напряженного состояния при циклических закачках и отборе флюида. Предложена новая методика, основанная на разработке реологической модели, включающей критерии дилатансии и растяжения, соответствующие долгосрочным и краткосрочным условиям изменения напряженного состояния массива.

Ma L.-J. и др. в работе [6] отмечают, что в процессе эксплуатации хранилища газа соляной массив вокруг емкости испытывает переменные нагрузки, повторяющиеся с периодами от суток до года. Модули упругости и коэффициенты Пуассона для каменной соли Цянцзяна (Qianjiang), теоретически рассчитанные по упругой части кривых напряжения-деформации до циклического нагружения, составляют 4,32–14,67 ГПа и 0,43–0,51 соответственно. Наблюдалось, что модуль упругости соли экспоненциально уменьшается с увеличением числа циклов нагружения. Снижение модуля, по-видимому, не зависело от приложенного уровня напряжений. Каменная соль проявляет деформационное упрочнение и сильную тенденцию к пластическому деформированию после определенного числа циклов нагружения. Процентное увеличение трехосной прочности на сжатие и общей деформации возрастает по мере увеличения амплитуды напряжений, частоты нагружения или бокового давления. Отметим здесь, что в данном исследовании проявились особенности реакции каменной соли на циклические нагружения: деформационное упрочнение, в отличие от многих других горных пород. В то же время при

указанном упрочнении наблюдается уменьшение модуля упругости, что не согласуется друг с другом. Упрочнение связано с уплотнением материала, а это приведет и к увеличению модуля упругости.

Guo Yi. и др. в своей публикации [7] процесс закачки и отбора природного газа в выработке-емкости разделяют на четыре этапа: закачка газа, состояние высокого давления, отбор газа и состояние низкого давления. В течение всего процесса хранения газа окружающий пласт остается в условиях циклических нагружений. Диапазон давления в каверне составляет от 5 до 14 МПа В этих условиях на одно из первых мест выходят вопросы сохранности хранилища, отсутствие разрушений, обеспечения прочности окружающего его соляного массива пород. В условиях циклического нагружения осевая деформация может быть разделена на три составляющие: начальная деформация, деформация с постоянной скоростью и ускорение деформации. Накопление деформации, включающей все три составляющие, приводит к повреждению образца. Начальная осевая деформация и коэффициент циклической осевой деформации будут увеличиваться с увеличением верхнего предела и среднего напряжения.

Имеются публикации, связанные с хранением газа не только в соляных отложениях, но и в пористых структурах. В результате постоянной смены циклов закачки и отбора газа, характерных для нормальной эксплуатации ПХГ, в таких породах формируются не только упругие деформации вмещающего пласта, но и остаточные, необратимые. Они приводят в итоге к перераспределению пор в среде, уменьшению пористости (прежде всего активной) и к частичному разрушению и новообразованию структурных связей. Так, Калиниченко И.В. и Тавостин М.Н. в своей работе [8] привели результаты исследования деформированности песчано–алевролитовых пород–коллекторов при циклической эксплуатации. Результаты исследований показывают, что количество циклов и величина амплитуды эффективного напряжения существенным образом влияют на появление необратимых деформаций уплотнения, а, соответственно, и к снижению пористости исследуемого материала. Необратимые

деформации в процессе циклического нагружения увеличиваются от 1,5 до 3,5 раз.

Пласты–коллекторы при добыче тяжелой и сверхтяжелой нефти.

Kun Guo и др. в [9], а также Dong X. и др. в [10] привели подробные обзоры существующих методов добычи тяжелой нефти. Данные методы основаны на циклическом нагнетании в пласты–коллекторы газов, жидкостей и флюидов и их отборе. Помимо температурного и химического воздействий, приводящих к увеличению текучести нефти, в этом случае осуществляется также циклическое механическое нагружение, приводящее к увеличению пористости и проницаемости пород.

Области повышенной сейсмичности

В работе [11] Зайнагабдинов Д.А. и Быкова Н.М. отмечают, что для транспортных тоннелей наиболее актуальным является учет сейсмических воздействий и активность разломной тектоники. Приводятся примеры смещения земной поверхности и горных блоков, регистрируемые инструментальными методами. Численным моделированием горной перемычки на Северо–Муйском тоннеле с использованием проектных данных и акселерограмм землетрясения магнитудой 5,5 баллов выявлено, что по границам горных блоков в разломных зонах фиксируется смещения до 7 мм и напряжения до 2,5 МПа, опасные для бетонных конструкций и окружающего массива пород. Показано, что для территорий с активной геодинамикой частое повторение сейсмических воздействий от землетрясений даже малой и средней интенсивности опасно накоплениями геодеформационных воздействий на тоннель.

Сильные сейсмические события во время и после гидроразрыва скважин с целью увеличения проницаемости пород являются основной проблемой при разработке геотермальных площадей, предназначенных для получения тепла из глубин Земли путем циркуляции жидкости через проницаемые породы. Это может привести к приостановке проектов из-за возражений со стороны властей и широкой общественности. Для разработки режимов гидроразрыва, позволяющих снизить сейсмичность, проводятся эксперименты в лабораторных и

натурных условиях. Zimmermann G. и др. в [12] предлагают новую схему циклического воздействия с увеличением и уменьшением давления, которая позволяет снизить сейсмическое воздействие, но в свою очередь увеличивает проницаемость горной породы.

Массив пород вокруг подземных выработок из-за сейсмики, движения транспорта, а также работающих вентиляторов проветривания.

Инженерные исследования показали, что окружающие горные породы подземных автомагистралей подвергаются многократным постпиковым циклическим нагрузкам и разгрузкам. Изучение механических характеристик горных пород после пиковой нагрузки и разгрузки необходимо для контроля массива горных пород и своевременного предотвращения его разрушения. Yang D. и др. в [13] показали, что кривые напряжение-деформация пород при постпиковых циклических нагрузках и разгрузках имеют значительные пластические петли гистерезиса. Кривая циклического нагружения и разгрузки может быть разделена на стадию уплотнения, стадию линейной упругой деформации, пик перед стадией нелинейной деформации, стадию разрыхления после пиковой деформации.

Согласно ГОСТ ИСО 10816–3–2002 [14] амплитуды перемещений при вибрациях от вентиляторов проветривания могут доходить до 140 мкм при колебательной скорости до 11 мм/с, а частотный диапазон вибраций может достигать 1000 Гц. Так, например, расчет показывает, что для вентилятора ВОКД–1,8 [15] при амплитуде A_{max} = 90 мкм, скорости V_{max} = 7,1 мм/с, частоте f_{max} = 16 Гц и массе 9233 кг максимально возможное ускорение составит $a_{max} = V_{max} \cdot 2\pi f_{max} = 713$ м/с^2, а сила воздействия на массив $F = ma_{max} = 6{,}59 \cdot 10^6$ Н или 659 т, что является значительным и может привести к процессам усталости и разрушения горных пород.

Из приведенного обзора можно сделать вывод, что циклические и повторяющиеся механические нагружения встречаются во многих объектах горного производства. Примерами являются массив горных пород на карьерах и вокруг

подземных выработок при взрывном разрушении пород, горные породы вокруг хранилищ углеводородов, массив пород вокруг тоннелей и выработок на горных предприятиях в областях повышенной сейсмичности и др. Поэтому изменения прочностных свойств горных пород при циклических механических нагружениях и их прогноз неразрушающими методами требуют пристального внимания и тщательного изучения.

1.2 Исследования механического поведения горных пород при циклических нагрузках

Исследования особенностей влияния циклических механических нагрузок на изменения прочности материалов проводятся в разных странах на протяжении многих лет. Результаты таких исследований, проводимых на сталях, изложены в обзорной работе Papuga J. [16]. В работе Nordby G.N. [17] отмечается, что первые испытания бетонов при циклических нагружениях были проведены в конце XIX века.

Свойства горных пород при циклически меняющихся во времени нагрузках также изучаются, в особенности в последнее время. По имеющимся сведениям, в нашей стране механические свойства горных пород при циклических режимах нагружения исследовались в 1970–х годах Миндели Э.О. и Мохначевым М.П. и были опубликованы в [18]. Авторы этих работ обращают внимание на то, что «для расчетов и проектирования необходимо руководствоваться показателями механических свойств горных пород, определенными при соответствующих напряженных состояниях и режимах повторно-переменного пульсирующего нагружения».

Экспериментальными исследованиями для таких горных пород, как габбро, мрамор, сильвинит, песчаник были установлены зависимости между максимальными действующими напряжениями, коэффициентом асимметрии и числом пульсирующих нагружений с одной стороны, и показателями проч-

ностных свойств с другой. Коэффициент асимметрии равен отношению минимальной нагрузки к максимальной. Установлено что предел усталостной прочности при сжатии примерно равен 50 %, а при растяжении 45 % от предела статической прочности при коэффициенте асимметрии, равном нулю. Повторно-переменные пульсирующие нагрузки при сжатии и растяжении со значениями ниже предела усталости не оказывают существенного влияния на показатели прочностных свойств.

Модули упругости для всех исследованных пород возрастают примерно до 10–го цикла на 25 %, а к моменту разрушения снижаются до 30 % от первоначального значения. Величины коэффициента Пуассона до первой сотни циклов снижаются на 25 – 30 %, а затем к моменту разрушения возникает резкое возрастание значений примерно на 40 %.

Авторами отмечено, что при циклических нагрузках деформации и микротрещиообразование отстают от изменения напряжений, что приводит к изменению вторичного поля напряжений. Характер разрушения при статическом и пульсирующем повторно–переменном сжатии различен. При статических испытаниях за время нагружения весь объем образца подвержен действию продольной сжимающей силы. В свою очередь циклические нагрузки кратковременны и основной отличительной чертой является периодическое нагружение и разгрузка образца. Разрушение при статических испытаниях образцов горных пород происходит с образованием конических объемов, а для испытаний в режимах пульсирующих нагружений характерно столбчатое разрушение образцов.

В работе [19] Roberts L.A. и др. рассмотрели влияние циклической нагрузки на ползучесть и дилатансию каменной соли. Проведены лабораторные испытания на ползучесть образцов каменной соли при трехосной циклической нагрузке. Испытания проводились при различных направлениях нагрузки, включая сжатие, растяжение и сжатие/растяжение. Испытания проводились в режимах как дилатанционных, так и недилатанционных напряже-

ний. Данные по ползучести при циклическом сжатии сравнивали со статическими испытаниями на ползучесть, выполняемыми в аналогичных условиях, чтобы оценить влияние циклического воздействия приложенного напряжения.

Циклическая усталость соляной горной породы имеет большое значение для подземных хранилищ газа. В работе [20] авторы Jinyang Fan и др. представили результаты серии периодических испытаний на циклическую нагрузку образцов каменной соли в связи с энергетическими хранилищами сжатого воздуха в соляных отложениях. Испытания проводились при прерывистом циклическом одноосном сжатии. Первое нагружение/разгрузка обозначались буквой F. За ними следовала такая же нагрузка/разгрузка, обозначаемая буквой *N* с последующим интервалом низкого напряжения LSI (Low-stress time interval). Затем режим испытания каждого образца предусматривал следующие друг за другом серии, состоящие из первого после LSI и второго сразу после него цикла нагружения/разгрузки каждое, обозначаемые буквами S и N соответственно. Такие серии парных нагружений были разделены интервалами низкого напряжения LSI. Поскольку критическое напряжение дилатансии было определено на уровне около 50% от прочности на сжатие, минимальный уровень напряжений σ_l на интервале LSI для разных образцов устанавливался постоянным на уровне 5%, 15%, 25%, 35% и 45% от предела прочности при одноосном сжатии. Максимальные напряжения задавались на уровнях 75 и 95% от этой величины. Для тестов длительность t_0 участка LSI выбиралась из ряда 3, 10, 30, 60, 120, 180 с.

По сравнению с обычными испытаниями на усталость испытания при прерывистом циклическом сжатии (Discontinuous cyclic compression tests, DCC) показали значительные различия: пластическая деформация, включая осевую, боковую и объемную, в циклах после воздействия временны*м*и интервалами LSI низкого максимального напряжения (S-циклы) была значительно выше, чем в циклах без такого воздействия (N-циклы, следовавшие после S-циклов). Осевая упругая деформация в S-циклах была меньше, чем в N-циклах,

в то время как в S-циклах и N-циклах боковая упругость отсутствует. Усталостная долговечность образцов при испытаниях DCC была заметно ниже, чем обычное значение, и уменьшалась, когда временные интервалы низкого напряжения LSI длились дольше.

Причина уменьшения усталостного ресурса и повышения пластической деформации объясняется сопряженным эффектом остаточного напряжения, дислокационного механизма и эффекта Баушингера. Остаточное напряжение создавалось несогласованным механическим откликом между двумя различными материалами (каменной солью и включениями) во время циклов нагрузки/разгрузки. Благодаря обратным движениям перед участком с низким напряжениям LSI-цикла эффект Баушингера облегчает перемещение дислокаций в процессе нагрузки S-циклов, что приводит к большей пластической деформации и меньшему усталостному сроку службы.

В работе [21] Min Zhang и др. привели результаты циклических усталостных испытаний прочного, склонного к хрупкому разрушению, угля. Работа содержит экспериментальные данные о рассеянии энергии, гистерезисе и микросейсмичности. Исследовались характеристики рассеяния энергии угля, подвергнутого многоуровневому циклическому нагружению с частотой от 1 до 10 Гц. Изучено влияние частоты воздействия на скорость рассеяния энергии за цикл нагружения. Были предложены два параметра гистерезиса в соответствии с видом зависимости напряжение-деформация при циклическом нагружении. Эти два показателя эффективны в качестве двойных предшественников для прогнозирования усталостного разрушения образцов угля. Параметр 1 относится к случаю, когда напряжение отстает от деформаций. Параметр 2 относится случаю, когда деформация отстает от напряжения. Два индекса показывают почти противоположную тенденцию во время циклической нагрузки. Резкое снижение параметра 1 и сильный рост параметра 2 указывают на то, что разрушение произойдет в ближайшее время. С точки зрения оценки эво-

люции разрушения эти два показателя также чувствительны, как и акустическая эмиссия. Увеличение частоты нагружения приводит к приблизительно линейному уменьшению обоих показателей гистерезиса.

Chongfeng Chen и др. в работе [22] изучали влияние циклов механических напряжений нагрузки и разгрузки на поведение ползучести пористого песчаника. Нагрузка и разгрузка во время испытания на ползучесть временно увеличивает амплитуду и частоту событий акустической эмиссии (АЭ). Это объясняется обострением кончиков трещин, ускоряющих растрескивание. Скорость нагрузки/разгрузки в диапазоне от 0,05 до 5 МПа/с не влияет на увеличение скорости деформации или активности АЭ после отдельных циклов нагрузки. Хотя циклы нагрузки/разгрузки способны обострять концы трещин и, следовательно, кратковременно увеличивать скорость деформации ползучести, диапазон скоростей нагрузки/разгрузки не влияет на количество обостряющихся микротрещин. Возмущения напряжения временно увеличивают скорость деформации и, следовательно, могут привести к катастрофическим и опасным разрушениям горных пород.

Влияние циклических нагрузок на механические свойства образцов гранита рассмотрены Momeni A. и др. в [23]. Остаточные осевая и боковая деформации породы уменьшаются с увеличением амплитуды воздействий. Эта тенденция была также обнаружена для наклонов кривых и накопления повреждений на второй стадии деформирования в зависимости от времени. После нескольких начальных циклов нагружения породы проявили почти упругое поведение. Однако с увеличением числа циклов наблюдалось упругопластическое поведение. Можно сделать вывод, что с увеличением числа циклов уровень предела текучести снижается, и пластическое поведение становится доминирующим в каждом цикле.

В различных объектах встречаются не только одноосное, но также 2-х и 3-хосное усталостное и циклическое нагружения горных пород. Ниже анализируются публикации, касающиеся многоосных циклических испытаний пород.

В обзорной статье [24] Cerfontaine B., Collin F. представили всесторонние сведения о циклическом и усталостном поведении горных пород при разных режимах испытаний. Циклы нагружения могут иметь синусоидальную, прямоугольную и треугольную форму. Применяются режимы с линейным или ступенчатым увеличением максимальной нагрузки и с линейным увеличением минимальной нагрузки или ее постоянным значением. В большинстве экспериментов регистрируются только механические информативные параметры, такие, как нагрузки и деформации. Часть экспериментов проводится с регистрацией параметров акустической эмиссии. Значительно меньше количество работ, в которых проводились измерения других акустических параметров, таких, как скорости упругих волн в зависимости от количества циклов нагружений.

Упругое и пластическое деформационное поведение глинистого субстрата, подвергавшегося повторным нагрузочным трехосным испытаниям, описали Venkatesh N. и др. в [25]. Предполагается, что модуль упругости учитывает накопление пластической деформации, при этом у некоторых почв с малыми размерами частиц проявляется чрезмерная пластическая деформация при многократных нагрузках, даже если субстрат имеет ярко выраженные упругие свойства.

Влияние частоты циклических нагружений на изменение свойств песчаника рассмотрели Kang Peng и др. в [26]. Отмечается, что при изменении продолжительности циклов нагружения увеличение их частоты препятствует закрытию первичных микротрещин, а также возникновению и развитию новых микротрещин. В результате модуль упругости породы незначительно увеличивается. Однако в случае изменения количества циклов нагружения изменения модулей упругости породы сильно различалось. Из-за наличия эффекта уплотнения увеличение частоты сначала приводит к упрочнению породы; впоследствии эффект чрезмерного сжатия ведет к тому, что модуль упругости приблизился к значению, наблюдаемому на стадии упругости во время обычного испытания на трехосное сжатие, то есть увеличение частоты приводит к

тому, что порода всегда остается на стадии упругости. На процесс накопления остаточной деформации оказывают влияние два параметра частоты нагружений. Увеличение числа циклов нагружения приводит к внезапному увеличению остаточной деформации, тогда как сокращение длительности циклов нагружения лишь незначительно увеличило остаточную деформацию.

Исследования усталостного поведения различных горных пород в условиях последовательной нагрузки, прикладываемой к образцу в круговом направлении при вращениях образца в машине для испытания на усталость описали Jamali S. и др. в [27]. Результаты получены на образцах габбро, мрамора и зеленого оникса. Они показывают линейную тенденцию изменения предельного напряжения в зависимости от числа циклов нагружения (диаграмма S-N), а также наличие предела выносливости, наблюдаемого у черных металлов. Кроме того, результаты иллюстрируют, что пределы выносливости для всех кристаллических пород этого исследования находятся в диапазоне от 0,4 до 0,6 от их статической прочности на растяжение. Более высокое сопротивление усталости проявилось в более мелкозернистых породах.

В [28] He C. и др. описывают испытание образцов гранита в условиях бокового сжатия по двум осям и при динамическом взрывном нагружении вдоль третьей оси. Отмечается, что зона центросимметричного повреждения создается вокруг ствола скважины, когда соотношение горизонтального и вертикального давления $K = 1$, сжимающее напряжение по окружности формируется боковым давлением, и оно уменьшает разрыв породы при ее растяжении по окружности при взрывной нагрузке. Количество и размеры нарушенного радиуса значительно уменьшаются с увеличением бокового давления. Когда K уменьшается от 1 до 0, концентрация растягивающих напряжений, очевидно, происходит вокруг скважины в вертикальном направлении, и радиальные трещины растут из зоны концентрации напряжений.

В работе [29] Wang Yasong и др. исследовали усталостные свойства каменной соли. Отмечается, что накопление повреждений при усталостных испытаниях увеличивается с уменьшением частоты и увеличением амплитуды

нагрузки. Чтобы учесть их влияние на поведение каменной соли при циклических нагрузках, была разработана модель усталостного повреждения в сочетании с формулой Мэнсона–Гроба. Предложенное уравнение развития повреждений было подтверждено экспериментальными результатами и доказало свою эффективность в прогнозировании усталостного повреждения каменной соли при различных частотах и амплитудах нагрузки.

Прогнозирование усталостного ресурса при многоосной случайной нагрузке рассматривается авторами Wang C.H. и др. в [30] как чрезвычайно сложная тема. Предлагается метод многоосного непропорционального подсчета циклов и алгоритм расчета усталостных повреждений, которые сравниваются с уже имеющимся методом поиска повреждений.

Экспериментальное исследование циклической усталости гранита и диабаза при трехосном сжатии было проведено Scholz C.H. и Koczynski T.A. в [31]. Было обнаружено, что при циклических нагружениях этих пород дилатансия прогрессивно развивалась во времени по форме, очень похожей на кривую ползучести. Во всех случаях дилатансия проявляла ярко выраженные анизотропные свойства. Возрастание дилатансии во время циклического нагружения вызвано прогрессирующим расширением ползучести, а также дополнительной поврежденностью, вызванной самими циклами нагружений. Первое приводит к выраженному влиянию скорости нагружения на усталость, второе – к сложному влиянию амплитуды цикла на усталость.

Эксперименты по исследованию процесса усталости гранита описаны Chen Y. и др. в [32], где цилиндрические образцы гранита Westerly диаметром 10 мм и длиной 20 мм подвергались циклической нагрузке. Испытания проводились при одноосном сжатии с максимумом 140 МПа при комнатной температуре. Процесс усталости делится на три характерных этапа: первичная стадия, в которой верхняя пиковая деформация растет с уменьшающейся скоростью (стадия I), вторая стадия с линейно увеличением скорости деформацимирования после стадии I (стадия II), и третья и последняя стадия, в которой верх-

няя пиковая деформация увеличивается с ускоряющейся скоростью и завершается разрушением образца (стадия III). На начальной стадии деструкции в кварцевых зернах был выявлен характерный рост трещин. Подсчитано, что замедление скорости роста деформации на этом этапе было вызвано уменьшением роста трещины. На втором этапе не было выявлено значительного роста трещин в кварцевых зернах. С другой стороны, в зернах полевого шпата наблюдалось развитие трещин, которые не переросли в межзерновые и прорастали параллельно направлению нагрузки. На последнем ускоренном этапе было обнаружено значительное количество межзеренных трещин, идущих параллельно направлению нагрузки. Очевидно, что эти трещины были сформированы в основном за счет связывания и роста внутризерновых трещин в полевых шпатах, которые возникли на первых этапах. Их формирование переносит процесс усталости со второй стадии на конечную стадию с резким увеличением напряжения, и их дальнейшее развитие привело образец к усталостному разрушению.

В работе [33] Taheri A. и др. проведено экспериментальное исследование изменения пиковой прочности песчаника во время трехосных циклических испытаниях при сжатии. Циклические испытания проводились на разных уровнях постоянного напряжения и амплитуд циклических нагружений/разгрузки. Все испытания проводились при боковом давлении 4 МПа. В зависимости от уровня приложенной нагрузки при циклических испытаниях может наблюдаться как увеличение, так и снижение прочности образцов горных пород.

В работе [34] авторы Åkesson U. и др. исследовали, как происходит зарождение и распространение трещины во время одноосного циклического нагружения. Механическое испытание было выполнено на буровых кернах из изотропного гранита. Результаты показывают, что циклическая нагрузка вызывает образование новых трещин и прорастание существующих микротрещин. Новые трещины возникают, в основном, в полевом шпате и ориентированы параллельно оси бурильной колонны.

В [35] Skallerud B. моделирует накопленное повреждение при двухосной усталостной нагрузке малой амплитуды. В качестве параметра поврежденности используется пластическая работа за цикл двухосевого циклического сжатия.

Поведение при гидроразрыве в условиях двухосного статического сжатия вместе с циклическим динамическим возмущением образцов красного песчаника исследовано Ma C. и др. в [36]. Усталостная прочность образца обычно составляет не более нескольких декадных циклов в современных условиях нагружения. Усталостная долговечность породы, когда предварительно нагруженная нагрузка двухосного сжатия превышает предел текучести, намного короче, чем, когда предварительная нагрузка двухосного сжатия меньше предела упругости.

В [37] Zuo Y.-J. и др. описаны результаты двухосного испытания образцов красного песчаника, подвергнутого статической и динамической нагрузкам. Испытания проведены на установке, собранной из разработанного авторами устройства одноосного горизонтального статического нагружения и электрогидравлической и сервоуправляемой машины для испытания материалов Instron в условиях вертикальной циклической нагрузки.

В монографии [38] и других публикациях [39, 40] Мохначев М. П., Присташ В. В. и др. рассмотрели вопросы динамической прочности и деформируемости горных пород, в том числе при циклических нагружениях. Приведен анализ методов, теоретических и экспериментальных исследований, а также описаны новые методы и аппаратура для исследования динамической прочности и деформируемости горных пород. Приводятся результаты испытаний и обобщающие закономерности изменения прочности и деформируемости горных пород в условиях одноосного напряженного состояния в диапазоне широкой вариации скоростей нагружения. Рассмотрены процессы поглощения волн напряжений в образцах горных пород и их характеристики как мера оценки энергетических затрат на динамическое деформирование и разрушение.

Приведенный обзор публикаций позволяет сделать следующие выводы. Испытания образцов горных пород проводятся в различных режимах, как в зависимости от условий, в которых находятся породы в натурных объектах, так и в абстрактных режимах, позволяющих раскрыть особенности свойств ползучести и усталости пород. Имитируется нагружение соляных горных пород в реальных условиях подземных хранилищ газов с переменными давлениями и различной длительностью стадии низкого давления. В некоторых испытаниях используется сочетание статической и циклической нагрузок, что соответствуют их воздействию в массивах пород на определенной глубине. Испытания проводятся как при больших амплитудах изменения нагрузки при минимальных значениях от 5% и максимальных до 95% от предела прочности при разрушении, так и при постоянной нагрузке, соответствующей напряженному состоянию пород на заданной глубине, в сочетании с циклически меняющейся нагрузкой небольшой амплитуды. С точки зрения направления воздействий испытания проводятся как при одноосных циклических воздействиях, так и при двух– и трехосных циклических нагружениях, а также при одноосной нагрузке, меняющей свое направление. Тем не менее, большое количество типов пород, а также видов напряженных состояний, условий, параметров и режимов нагружений, встречающихся в реальных объектах, оставляет значительное поле для исследования свойств горных пород при циклических механических воздействиях.

Приведенные выше публикации свидетельствуют о необходимости проведении испытаний не только традиционными методами, но и с использованием различных режимов циклических и повторяющихся нагружений.

1.3 Совместные циклические механические и акустические испытания образцов горных пород с целью прогнозирования их прочности

Ввиду необходимости исследования механики процессов разрушения чисто механические циклические испытания занимают значительную часть

проводимых исследований. В то же время требования более всестороннего изучения процессов деструкции горных пород, а также необходимость прогнозирования их состояния при циклических воздействиях заставляет наряду с механическими методами испытаний использовать и другие. К числу наиболее часто используемых методов относятся акустические испытания, среди которых значительное место занимает регистрация акустической эмиссии (АЭ).

Лавров А.В., Шкуратник В.Л., Филимонов Ю.Л. в [41], а также в [42] дали обзор и привели результаты экспериментально установленных особенностей акустико–эмиссионного эффекта Кайзера, проявляющего себя при циклических или повторяющихся нагружениях. Активность АЭ резко возрастает, как только превышается самый большой ранее испытанный уровень напряжения. Эффект Кайзера можно рассматривать как основу для измерения напряжений в породах. Обсуждаются механизмы и теоретические модели данного явления. Объяснены методы измерения напряжений, основанные на эффекте Кайзера в образцах керна и в породах вокруг скважины и проанализированы их сильные и слабые стороны.

В статье [43] Eberhardt E. и др. представили методику, основанную на совместном использовании тензометрических измерений и регистрации акустической эмиссии, позволяющую идентифицировать и характеризовать процессы хрупкого разрушения, вызванные одноосным сжимающим нагружением. Результаты испытаний одноосного циклического нагружения показывают, что повреждение и последующие характеристики деформации поврежденной породы можно легко определить количественно путем нормализации напряжений и деформаций, наблюдаемых при переходе от одной стадии развития трещины к другой. Испытания на циклическую нагрузку с контролируемым повреждением впоследствии использовались для изучения влияния накопления повреждений от трещин и его влияния на изменение характеристик деформации породы.

Исследователями Jiang Xu и др. в [44] показано, что для мониторинга в реальном времени процесса образования микротрещин и процесса разрушения

в образце породы можно использовать акустическую эмиссию. Исследовались цилиндрические образцы песчаника диаметром 50 мм и высотой 100 мм. Сигналы АЭ таких материалов, как горные породы, возникают в результате их повреждения. Кривая накопленных сигналов АЭ была преобразована в кривую, характеризующую усталостное повреждение. Данная кривая явно указала на характеристику «трехфазного правила развития» необратимой деформации породы, соответствующей правилам развития усталостного повреждения.

Эффект Кайзера лег в основу многих методов диагностики состояния сооружений. В [45] Третьякова К.В. и Бельтюков Н.Л. описали эксперименты по циклическому нагружению образцов сильвинита в режимах одноосного сжатия и трехточечного изгиба с регистрацией параметров АЭ, проведенные для оценки влияния степени нарушенности на акустико-эмиссионные параметры соляных пород. Степень нарушенности образцов оценивалась как отношение максимальной нагрузки цикла к его пределу прочности. По результатам испытаний установлены зависимости параметров АЭ от степени поврежденности образца.

Гораздо реже, по сравнению с АЭ, для оценки степени деструкции горных пород при циклических нагружениях исследователи используют другие акустические свойства, такие, как скорости упругих волн. В ряде работ Rao M.V.M.S. и Ramana Y.V. [46], Lockner D. [47], Chow T.M., Meglis I.L. и Young R.P. [48] показано, что данные параметры также возможно успешно использовать для оценки степени деструкции геоматериала и предсказывать изменения прочностных свойств горных пород.

В работе [49] авторами Ding Qi-Le и Song Shuai-Bing были получены взаимосвязи между скоростью P-волны и механическими свойствами песчаника при испытаниях на одноосное сжатие, а также подвергнутом различным высокотемпературным обработкам или циклам замораживания-оттаивания (F-T). После высокотемпературной обработки механические испытания образцов показали зависимость между скоростью P-волны и механическими характери-

стиками, хотя было много исключений. После циклов механических испытаний F-T, механические свойства и скорость P-волны демонстрировали различные изменения. Значения механических свойств (предел прочности при сжатии и модуль Юнга) немного уменьшились после 30, 40 и 50 циклов нагружений, тогда как скорость P-волны показывала разнонаправленные изменения, она как возрастала, так и снижалась. Исследования показали, что существует статистическая взаимосвязь между скоростью P-волны и механическими свойствами, такими, как предел прочности при сжатии и модуль Юнга.

Для оценки предела прочности используются современные компьютерные технологии. В исследовании [50] Umrao R.K. и др. предлагают подходящие прогностические модели для оценки предела прочности при сжатии (UCS) осадочных пород с использованием адаптивной системы нейро-нечеткого вывода (ANFIS). Новый практический инструмент машинного обучения, известный как модель случайного леса (RF), был использован в [51] для определения прочности при одноосном сжатии горной породы (UCS). В работе [52] Ündül Ö. и Er S. исследуют взаимосвязь между физическими (эффективной пористостью и скоростями P–волн) и механическими (пределом прочности при одноосном сжатие (UCS), пределом прочности при растяжении по бразильской схеме (BTS)) и другими свойствами породы.

Как показал приведенный обзор, из всех разновидностей акустических измерений при циклических испытаниях горных пород в качестве информативного параметра для оценки степени деструкции геоматериала и изменений прочности в основном применяется метод акустической эмиссии. Гораздо реже в качестве предвестников разрушения при циклических испытания горных пород применяются скорости упругих волн.

Стоит отметить, что исследователями практически полностью оставлено без внимания такое свойство, как акустическая добротность. В ряде работ показано, что существуют взаимосвязи между изменениями предела прочности и акустической добротностью. Число исследований, в которых было бы отражены изменения скоростей упругих волн, а также коэффициента их затухания

или акустической добротности при циклических усталостных нагружениях, ограничено.

Кроме скоростей упругих волн в горных породах также исследуются коэффициент затухания (α) упругих волн и добротность (Q). Для определения зависимости коэффициентов затухания упругих волн и значений акустической добротности от частоты для разных видов горных пород El-Sherbiny S.M.M. и др. в лабораторных условиях измеряют параметры распространения ультразвуковых волн в сухих породах [53]. В [54] Ma R. и др. исследовали затухание упругих волн в зависимости от насыщения нефтью и газом пор различных горных пород. Ультразвуковые исследования распространения поперечных волн были проведены в [55] для измерения скорости и затухания в некоторых породах и других материалах. Было обнаружено, что «уширение импульса», возникающее из-за затухания, может быть измерено довольно точно. Его можно использовать для определения добротности Q, из которого рассчитывается затухание поперечной волны с использованием стандартных соотношений. Скорости и добротности при распространении волн сжатия и сдвига были измерены Hennah S.J.J. и др. в [56] для трех песчаников и трех известняков в условиях сухих и полностью на 100% насыщенных образцах на ультразвуковых и звуковых частотах при эффективном давлении до 60 МПа. Показано, что неоднородность породы связана с характером затухания, измеренным в широком диапазоне частот. В [57] Guo M.Q. и др. исследуют акустические добротности код продольных Q_{PC} и поперечных Q_{SC} волн как функции частот и устанавливают их масштабную зависимость от изменений напряжений в породах путем сравнения с собственными добротностями Q_P и Q_S, рассчитанными по ультразвуковым измерениям. Все приведенные работы исследуют затухание и добротность для оценки содержания флюидов или напряжений в массиве пород. В то же время приведенные публикации показывают достаточно большое количество методов, которые могут быть использованы на практике для определения

затухания и добротности. Публикаций, посвященных определению прочностных свойств по этим информативным параметрам, особенно при циклических или периодических воздействиях, гораздо меньше.

Одной из таких работ является диссертация Я.О. Куткина [58], которая посвящена прогнозированию прочности горных пород по их акустической добротности. В этой работе особое внимание уделено ей, как наименее исследованному информативному акустическому параметру в ее связи с пределом прочности. В этой работе проведено исследование таких пород, как известняк, травертин, габбро, мрамор и гипсосодержащие породы при одноосном сжатии и растяжении. Показано влияние масштабного фактора на взаимосвязи между пределом прочности и акустической добротностью. Показано отличие этих зависимостей при одноосном сжатии и растяжении образцов. В то же время ввиду ограниченности объема работы ряд вопрос не был освещен, что оставляет место для дальнейших экспериментов в этом направлении. В частности, не исследованы в достаточной степени связи акустических свойств с пределом прочности при растяжении, полученном при циклических изгибных испытаниях образцов-балок, испытания каменной соли, а также многоосной усталостной прочности при циклических нагружениях.

Следует упомянуть ряд исследований, задачей которых было устанвление физических механизмов и прогнозирование разрушения горных пород. Среди них работы Г.А. Соболева и др. [59, 60]. В то же время в них не отражены свойства пород при повторяющихся или циклических воздействиях.

1.4 Выводы и постановка задачи исследования

Из приведенного обзора можно сделать вывод, что повторяющиеся или циклические механические нагружения встречаются во многих объектах горного производства. Примерами являются массив горных пород на карьерах и вокруг подземных выработок при взрывном разрушении пород, горные по-

роды вокруг хранилищ углеводородов, тоннели и горные предприятия в областях повышенной сейсмичности и др. Поэтому изменения прочностных свойств горных пород при циклических механических нагружениях требуют пристального внимания и тщательного изучения.

В настоящее время циклические испытания проводятся как при больших амплитудах изменения нагрузки, так и при постоянной нагрузке, соответствующей напряженному состоянию пород на заданной глубине, в сочетании с циклически меняющейся нагрузкой небольшой амплитуды. Испытания проводятся как при одноосных циклических воздействиях, так и двух– и трехосных циклических нагружениях. В то же время из всех разновидностей акустических измерений при циклических испытаниях горных пород в основном применяется только метод акустической эмиссии. Публикации, в которых было бы отражено исследование изменений скоростей упругих волн, а также коэффициента их затухания или акустической добротности при повторных или циклических усталостных нагружениях либо отсутствуют, либо число таких исследований ограниченно.

Как показал проведенный анализ публикаций, взаимосвязи прочностных и акустических свойств осадочных горных пород при циклических нагружениях не исследованы в достаточной степени. В частности, можно отметить следующее. Среди пород осадочного типа не проведены исследования указанных взаимосвязей при циклическом одноосном сжатии каменной соли. Не проведены исследования на образцах–балках при изгибе двухкомпонентных пород. Не исследованы в сравнении друг с другом особенности изменения акустических параметров при повторяющихся или циклических механических нагружениях в одном, а также сначала в одном, а затем в перпендикулярном направлениях.

Поэтому исследование прочностных свойств горных пород при их циклическом нагружении во взаимосвязи с акустическими свойствами представляется перспективным направлением исследований.

Целью работы является установление взаимосвязей между прочностными и акустическими свойствами осадочных горных пород при различных схемах и режимах циклического механического нагружения для обоснования разработки новых способов неразрушающего контроля прочностных свойств горных пород.

Для достижения поставленной цели в работе предполагается решение следующих задач исследования взаимосвязей между прочностными и акустическими свойствами на ряде осадочных горных пород:

1) разработка аппаратурного и методического обеспечения для испытаний образцов горных пород в различных режимах медленного циклического и импульсного повторяющегося нагружения;

2) установление закономерностей изменения прочностных и акустических свойств двухкомпонентных горных пород состава доломит–гипс при медленных циклических изгибных нагружениях;

3) установление закономерностей изменения прочностных и акустических свойств каменной соли при импульсных повторяющихся нагружениях в сравнении с медленными циклическими нагружениями;

4) установление закономерностей изменения прочностных и акустических свойств известняков при одноосных нагружениях полностью в одном, а также сначала в одном, а затем в перпендикулярном ему направлениях.

2 Аппаратное и методическое обеспечение исследований

2.1 Общие требования к системе для лабораторных исследований и ее описание

Оборудование для испытаний образцов пород при циклических нагружениях должно включать установки для их нагружений по заданным программам, а также измерительные приборы для цифровой регистрации, записи показаний и их обработки. Установки для циклических и повторяющихся нагружений должны обеспечивать два вида изменения нагрузок, приводящих к различным воздействиям на образцы. Одну группу составляют воздействия, цикл нагрузки/разгрузки которых длится от нескольких единиц до нескольких десятков и более секунд. К другой группе относятся быстрые, динамические воздействия в диапазоне от нескольких долей до нескольких десятков и сотен миллисекунд.

В соответствии с этим будут различны и требования к параметрам систем, регистрирующих информативные параметры при испытаниях на этих установках нагружения. В то же время какие-то части регистрирующих систем могут быть задействованы в обоих видах испытаний. Это должно быть учтено при разработке единой регистрирующей системы, включающей как общие, так и индивидуальные составные части.

Таким образом, лабораторный комплекс для испытаний образцов горных пород при медленных и быстрых нагружениях содержит две установки для нагружения и одну общую измерительную систему, содержащую блоки статических и динамических измерений нагрузок и деформаций, а также подсистемы и приборы акустических измерений.

В испытательном комплексе, на котором были получены результаты, изложенные в диссертации, были использованы две установки для нагружений образцов. Основой системы, используемой для медленных нагружений, является универсальный автоматизированный испытательный комплекс АСИС

производства компании ООО «НПП «Геотек», г. Пенза. Динамические нагружения образцов производились на разработанной при участии автора установке на основе разрезных стержней Гопкинсона.

Общая функциональная схема измерительной части представлена на рисунке 2.1.

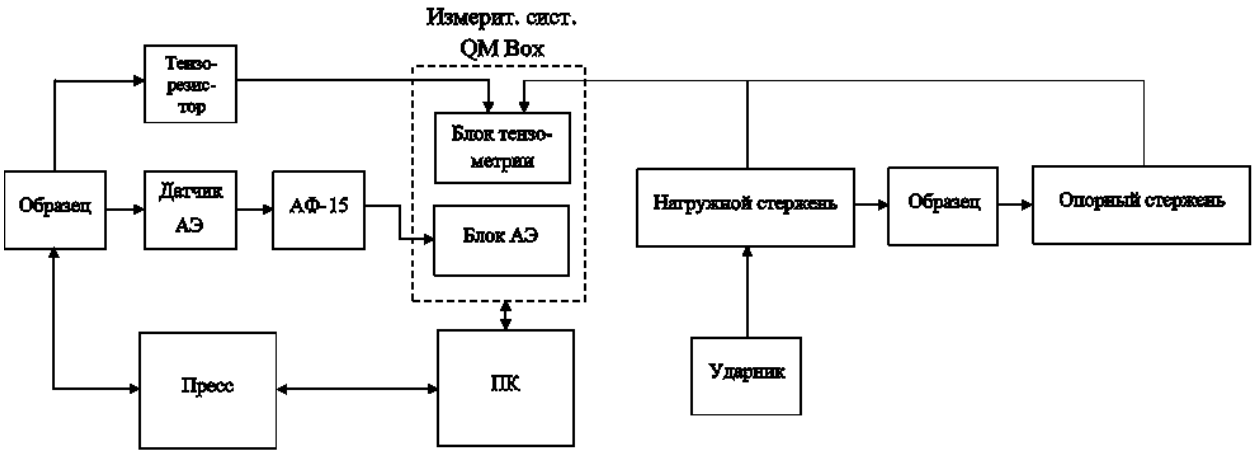


Рисунок 2.1 – Блок схема измерительной системы

В зависимости от вида испытаний конфигурации силовой и измерительной частей менялись.

2.2 Лабораторная установка для испытания образцов-балок горных пород при медленных нагружениях сжатия, растяжения и изгиба

Система построена по модульному принципу, что позволяет ее наращивать и увеличивать количество регистрируемых информативных параметров. Основой системы является универсальный автоматизированный испытательный комплекс АСИС производства компании ООО «НПП «Геотек». Лабораторная установка состоит из механической [61] и акустической частей.

Система предназначена для испытаний образцов пород как при однократном нагружении для определения прочности и деформируемости пород, так и при многократном для испытания образцов на усталость. Небольшие усилия машины нагружения, равные 30 кН, вполне достаточны для испытания образцов-балок на прочность при изгибе в соответствии с ГОСТ 30629-2011.

Такое усилие позволяет также испытывать образцы ряда пород, обладающих невысоким пределом прочности при сжатии и растяжении, осуществляемом по бразильской схеме. К стандартной базовой части были добавлены приспособления, позволяющие испытывать и регистрировать дополнительные показания и останавливать нагружение до хрупкого разрушения. Это дает возможность после остановки нагружения произвести дополнительные исследования образцов, включающие акустические измерения скорости распространения упругих волн и добротности образцов непосредственно перед разрушением. Схема конфигурации системы, предназначенной для испытания образцов-балок при изгибе, представлена на рисунке 2.2.

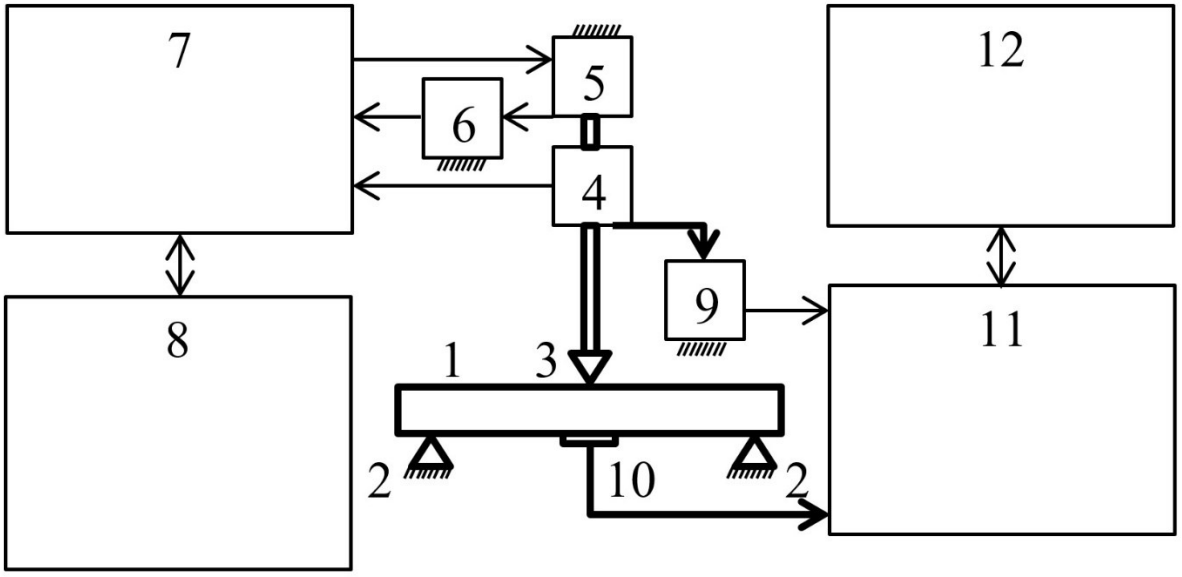


Рисунок 2.2 – Схема лабораторной установки для испытания образцов-балок горных пород

Образец 1 устанавливается на двух опорах 2 и нагружается сверху подвижной третьей опорой 3, механически соединенной через измеритель силы 4 с блоком нагружения 5, а также с измерителем перемещения 6. Электрические выходы измерителей 4 и 6 соединены с измерительными входами блока управления 7, выход которого подключен к блоку нагружения 5. Блок 7 соеди-

нен также с компьютером управления нагрузкой и регистрации хода эксперимента 8. В ходе эксперимента на этом компьютере записываются показания нагрузки на образец.

Система снабжена измерителем прогиба 9 и тензорезистором 10, размещенным в нижней центральной части балки, которые электрически подключены к блоку измерения и регистрации 11, а через него – с компьютером измерения и регистрации 12. Он задает режим снятия показаний во времени и осуществляет регистрацию деформаций балки. Тензорезистор 10 позволяет более детально наблюдать за образованием трещины в нижней части балки. Если трещина намечается в средней части балки, показания тензорезистора будут отмечать растяжение, если же трещина появляется в стороне, то сжатие.

Для механических испытаний образцов-балок при изгибе по трехточечной схеме был разработан блок, включающий помимо трех опор также и измеритель прогиба. Часть испытательной установки с приспособлением для испытания образцов при изгибе изображена на рисунке 2.3. Трехточечная схема нагружения соответствовала испытаниям образцов горных пород при изгибе в соответствии с [62].

Образец горной породы 1 установлен на две нижние опоры, а верхняя опора 2 передает нагрузку на центральную часть образца. Деформометр 3 измеряет перемещения центральной части образца относительно нижних опор. Вертикальные перемещения контролируют индикатор часового типа 4 и резистивный преобразователь перемещений 5. Динамометр 6 измеряет нагрузку на образец. АЕ-сенсор 7 установлен в центральной части образца и прижат к нему резиновой лентой. В центре нижней стороны образца размещен тензорезистор 8 для регистрации деформаций растяжения. Вблизи образца располагаются также опорные тензорезисторы 9 мостовой схемы измерения, наклеенные на аналогичный образец для компенсации температурных изменений окружающей среды.

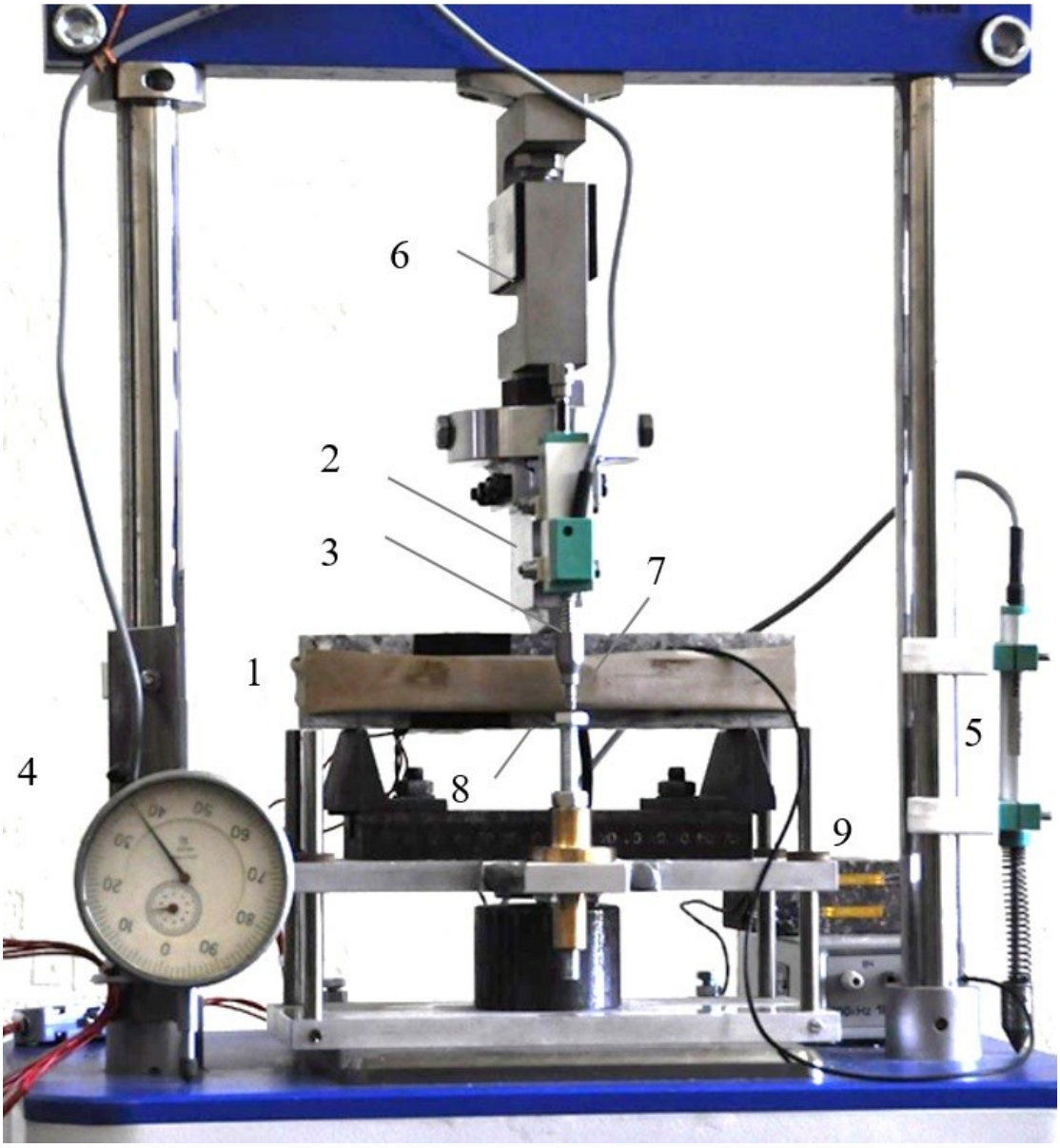


Рисунок 2.3 – Механическая часть лабораторной установки для испытаний образцов горных пород при изгибе (объяснения в тексте)

Электронная часть лабораторной установки включает:

- подсистему компьютерного управления нагруженим с блоками регистрации нагрузки и перемещений траверсы;
- подсистему измерения вертикальных перемещений центра образца относительно нижних опор и регистрации растяжений тензорезистора в нижней части образца.

На основе описанной установки производились также испытания образцов при сжатии и растяжении по бразильской схеме. Более подробное описание базовой части для этого варианта приведено в [63].

Обе подсистемы обеспечивают регистрацию механических параметров, необходимых для последующего анализа результатов и их сопоставления с результатами акустических измерений.

Подсистемы акустических измерений между сериями усталостных циклических нагружений с помощью установки «Ультразвук» (ООО «Экогеос-Пром», г. Тверь, Россия) обеспечивали измерения скоростей продольных и поперечных упругих волн. Также резонансным методом измерялась акустическая добротность Q образца на установке, разработанной с участием автора.

Кроме того, система QM-Box (ООО «R-Technology», Moscow, Russia) в связке с прибором АФ-15 производила регистрацию акустической эмиссии в полосе частот от 20 до 200 кГц во время серий усталостных нагружений. Эта подсистема регистрировала полную форму сигналов и активность акустической эмиссии $\dot{N}_{\Sigma}$, которые выводились на экран компьютера в процессе экспериментов, что позволяло следить за их ходом.

2.3 Лабораторная установка для испытаний образцов горных пород при динамических нагружениях

Для изучения взаимосвязи акустических и механических свойств горных пород при больших скоростях нагружения была сконструирована установка, основанная на принципах ударного нагружения образцов, предложенных в 1913 г. Бертрамом Гопкинсоном (B. Hopkinson) и опубликованных в работе [64]. В работе [65] описывается суть метода и конструкция установки, разработанной H. Kolsky в 1949 г. и основанной на разрезном стержне Гопкинсона (Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB). Принцип действия и внешний вид установки иллюстрируется схемой, представленной на рисунке 2.4 [66].

Лабораторная установка состоит из нагружного 1 и опорного 2 стержней, ударника 4 с пневматической системой управления и основанием 5 с виброопорами (6) для акустической развязки.

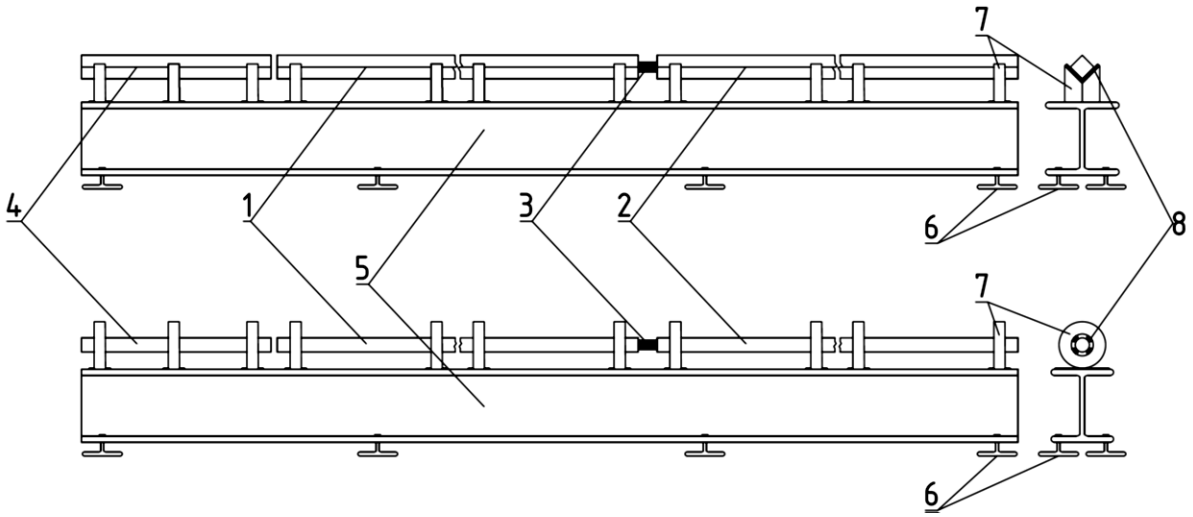


Рисунок 2.4 – Схема лабораторной установки для динамических испытаний образцов горных пород

Установка включает в себя два варианта испытательных стендов, отличающихся материалами стержней. Стержни выполнены из материалов 2–х видов: гранит и сталь. Гранитные стержни квадратного сечения и имеют размеры 50×50×1500 мм и используются при испытаниях горных пород с невысокой прочностью, как, например, каменная соль. Для испытаний более прочных пород используются стальные стержни круглого сечения диаметром 30 мм и длиной 1500 мм. Схема установки со стальными стержнями представлена в нижней части рисунка 2.4. Для обеспечения корректной работы установки необходимо, чтобы фронт ударной волны максимально приближался к плоскому. Это осуществляется с помощью длины нагружного и опорного стержней, значительно большей их ширины. Для уменьшения потерь от отражений на контакте стержня и образца породы стержни выполнены из гранита и имеют близкие с образцами волновые сопротивления, как это выполнено в работе [67].

Стержни находятся на специальных опорах 7 из алюминиевого профиля с антифрикционными вставками 8 из фторопласта-4 толщиной 8 мм для снижения силы трения между стержнем и опорой. Для обеспечения соосности стрежней опоры имеют возможность регулировки положения в пространстве. Между торцами этих стержней закрепляется исследуемый образец горной породы 3.

Ударник в одном случае представляет собой гранитный стержень с размерами 50×50×300 мм и массой 2 кг, а в другом – стальной стержень диаметром 30 мм и длиной 300 мм. Его функция состоит в том, чтобы совершать ударные воздействия на стержни и возбуждать в последних короткие ударные импульсы. Для того чтобы создать достаточное воздействие, скорость, с которой должен двигаться ударник, должна быть примерно равной 1 м/с и не меняться от эксперимента к эксперименту. Поэтому было принято решение использовать пневматическую схему управления ударником.

Перед разработкой конструкции лабораторной установки для выбора оптимального размера ударника в среде Comsol Multuphysics было проведено компьютерное моделирование динамического воздействия ударника на стержни. Была построена 3D модель ударника и стержней с закрепленным между ними образцом горной породы.

На рисунке 2.5 показаны результаты моделирования форм ударных импульсов при длине ударника 200, 300 и 400 мм. Как видно из графиков, чем больше длина ударника, тем больше длительность импульса и выше его амплитуда. Выбор длины ударника аргументировался тем, чтобы длительность импульса была максимально короткой, но при уменьшении длины ударника до 200 мм энергия удара становится довольно низкой, поэтому было принято решение использовать ударник длиной 300 мм. При данной длине ударника длительность импульса остается короткой, а амплитуда импульса и энергия удара снижаются незначительно.

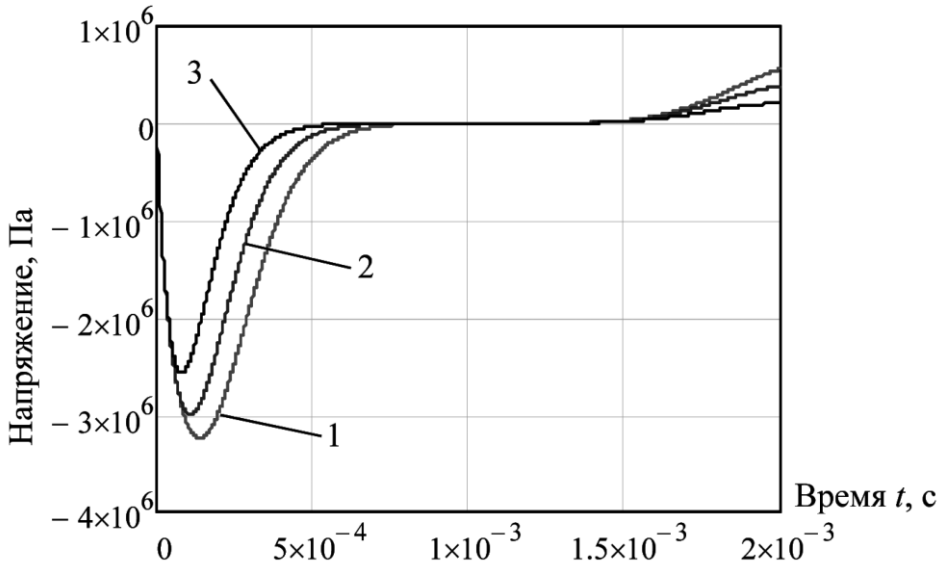


Рисунок 2.5 – Модельные формы ударных импульсов при различной длине ударника: 1—400 мм; 2—300 мм; 3—200 мм

На рисунке 2.6 представлена схема управления ударником с ручным пневмоклапаном.

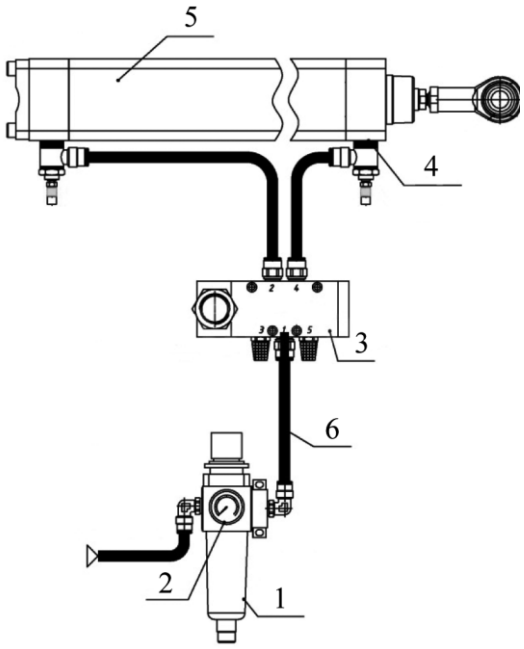


Рисунок 2.6 – Пневматическая схема с ручным управлением пневмоклапаном: 1 — фильтр-регулятор MC202-D00; 2 — манометр M043-P12; 3 — распределитель 452C-910; 4 — клапан быстрого выхлопа VSC 544-1/4; 5 — пневмоцилиндр 40M2L050A0210; 6 — полиамидная пневмотрубка RILSAN 12/10

Воздух из компрессора поступает в фильтр-регулятор 1, где происходит его необходимая подготовка и с его помощью регулируется давление в системе. Контроль давления воздуха, поступающего в систему, осуществляется с помощью манометра 2. Подготовленный воздух из фильтра-регулятора поступает в ручной распределитель 3. В свою очередь распределитель направляет воздух к клапанам быстрого выхлопа 4. В зависимости от положения ручки на распределителе система либо выдвигает, либо втягивает шток пневмоцилиндра 5. Все части пневмосистемы соединены между собой полиамидными пневмотрубками 6.

Теоретические расчеты показывают, что данная схема позволяет выдвинуть шток пневмоцилиндра с диаметром поршня 50 мм на 210 мм за 0,2—0,25 с при условиях, что используется пневмотрубка внутренним диаметром 10 мм, а масса перемещаемого груза не превышает 20 кг. Принимая во внимание то, что масса ударника намного меньше заявленной в расчетах, можно предположить, что ударник сможет развивать необходимую скорость для совершения удара.

Стержни и ударник закреплены на двутавровой балке 5. В свою очередь она имеет акустическую развязку своих опор с полом и выровнена с помощью регулируемых виброопор ОВ-70 (6). Данная конструкция позволяет максимально эффективно исключить внешние помехи.

Измерительная часть установки включает в себя счетчики АЭ и модули тензометрии и собрана на базе модульной измерительной системы QMBox (Производство НПГ «R-Technology») в 8-модульном варианте, его внешний вид представлен на рисунке 2.7. Данный модуль обеспечивает связь измерительной системы с ПК, а также позволяет записывать полученные данные на жесткий диск компьютера для дальнейшей обработки.



Рисунок 2.7 – Внешний вид модульной измерительной системы QMBox в 8-модульном варианте

Для регистрации импульсов акустической эмиссии во время циклических испытаний на образцы горных пород крепились преобразователей акустической эмиссии GT-200 (таблица 2.1), которые соединялись через предварительный усилитель с системой регистрации акустической эмиссии АФ–15.

Таблица 2.1 – Технические характеристики преобразователей GT200

Параметр	**Значение**
Тип	резонансный
Усилитель	без предварительного усилителя
Коэффициент электроакустического преобразования	> 60 дБ отн. 1 В/м/с
Рабочая частота	165 кГц
Полоса пропускания	130…200 кГц
Электрическая ёмкость	400…500 пФ
Сопротивление изоляции	> 100 МОм
Температурный диапазон	−40…+150 °С
Материал корпуса	титановый сплав
Длина встроенного кабеля (определяется при заказе)	0,5 м (стандартная)
Масса (без кабеля)	15 г

Система регистрации преобразовывала последовательность акустических сигналов в последовательность прямоугольных импульсов, каждый из которых соответствовал одному событию АЭ. Количество импульсов подсчитывалось с помощью счетчиков акустической эмиссии и записывалось в режиме реального времени на ПК.

Счетчики акустической эмиссии собраны на базе 2–х модулей S90 и соединены в модуль-носитель QMS301 (рисунок 2.8). Основные параметры QMS301 представлены в таблице 2.2.



Рисунок 2.8 – Внешний вид модуля-носителя QMS301

Таблица 2.2 – Основные параметры модуля QMS301

Параметр	**Значение**
Частота преобразования	250 Гц/канал
Разрядность АЦП	12 бит
Гальваническая развязка от шины USB	Испытательное напряжение 750 В среднеквадв. в течение 1 мин
Гальваническая развязка между входными каналами	Испытательное напряжение 350 В среднеквадв. в течение 1 мин

Деформации образцов регистрировались с помощью специализированного 16-канального модуля АЦП для статической и динамической тензометрии QMS85, внешний вид которого представлен на рисунке 2.9. Модуль может использоваться для регистрации и анализа динамических (высокочастотных)

механических нагрузок и деформаций. Стоит отметить, что максимальная частота дискретизации данных модулей на канал составляет 250 кГц. Основные технические характеристики представлены в таблице 2.3.



Рисунок 2.9 – Внешний вид модуля АЦП QMS85

Таблица 2.3 – Технические характеристики модуля АЦП QMS85

Параметр	**Значение**
Количество измерительных входов	16
Схема подключения датчиков	1/2 моста, полный мост
Максимальная общая скорость оцифровки данных	0,25 Мегасэмплов/сек
Разрядность АЦП	16 бит
Диапазоны входного сигнала	±35 мВ, ±25 мВ, ±10 мВ, ±5 мВ, ±2,5 мВ, переключаются программно
Встроенный источник питания датчиков	5 В, до 25 мА на канал
С.к.о. низкочастотного (0.1 – 10 Гц) шума, приведенное ко входу	0,2 мкВ
Автобалансировка нуля датчиков	Есть

Описанные приборы позволили провести нагружение и регистрацию нескольких информативных параметров и обеспечить всестороннее исследование поведения образцов при их динамическом нагружении, как однократном, так и многократном повторяющемся.

2.4 Методики проведения циклических испытаний образцов горных пород

2.4.1 Методика циклических изгибных нагружений образцов гипсосодержащих пород

К медленным нагружениям в данном случае относятся такие, цикл нагружения/разгрузки которых находится в диапазоне от 10 до 60 секунд. Циклические изгибные испытания проводились сериями по 100 циклов при изгибе по трехточечной схеме на образцах-балках горных пород с соотношением сторон 40 × 40 × 200 мм.

Испытания проводились в следующей последовательности.

1. Измерялись начальные скорости упругих поперечных и продольных волн и акустическая добротность. Скорости упругих волн определялись с помощью прибора «Ультразвук» по времени прохождения упругого импульса. Акустическая добротность измерялась резонансным методом.

2. Не менее чем на пяти образцах определялся средний первоначальный предел прочности.

3. Рассчитывалась и задавалась максимальная и минимальная нагрузки в цикле для первой серии. Минимальная нагрузка в цикле составляла 3-5% от среднего первоначального предела прочности. Максимальная нагрузка цикла в серии не изменялась и увеличивалась в последующей серии по сравнению с предыдущей.

4. Проводились серии нагружений из 100 циклов. Во время испытаний регистрировались нагрузка и вертикальные смещения образца–балки в средней части, показания тензорезистора наклеенного в средней нижней части образца, а также активность акустической эмиссии.

5. Если образец не разрушался до конца серии, то после последнего цикла измерялись скорости упругих волн и акустическая добротность в соответствии с п. 1. Затем максимальная нагрузка в цикле увеличивалась и проводилась следующая серия испытаний, как описано в п. 2.

6. Если образец разрушался, испытание заканчивалось.

2.4.2 Методика медленных циклических и импульсных повторяющихся нагружений образцов каменной соли и мраморизованного известняка

К медленным нагружениям в данном случае относятся такие, цикл нагружения/разгрузки которых находится в диапазоне от 10 до 60 секунд. К импульсным повторяющихся нагружениям в данном случае относятся воздействия, длительность каждого из которых находится в диапазоне от 0,1 до 100 мс.

Медленные циклические испытания образцов Новомосковского месторождения каменной соли проводились в следующей последовательности.

1. Для получения взаимосвязи между изменениями акустической добротности и предела прочности отбиралась группа образцов в количестве 10-12 штук. Для каждой группы образцов производились первоначальные измерения добротности Q в исходном состоянии.

2. Не менее чем на трех образцах определялся средний первоначальный предел прочности на одноосное сжатие.

3. Рассчитывалась и задавалась максимальная и минимальная нагрузки в цикле. Минимальная нагрузка в цикле составляла 2-5% от среднего первоначального предела прочности. Максимальная нагрузка цикла не изменялась и соответствовала 40%, 60%, и 80% от среднего первоначального предела прочности для различных серий испытаний.

4. Проводились усталостные циклические нагружения образцов. Количество циклов M в испытаниях варьировалось в диапазоне от 5 до 100.

5. После циклических нагружений производились вторичные измерения акустических свойств. Путем испытаний на одноосное сжатие определялся предел прочности каждого образца после циклов нагружений.

6. По полученным данным на основе испытаний групп образцов строились графики зависимостей изменения акустической добротности и предела прочности от количества циклов при различной максимальной нагрузке в них. Полученные данные позволили установить регрессионные взаимосвязи между изменениями акустической добротности и предела прочности.

Импульсных повторяющиеся испытания образцов Новомосковского месторождения каменной соли проводились в следующей последовательности.

1. Отбиралась группа образцов в количестве 5 штук.

2. Проводились первоначальные измерения акустических свойств (скоростей продольных и поперечных упругих волн, и акустической добротности).

3. Подбирался уровень импульсной нагрузки.

4. Проводились импульсные повторяющиеся нагружения. Количество нагружений M варьировалось от 4 до 20.

5. После повторяющихся воздействий производились вторичные измерения акустических свойств и путем испытаний на одноосное сжатие определялся предел прочности каждого образца после воздействий.

6. По полученным данным строились зависимости изменения акустических свойств и предела прочности от количества циклов импульсного воздействия. Устанавливались взаимосвязи между изменениями акустической добротности и предела прочности образцов.

Медленные циклические испытания мраморизованного известняка проводились в следующей последовательности.

1. Для получения взаимосвязи между изменениями акустическими свойствами и пределом прочности отбиралась группа образцов в количестве 10-12 штук. Для каждой группы образцов производились первоначальные измерения скоростей упругих волн и добротности Q в исходном состоянии.

2. Не менее чем на трех образцах определялся средний первоначальный предел прочности при одноосном сжатии.

3. Рассчитывалась и задавалась максимальная и минимальная нагрузки в цикле. Минимальная нагрузка в цикле составляла 2-5% от среднего первоначального предела прочности. Максимальная нагрузка цикла не изменялась и соответствовала 60% от среднего первоначального предела прочности для различных серий испытаний.

4. Проводились усталостные циклические нагружения образцов. Количество циклов *M* в испытаниях варьировалось в диапазоне от 10 до 50.

5. После циклических нагружений производились вторичные измерения акустических свойств. Путем испытаний на одноосное сжатие определялся предел прочности каждого образца после заданного количества циклов нагружений.

6. По полученным данным на основе испытаний групп образцов строились графики зависимостей изменения акустической добротности и предела прочности от количества циклов при различной максимальной нагрузке в них. Полученные данные позволили установить регрессионные взаимосвязи между изменениями акустической добротности и предела прочности.

Импульсные повторяющиеся испытания образцов мраморизованного известняка проводились в следующей последовательности.

1. Отбиралась группа образцов в количестве 5 штук.

2. Проводились первоначальные измерения акустических свойств (скоростей продольных и поперечных упругих волн, и акустической добротности).

3. Подбирался уровень импульсной нагрузки.

4. Проводились импульсные повторяющиеся нагружения. Количество циклов *M* варьировалось от 4 до 15.

5. После циклических воздействий производились вторичные измерения акустических свойств и путем испытаний на одноосное сжатие определялся предел прочности каждого образца после воздействий.

6. По полученным данным строились зависимости изменения акустических свойств и предела прочности от количества циклов импульсного воздействия. Устанавливались взаимосвязи между изменениями акустической добротности и предела прочности образцов.

Конкретные методики варьировались в зависимости от условий экспериментов. Их особенности описаны ниже в соответствующих разделах.

2.5 Выводы по главе 2

1. Для проведения исследований образцов горных пород разработан лабораторный испытательный комплекс, состоящий из двух установок и позволяющий проводить испытания образцов горных пород в широком диапазоне скоростей и длительностей нагружения. Одна установка позволяет проводить испытания при медленных нагружениях с длительностями каждого цикла от нескольких единиц до нескольких десятков и более секунд, а другая – при быстрых динамических нагружениях с длительностями каждого цикла нагружений от долей до нескольких десятков и более миллисекунд.

2. Испытательная подсистема для медленных нагружений горных пород построена на базе универсального автоматизированного комплекса АСИС производства компании ООО «НПП «Геотек». Она позволяет производить нагружение образцов горных пород по заранее сформированной программе при одноосном сжатии, растяжении по бразильской схеме и изгибе с регистрацией механических и акустико-эмиссионных информативных параметров в процессе испытания.

3. Испытательная подсистема для быстрых динамических нагружений образцов построена по принципу разрезного стержня Гопкинсона (SHPB) и включает два варианта исполнения со стрежнями, изготовленными из гранита и из конструкционной ударопрочной стали. Обе части подсистемы имеют подключение к измерительной системе для регистрации показаний на компьютере.

4. Информационное сопровождение испытаний образцов горных пород осуществляется специально спроектированной многоцелевой системой на основе комплекса QM-Box (ООО «R-Technology», Moscow, Russia) с набором модулей, позволяющих непосредственно в процессе испытаний производить деформационные измерения при частоте дискретизации до 250 кГц, подсчет импульсов и регистрацию полной формы сигналов акустической эмиссии, регистрируемой системой АФ-15 в полосе частот от 20 до 200 кГц, а также запись показаний в компьютер.

5. Измерения акустических свойств между сериями циклических нагружений осуществляется с помощью прибора «Ультразвук» (ООО «Экогеос-Пром», г. Тверь, Россия), позволяющего измерять скорости продольных и поперечных упругих волн по времени прохождения упругого импульса через образец. Акустическая добротность измеряется резонансным методом на лабораторной установке, разработанной с участием автора.

6. Разработанный комплекс для испытаний образцов горных пород позволил провести комплексные исследования механических и акустических свойств образцов осадочных горных пород при циклических нагружениях и получить регрессионные зависимости между акустическими свойствами и пределом прочности горных пород.

3 Закономерности изменения прочностных и акустических свойств пород сложной текстуры доломит–гипс при циклических изгибных нагружениях

3.1 Оценка циклических воздействий на участки обнажений массива горных пород вокруг подземных выработок

Объектами массива горных пород, испытывающими изгиб и растяжение с последующим разрушением, являются участки кровли, в особенности имеющие поверхности ослабления в виде трещин и прослойков. Источниками циклических и повторяющихся нагружений здесь могут быть сейсмоволны от горных ударов и землетрясений, от бурения и взрывов, от массивного транспорта при его движении по выработкам. На угольных и соляных месторождениях это могут быть упругие волны и силовые воздействия от рабочих органов машин, отделяющих полезное ископаемое от массива.

Для оценки повторяющегося воздействия на кровлю и возникающих при этом напряжений воспользуемся данными о скоростях и преобладающих частотах колебаний, которые регистрируются на реальных горных предприятиях. Так, например, по данным [68] на расстояниях от 1 до 10 км от сейсмического источника магнитудой $5{,}8 \leq Mw \leq 6{,}2$ колебательная скорость может находиться в диапазоне от 10 до 100 см/с.

В [69] автор описал сейсмические события на угольной шахте Бобрек-Центр в Польше. Источники толчков с энергией более $5{,}0 \cdot 10^6$ Дж располагались на глубине 300 м ниже эксплуатируемого угольного пласта. Для этих событий тензор напряжений в очаге состоял, в среднем, из 12% изотропной составляющей, 14% одноосной составляющей напряжения и большой доли сдвиговой составляющей, составившей 76%, а для некоторых толчков достигавший почти 90%.

В качестве примера приводится запись сейсмической скорости одного из событий с энергией $1{,}0 \cdot 10^7$ Дж, произошедшего при эксплуатации лавы 3 в

угольном пласте 503 11 марта 2010 г. Это событие имело максимальную амплитуду колебательной скорости 0,049 м/с и частоту спектрального максимума около 20 Гц. Расчет амплитуды смещений по колебательной скорости дает следующее значение

$$A_0 = V_0/\omega = 0{,}049/(2\pi \cdot 20) = 0{,}39 \text{ мм},$$

где A_0 – амплитуда смещений в точке регистрации; V_0 – амплитуда колебательной скорости; ω –круговая частота спектрального максимума, $\omega = 2\pi f$, f = 20 Гц.

Расчет приращений напряжений в кровле выработки, соответствующих заданной амплитуде смещений, осуществлен в среде COMSOL Multiphysics в двумерной постановке. Чертеж части модели с выработкой представлен на рисунке 3.1. Модель в целом имела размеры 2000 × 1000 м.

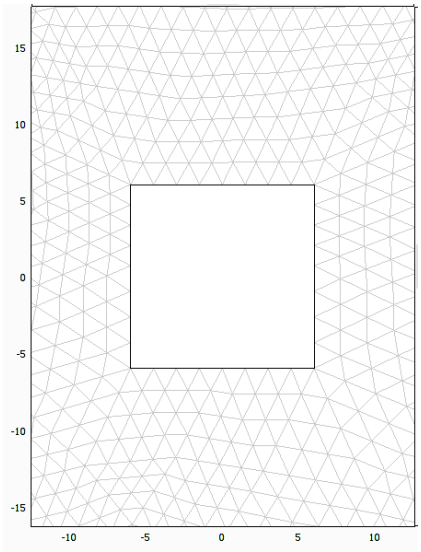


Рисунок 3.1 – Участок модели массива пород вокруг выработки сечением 12 × 12 м

Моделирование осуществлялось методом конечных элементов в соответствии с волновым уравнением с учетом затухания в среде распространения волн

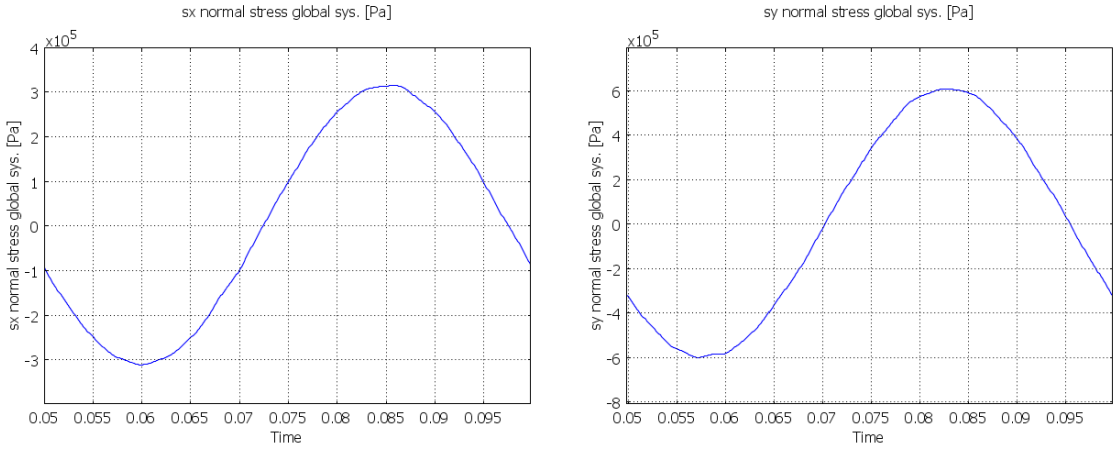
$$e_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (-c\nabla u) = f \ ,$$

где e_a –плотность; d_a – коэффициент потерь; c – матрица жесткости; f – функция силового воздействия источника.

Приняты следующие свойства массива пород: плотность 2400 кг/м^3; модуль упругости 40 ГПа, коэффициент Пуассона 0,22. Кроме того были учтены потери в среде, которые характеризовались частотным коэффициентом поглощения рэлеевской модели, представлявшим собой коэффициент пропорциональности между частотой и затуханием и равным $5 \cdot 10^{-5}$ с. На нижнем и боковых краях всей модели задавались условия жесткого закрепления, верхняя граница оставалась свободной. На поверхности кровли задавались вертикальные перемещения $y(t)$ амплитудой 0,39 мм в соответствии с выражением

$$y(t) = 3{,}9 \cdot 10^{-4} \cdot \sin(2\pi 20t) \text{ м}.$$

Результаты расчета горизонтальных и вертикальных напряжений в средней части кровли представлены на рисунке 3.2.



а *б*

Рисунок 3.2 – Части гармонического сигнала горизонтальных (*а*) и вертикальных (*б*) напряжений, соответствующие участку установившихся колебаний в средней части кровли

Амплитуда горизонтальных напряжений здесь более 0,3 МПа. Так, например, экспериментами на балках гипсосодержащих пород при изгибе получено значение предела прочности при растяжении 6 МПа, т. е. амплитуда циклических напряжений растяжения/сжатия составляет около 5%, а размах

10% от этой величины. Для вертикальных напряжений амплитуда равна 0,6 МПа, что больше амплитуды горизонтальных напряжений в два раза.

Близкие значения амплитуды горизонтальных напряжений получены при моделировании источника возмущения гармоническим точечным осциллятором, расположенным ниже выработки на 300 м и создававшим колебания в вертикальном направлении с частотой 20 Гц. Амплитуда колебаний источника подбиралась такой величины, чтобы на контуре выработки обеспечивались колебания с амплитудой скорости близкой к 0,049 м/с, как в приведенном выше примере.

Данные оценки обосновывают параметры испытаний образцов-балок при циклическом изгибе. Породы кровли в натурных условиях находятся при сжатии в горизонтальном направлении. Суммарные напряжения, обусловленные суммой статической и циклической составляющих напряжений, будут иметь один знак, что определяет проведение лабораторных испытаний при циклическом сжатии при увеличении и последующем уменьшении напряжений без перехода к противоположному знаку.

Схожие величины напряжений в массиве пород вокруг подземных выработок дает также и численное моделирование сейсмических волн, вызванных взрывными работами при очистных работах [70]. Для расчетов были приняты параметры, близкие к условиям шахты ООО «Кнауф Гипс Новомосковск». Результаты расчетов представлены на рисунках 3.3 и 3.4.

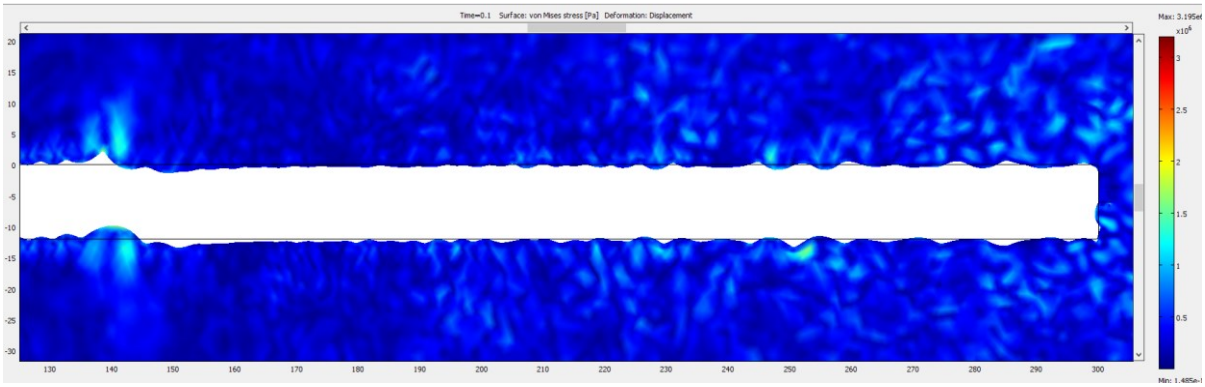
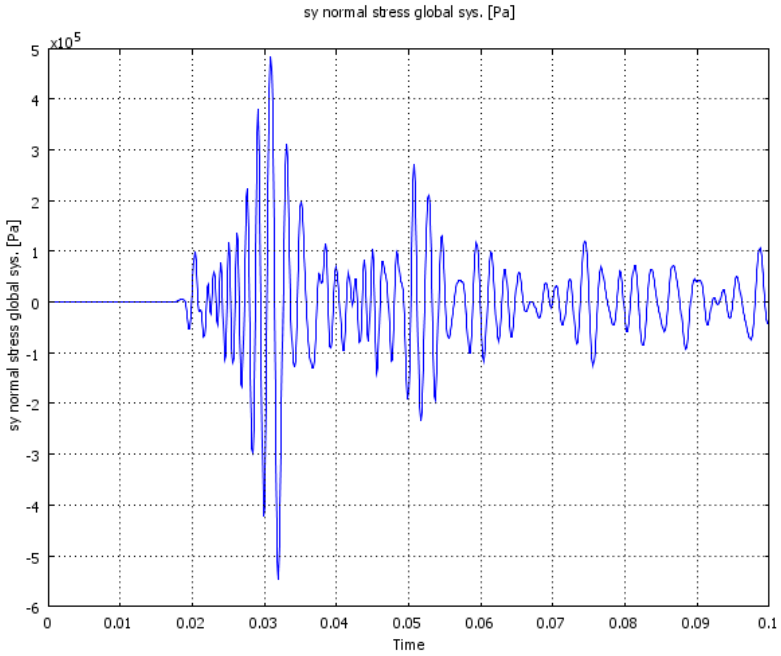
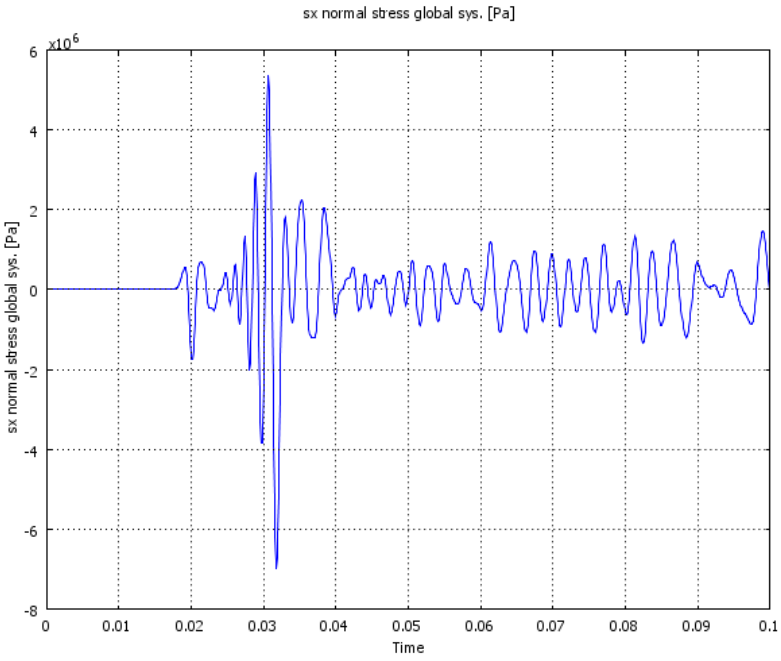


Рисунок 3.3 – Распространение сейсмических волн (в увеличенном масштабе амплитуд) в кровле и почве очистной выработки при взрывной отбойке гипсового камня в забое, расположенном на рисунке справа



а



б

Рисунок 3.4 – Сейсмограммы в кровле выработки на расстоянии 50 м от забоя для вертикальной (*а*) и горизонтальной (*б*) составляющих напряжений

Как следует из сейсмограмм, представленных на рисунке 3.4, пиковое значение напряжений может превышать 5 МПа, а усредненное значение сейсмоамплитуд находится в диапазоне от 0,1 до 1,0 МПа. Полученные значения

напряжений были учтены при задании режимов циклических испытаний образцов-балок при изгибе.

3.2 Оценка предела прочности образцов горных пород при изгибе по акустическим свойствам с помощью регрессионных зависимостей и определение их точностей

3.2.1 Цель и постановка задач исследования

Цель данных исследований – провести испытания образцов пород при изгибе и сравнить между собой информативность различных акустических параметров, по которым с помощью регрессионных зависимостей осуществляется оценка неразрушающими методами предела прочности горных пород при растяжении при изгибных испытаниях. В качестве критерия рассматривается среднеквадратическая ошибка (СКО). Чем она меньше, тем точнее оценки. Поскольку большинство опубликованных работ связано с определением предела прочности пород при сжатии, а также растяжении по бразильской схеме испытаний, здесь рассматривается прогноз предела прочности при растяжении, определяемый при изгибе балок.

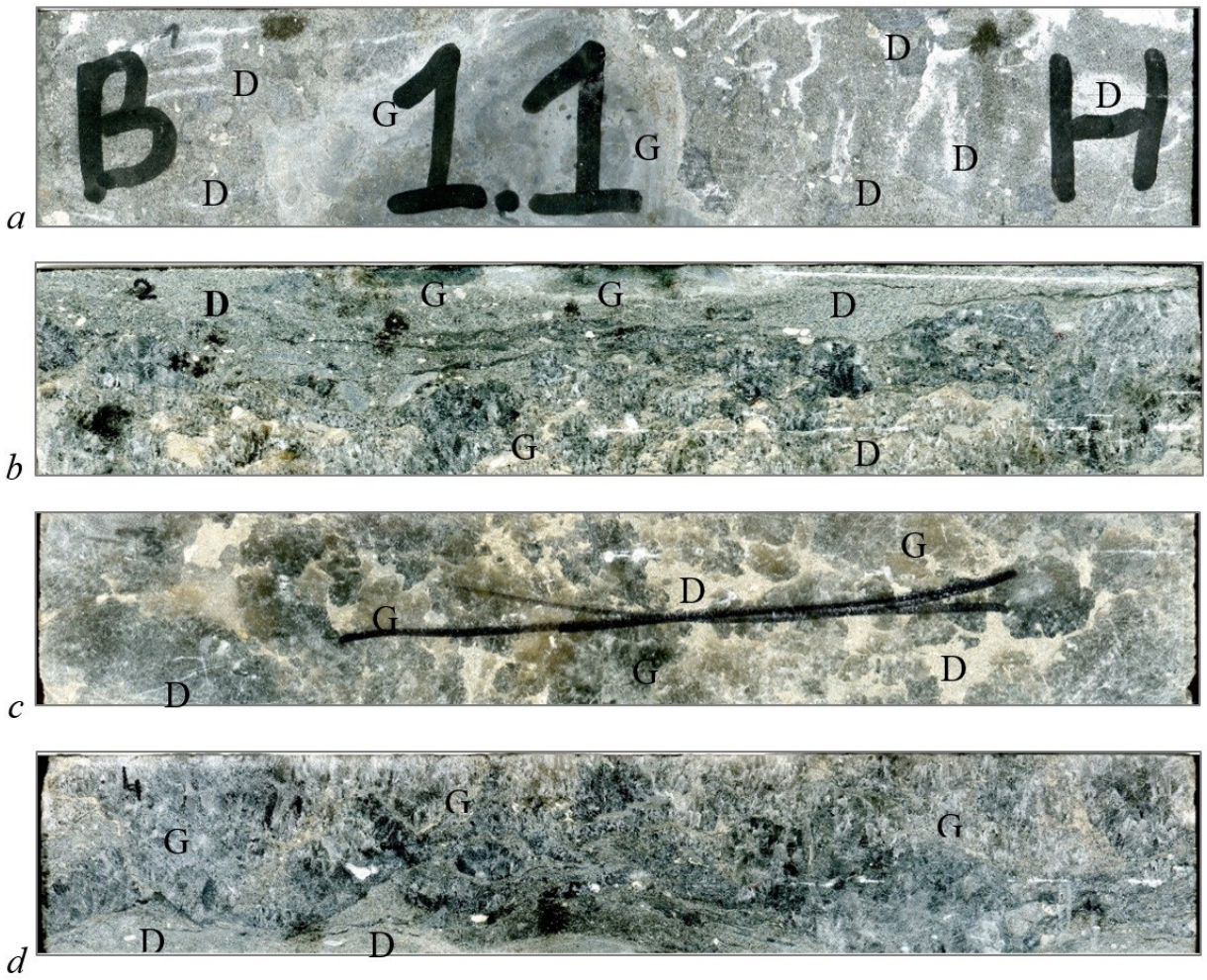
В работе проведены сравнительные исследования образцов двух типов: однокомпонентных, доломитов, в основном состоящих из минерала доломита, и двухкомпонентных, гипсосодержащих пород, состоящих из гипса и доломита [71]. Для испытаний были подготовлены образцы в виде балок размером 40x40x200 мм. Всего было испытано пять образцов доломита и пять гипса. Результаты испытаний последних были использованы в последующих циклических испытаниях для определения среднего предела прочности при растяжении при изгибе.

Образцы первой группы представлены полнокристаллическим доломитом месторождения Геналдон, Северная Осетия, Россия. Образцы имели однотонную текстуру и однородный состав, низкое водопоглощение, плотность

около 2700 кг/м^3. Образцы доломита другого месторождения были взяты из-за невозможности отбора штуфов необходимых размеров на Новомосковском месторождении.

Образцы второй группы были представлены гипсосодержащими породами Новомосковского месторождения гипса, расположенного в Тульской области, включавшими в качестве основных компонентов доломит и гипс.

В образцах области гипса и доломита чередовались друг с другом. На рисунке 3.5 показан пример четырех сторон одного из образцов гипсосодержащих пород.



G – гипс; D – доломит

Рисунок 3.5 – Строение образца гипсосодержащей породы: стороны *a* (верх), *c* (низ) параллельно и *b*, *d* – перпендикулярно напластованию

Как следует из фотографий на рисунке 3.5, где светлые области соответствуют доломиту, а темные –гипсу, слоистая текстура и границы между гипсом и доломитом подвержены значительным флуктуациям.

Испытательное оборудование описано в разделе 2.

Испытания производились в два этапа, включавших первичные акустические измерения на первом этапе, однократное изгибное нагружение балок до разрушения образца на две части на втором этапе и определение предела прочности при растяжении на этом этапе.

Акустические измерения для каждого образца производились в направлении длинной оси. Они включали определение скоростей распространения и амплитуд продольных и поперечных волн по двум направлениям поляризации, а также акустической добротности. Скорости определялись по времени распространения упругого импульса через образец. акустическая добротность определялась резонансным методом с помощью генератора, осциллографа и двух пьезопластин диаметром 20 мм и толщиной 1,5 мм, закрепляемых на торцах образцов-балок.

Предел прочности при растяжении при изгибе образца $R_{изг}$ определялся по трехточечной схеме в соответствии с [72] по формуле

$$R_{изг} = \frac{3Pl}{2bh^2},$$

где P − максимальная нагрузка при разрушении образца, Н;

l − расстояние между опорами, мм;

b − ширина образца, мм;

h − высота образца, мм.

При обработке результатов с помощью программного обеспечения Statistica были рассчитаны коэффициенты уравнений регрессии между информативными параметрами и прочностью при растяжении, полученной при изгибе балок. Для аппроксимации зависимостей использованы линейные функции вида:

$\sigma(v_1) = a_0 + a_1 v_1$ в случае одного информативного параметра v_1;

$\sigma(v_1, v_2) = a_0 + a_1 v_1 + a_2 v_2$ в случае двух информативных параметров v_1, v_2;

$\sigma(v_1, v_2, v_3) = a_0 + a_1 v_1 + a_2 v_2 + a_3 v_3$ в случае трех информативных параметров v_1, v_2, v_3,

где $\sigma(v_1)$, $\sigma(v_1, v_2)$, $\sigma(v_1, v_2, v_3)$ – регрессионные зависимости предела прочности при растяжении в случае одного, двух и трех информативных параметров соответственно; a_0; a_1; a_2; a_3 – коэффициенты уравнений линейной регрессии; v_1, v_2, v_3 – входные информативные параметры уравнений линейной регрессии.

Кроме того, были рассчитаны коэффициенты корреляции и среднеквадратические погрешности (СКО).

3.2.2 Результаты испытаний

Исследование однокомпонентной среды

Результаты исследований доломита как однокомпонентной среды приведены в таблице 3.1. В таблицах приняты условные обозначения: V_p, A_p – скорость и амплитуда продольных волн соответственно; V_{s1}, A_{s1}, V_{s2}, A_{s2} – скорости и амплитуды поперечных волн при их поляризации в направлении нагружения и перпендикулярно ему соответственно; Q, F_{ra}, – акустическая (механическая) добротность и частота, на которой она определялась; σ_t .– предел прочности при растяжении.

Первичный анализ данных показывает, что скорости как продольных, так и поперечных упругих волн не имеют каких-либо выраженных аномалий, в то время как добротность образца D1_1 «выскакивает» из общего ряда значений. Внешне этот образец не отличался от остальных.

Таблица 3.1 – Результаты исследования образцов доломита Геналдонского месторождения

Номер образца	Доломит								Прочность при растяжении σ_t МПа
	Vp вдоль/амплитуда		V_s (в 2-х направлениях)/амплитуда				Добротность		
	V_p, м/с	A_p, мВ	V_{s1}, м/с	A_{s1}, мВ	V_{s2}, м/с	A_{s2}, мВ	Q	F_r, Гц	
D1-1	5687	481	2916	189	3110	229	136	27047	15,87
D1-2	5833	470	3061	174	3102	159	59	26307	20,76
D1-3	5848	569	2903	364	2947	406	69	26223	18,06
D1-4	5708	271	3005	155	2876	320	66	26477	18,72
D1-5	5758	365	3102	216	2938	458	42	26418	18,18

Отличия проявились в ходе испытаний. Данный образец при разрушении имел косой скол под углом около 45° по отношению к длинной оси образца, что свидетельствует о его исходной нарушенности трещинами. Остальные образцы имели скол, перпендикулярный этой оси.

Исследование двухкомпонентной среды

В таблице 3.2 приведены результаты исследований гипсосодержащих пород как двухкомпонентной среды гипс–доломит.

Первичный анализ данных таблицы 3.2 показал аномально высокие значения добротностей образцов G1-1 и G1-4. Скорости упругих волн имели обычные значения для этих пород. Обращает на себя внимание то, что двум максимальным значениям добротности соответствуют одно значение максимальной прочности, а другое значение минимальной прочности. При этом для этих образцов соответствующие скорости продольных волн имеют максимальные значения, т. е. скорости не отражают различие в прочности.

Таблица 3.2 – Результаты исследования образцов пород с границами доломит–гипс

Номер образца	Доломит–гипс								Прочность при растяжении, σ_t, МПа
	Vp вдоль/амплитуда		*Vs* (в 2-х направлениях)/амплитуда				Добротность		
	V_p, м/с	A_p, мВ	V_{s1}, м/с	A_{s1}, мВ	V_{s2}, м/с	A_{s2}, мВ	Q	F_r, Гц	
G1-1	4953	436	2532	429	2414	425	197	20140	5,64
G1-2	4850	405	2477	205	2501	297	64	19738	4,33
G1-3	4733	322	2386	245	2402	265	63	18340	8,95
G1-4	4963	378	2419	240	2309	130	147	20626	14,1
G1-5	5021	583	2441	574	2369	554	65	20087	6,74

Минимальное значение прочности соответствует среднему значению добротности и не самому меньшему значению скорости. Т. е. здесь не наблюдается какой-либо отчетливо выраженной статистической взаимозависимости акустических свойств и прочности при растяжении. Поэтому было проведено дополнительное визуальное обследование текстуры образцов на сколах и гранях.

3.2.3 Анализ и обсуждение результатов

Однокомпонентная среда

В таблице 3.3 приведены результаты аппроксимации линейными функциями зависимостей между информативными параметрами и прочностью при растяжении образцов доломита при изгибе, рассчитанные по данным таблицы 3.1. Наилучшие результаты показывают зависимости, имеющие наибольший коэффициент корреляции *R* и наименьшее среднеквадратическую ошибку СКО, причем с точки зрения точности предпочтение следует отдать последней оценке. В последней колонке приведены значения погрешности аппроксимации по отношению к погрешности, обеспечиваемой скоростью продольных волн.

Таблица 3.3 – Параметры линейных регрессионных зависимостей между информативными параметрами и прочностью для образцов доломита

i	Информативный параметр	a_0	a_1	a_2	a_3	R	СКО$_i$, МРа	СКО$_i$/ СКО$_{Vp}$
1	V_p	-68,31	0,015022			0,621	1,369	1,00
2	A_p	19,28	-0,00223			0,147	1,728	1,26
3	V_{s1}	-17,71	0,012019			0,602	1,395	1,02
4	A_{s1},	19,09	0,00354			0,169	1,721	1,26
5	V_{s2}	21,54	-0,00108			0,065	1,743	1,27
6	A_{s2}	19,42	-0,00350			0,246	1,693	1,24
7	Q	20,99	-0,0359			0,739	1,176	0,86
8	F	127,81	-0,00413			0,767	1,121	0,82
9	Q, F	92,82	-0,01393	0,00277		0,779	1,095	0,80
10	V_p, V_{s1}	-96,82	0,0141	0,0112		0,838	0,954	0,70
11	V_p, V_{s2}	-64,21	0,0151	-0,0016		0,629	1,358	0,99
12	V_p, Q	-23,50	0,0076	-0,0277		0,789	1,081	0,79
13	V_p, V_{s1}, Q	-85,48	0,0129	0,0099	-0,0049	0,839	0,950	0,69
14	V_p, V_{s2}, Q	-12,84	0,0019	0,0079	-0,0467	0,855	0,906	0,66

По полученным численным оценкам, приведенным в таблице 3.3, можно сделать следующие выводы.

1. При оценке предела прочности по одному параметру наилучшие показатели имеет акустическая добротность Q. Погрешность СКО определения предела прочности на 14% меньше, чем у скорости продольных волн V_p.

2. Амплитуды первых вступлений обладают низкой информативностью, для них указанное отношение больше 1, поэтому они далее не рассматриваются.

3. Оценка предела прочности по двум или трем информативным параметрам позволяет существенно снизить погрешность прогноза предела прочности по сравнению с одним параметром. При оценке по двум параметрам хорошее сочетание продольной и поперечной волны V_p, V_{s1}, дающее отношение 0,70. Однако при этом необходимо подбирать ориентацию поляризации регистрируемых волн, т. к. для сочетания V_p, V_{s2} указанное соотношение гораздо

хуже и равно 0,99. Поэтому для практического использования это сочетание может оказаться неоптимальным.

4. Близкие к наилучшему результату оценки по двум информативным параметрам дает сочетание V_p, Q, для которого отношение погрешностей 0,79 и не зависит от вида поляризации.

5. При оценке предела прочности по трем информативным параметрам удается еще снизить погрешность оценки, причем для сочетания добротности Q, скоростей продольной V_p и поперечной V_{s2} волн результат лучше, чем для V_p, V_{s1}, Q.

Двухкомпонентная порода

В таблице 3.4 приведены результаты обработки экспериментальных данных по гипсосодержащей породе из таблицы 3.2.

Таблица 3.4 – Параметры линейных регрессионных зависимостей между информативными параметрами и прочностью для образцов гипсосодержащих пород

i	Информативный параметр	a_0	a_1	a_2	a_3	R	MSE_i, MPa	MSE_i/MSE_{Vp}
1	V_p	-4,62	0,0026			0,076	3,821	1,00
2	A_p	13,90	-0,0140			0,357	3,578	0,93
3	V_{s1}	111,35	-0,0422			0,618	3,014	0,79
4	A_{s1},	10,36	-0,0071			0,293	3,663	0,96
5	V_{s2}	120,11	-0,0468			0,855	1,988	0,52
6	A_{s2}	13,28	-0,0160			0,673	2,835	0,74
7	Q	6,54	0,0132			0,212	3,745	0,98
8	F	-9,85	0,0009			0,204	3,751	0,98
9	Q, F	6, 50	0,000006	0,1116		0,236	3,723	0,97
10	V_p, V_{s1}	72,84	0,0136	-0,0536		0,718	2,667	0,70
11	V_p, V_{s2}	204,05	-0,0127	-0,0558		0,919	1,511	0,40
12	V_p, Q	8,95	-0,0005	0,0135		0,212	3,744	0,98
13	V_p, V_{s1}, Q	164,89	0,0078	-0,0820	0,0511	0,966	0,992	0,26
14	V_p, V_{s2}, Q	205,58	-0,0133	-0,0554	0,0034	0,920	1,499	0,39

Большое значение добротности образца G1_1 в таблице 3.2 объясняется узкой и протяженной вдоль длинной оси областью прочного доломита, расположенной в верхней части образца при его изгибе. Распространение волн по этой области и дало большое значение добротности. Малое значение прочности объясняется тем, что в нижней и средней частях сечения образца, где присутствуют напряжения растяжения при изгибе, расположен гипс, прочность которого ниже, чем доломита. Такое сочетание дало высокое значение добротности при малой прочности при изгибе.

Прочный доломит был расположен у образца G1-4 в нижней части сечения, которая определяет прочность, в отличие от образца G1-1. Поэтому этот образец при большой добротности имел также и б*о*льшую прочность.

Скорости продольных волн для этих образцов практически одинаковы. Скорости поперечных волн для образца с большей прочностью меньше, чем скорости для образца с меньшей прочностью.

Анализ данных таблицы 3.4 позволил сделать следующие выводы.

1. Скорость продольных волн в данном случае является малоинформативной и обеспечивает высокую погрешность, т. к, R = 0,076, а СКО = 3,821 МПа.

2. Низкая информативность отдельных параметров связана со сложностью исследуемой двухфазной среды и различием отдельных составляющих гипсосодержащей породы.

3. Учет строения, свойств, а также соотношения компонентов, слагающих исследуемую породу, позволяет снизить погрешность неразрушающей оценки предела прочности.

4. Использование уравнений множественной регрессии позволяет снизить погрешность оценки предела прочности даже в случае низкоинформативном основном параметре.

5. В сравнении с доломитом, образцы которого имеют однородное строение и монокомпонентный состав, отдельные информативные акустические

параметры для гипсосодержащих пород, состоящих из двух компонентов, дают бо́льшую погрешность оценки предела прочности.

Для иллюстрации полученных выводов на рисунке 3.6 представлены графики зависимостей СКО от количества информативных акустических параметров для однокомпонентных образцов доломита и двухкомпонентных образцов доломит-гипс.

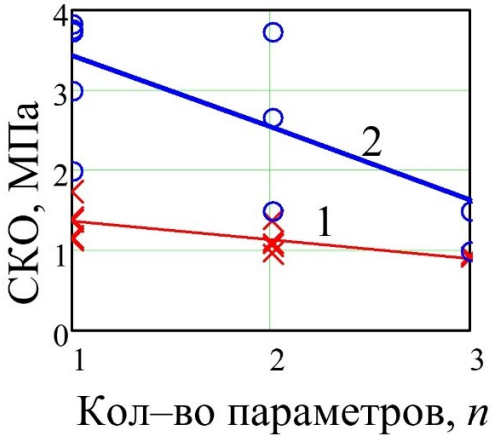


Рисунок 3.6 – Графики зависимостей СКО предела прочности от количества информативных акустических параметров для однокомпонентных образцов доломита (1) и двухкомпонентных образцов доломит-гипс (2)

Из этих графиков следует, что погрешность определения предела прочности для однокомпонентных образцов доломита значительно меньше, чем для двухкомпонентных образцов доломит–гипс. Разброс значений предела прочности этих пород составляет 1,3 для однокомпонентной среды и 3,25 для двухкомпонентной. Существенная разница этих значений обусловила необходимость более подробного изучения поведения двухкомпонентной породы, представленной доломитом и гипсом. Исследования в этом направлении включали в себя определение параметра поврежденности ω, изменяемого в процессе усталостных циклических нагружений.

3.3 Оценка изменений акустических свойств и параметра поврежденности пород сложной текстуры с границами доломит-гипс при изгибных циклических нагружениях образцов

3.3.1 Цель и задачи исследований

Основной целью исследований являлась установление закономерностей изменения поврежденности и акустических свойств горной породы, содержащей границы областей доломит-гипс сложной текстуры, при изгибе, а также оценка точности регрессионных зависимостей оценки поврежденности ω по нескольким измеряемым акустическим параметрам. Такие закономерности могут послужить основной для оценки и прогнозирования устойчивости горных пород вокруг выработок. В качестве информативных параметров рассматривались скорости продольных C_p и поперечных C_{s1} и C_{s2} (с плоскостью поляризации вдоль и поперек направления нагружения, соответственно) упругих волн, а также акустическая добротность Q образцов.

Эти параметры измерялись для каждого образца перед испытанием, а также между сериями по 100 циклов каждая изгибных нагружений/разгрузки. Для достижения данной цели были получены зависимости этих параметров от количества циклических нагружений.

Достижение указанной цели потребовало решения следующих задач:

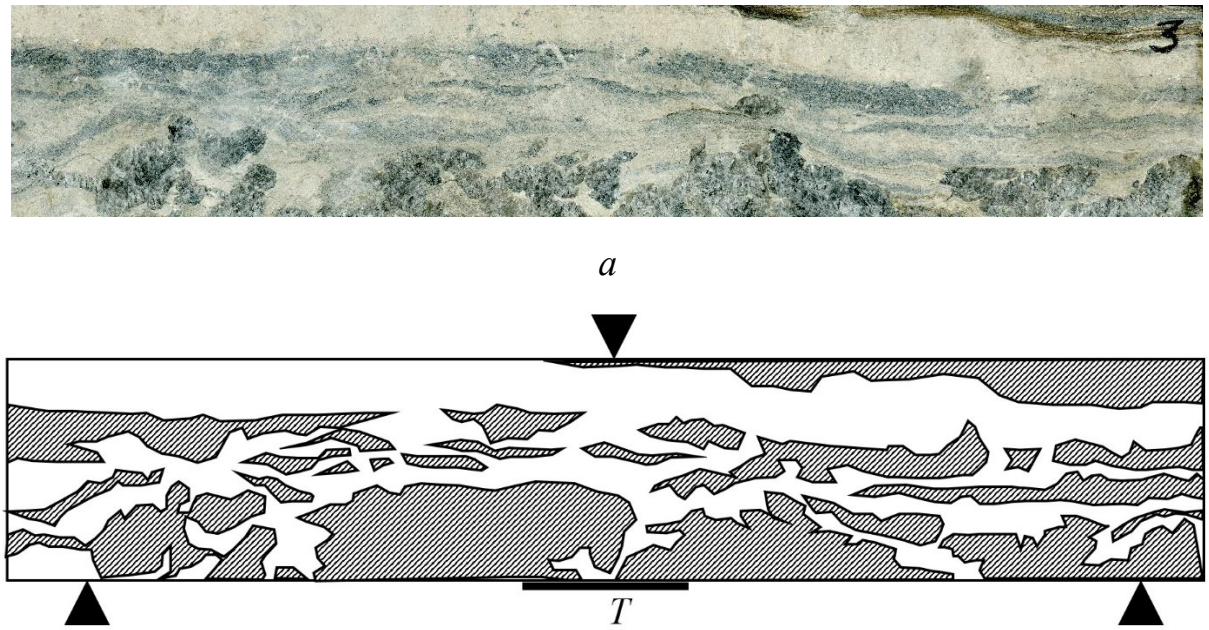
- разработку методики выбора максимальной нагрузки в циклах при испытании образцов-балок в условиях малоцикловой усталости;
- разработку метода оценки параметра поврежденности по параметрам акустической эмиссии;
- установление закономерностей изменения акустических свойств в зависимости от поврежденности при циклических нагружениях и обоснование модели изменения акустической добротности при увеличении поврежденности двухкомпонентной горной породы, содержащей границы областей доломит-гипс сложной текстуры;

- оценку точности регрессионных зависимостей определения параметра поврежденности ω по измерению акустических свойств образцов по отдельности и в совокупности друг с другом.

3.3.2 Образцы и методики испытаний

Для достижения поставленной цели были проведены эксперименты на образцах-балках гипсосодержащих пород Новомосковского месторождения Тульской площади размером 40 × 40 × 200 мм при изгибе по трехточечной схеме. Всего было испытано 12 образцов. Из них 5 образцов были испытаны для определения первоначального предела прочности при растяжении по испытаниям на изгиб, что описано в 3.2. На четырех образцах отрабатывалась методика испытаний и измерений. Основные результаты были получены на трех образцах G2-04, G2-18 и G2-5. Образцы имели сложную двухкомпонентную слоистую текстуру и включали участки с пятнистым гипсом и доломитом. Пример показан на фотографии образца G2-5 на рисунке 3.7, *а*. На рис. 3.7, *б* изображено ориентировочное расположение минералов и схема нагружения образца. На этой схеме области доломита светлые, гипса – заштрихованные. Буквой *Т* отмечено положение тензорезистора в нижней части балки для регистрации деформаций растяжения при циклическом нагружении. Точки приложения изгибной нагрузки показаны черными треугольниками.

В верхней части образца находился слой доломита, который имел б*о*льшую прочность, меньшие акустические потери и более высокую акустическую добротность по сравнению с гипсом, который находился преимущественно в нижней части образца. Такое строение проявило себя в особенностях акустических и деформационных зависимостей, изложенных ниже.



а

б

Рисунок 3.7 – Вид сбоку на образец-балку гипсосодержащей породы (*а*) и ориентировочная схема расположения минералов (*б*), на которой области доломита светлые, гипса заштрихованные, буквой *T* отмечено положение тензорезистора в нижней части балки, а точки приложения нагрузки показаны черными треугольниками

Перед испытанием, а также между сериями нагружений по 100 циклов измерялись скорости продольных C_p и поперечных C_{s1} и C_{s2} упругих волн, а также акустическая добротность Q образцов. Для создания поврежденности образцов производились усталостные механические нагружения.

Минимальная нагрузка в цикле составляла 3–5% от среднего первоначального предела прочности, определенного по пяти образцам. Первоначальный предел прочности определялся как среднее значение при разрушении 5 образцов. Максимальная нагрузка в цикле в серии не изменялась и увеличивалась в каждой последующей серии по сравнению с предыдущей. Такой подбор максимальной нагрузки обусловлен особенностью деформирования данной породы при изгибе. Как показали предварительные испытания, деформирование и усталость в зависимости от максимальной нагрузки в цикле можно было

разделить на несколько областей, работа образца в которых задавалась соответствующими режимами нагружения. Границы между ними варьировались в широких пределах для различных экземпляров образцов и поэтому не могли быть установлены заранее.

Режим упругой деформации (первый режим) проявляется во многоцикловой усталости [73] по ГОСТ 23207. Режим пластической деформации проявляется в малоцикловой усталости (второй режим). Режим хрупкого разрушения (третий режим) проявляется в мгновенном разрушении образца. Максимальная нагрузка третьего режима больше, чем нагрузка второго режима, которая больше, чем нагрузка первого режима. Для обеспечения режима малоцикловой усталости было выбрано увеличение нагрузки в каждом последующем цикле при контроле акустической эмиссии.

Были приняты три методических решения для того, чтобы испытать образец в режиме малоцикловой усталости без его перехода в хрупкое разрушение, что позволило подробно наблюдать переход к разрушению.

1. В центре нижней грани образца был наклеен тензорезистор. Он дал возможность наблюдать за развитием деформаций растяжения в этой части. Эти наблюдения позволили прогнозировать выход трещины в нижней части образца в пределах или за пределами тензорезистора. Растяжение тензорезистора происходило в первом случае, а его сжатие наблюдалось во втором случае при предварительных испытаниях образцов. Лабораторная установка более подробно описана в п. 2.2.

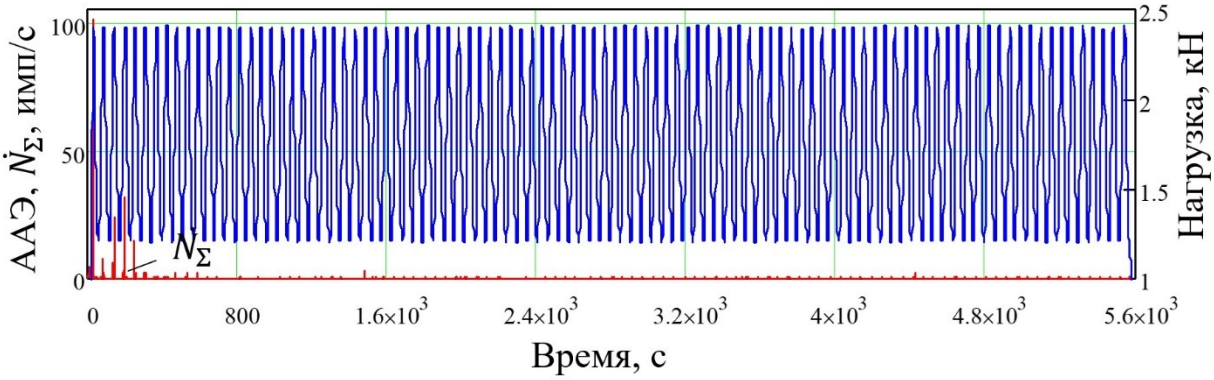
2. При испытании производилась непрерывная регистрация активности акустической эмиссии (ААЭ) $\dot{l}_{\Sigma}$. Ее возрастание характеризовало возникновение пластических деформаций в режиме малоцикловой усталости.

3. Деформирование осуществлялось сериями по 100 циклов нагружения/разгрузки. Последующие серии с максимальной нагрузкой, превышающей нагрузку предыдущей серии, производились после ее окончания, если уровень ААЭ быстро снижался после 2–3 первых циклов в серии.

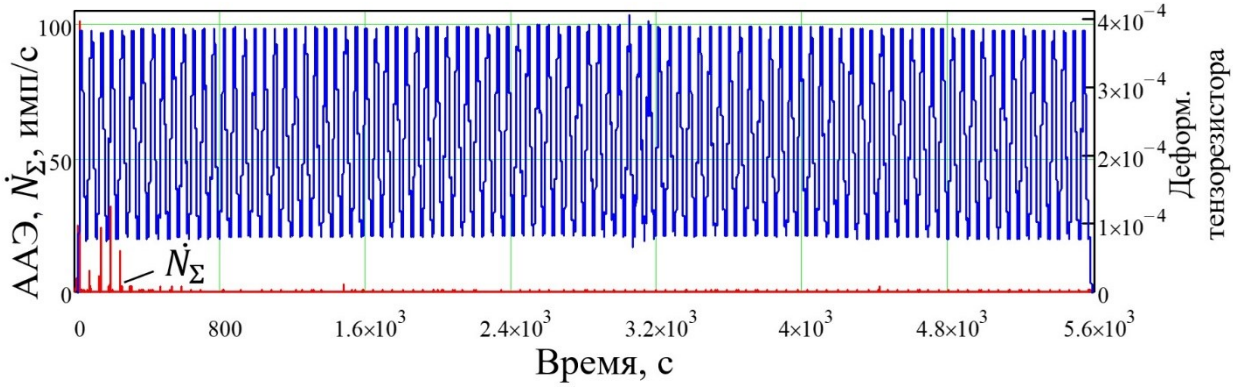
Эти решения вместе дали возможность определить переход в режим малоцикловой усталости вплоть до разрушения образца и провести испытания в допустимые сроки.

3.3.3 Результаты испытаний

Результаты испытаний образца G2-5 при максимальной нагрузке в цикле 2,4 кН приведены ниже в виде графиков на рисунках 3.8, *а* и б.



а



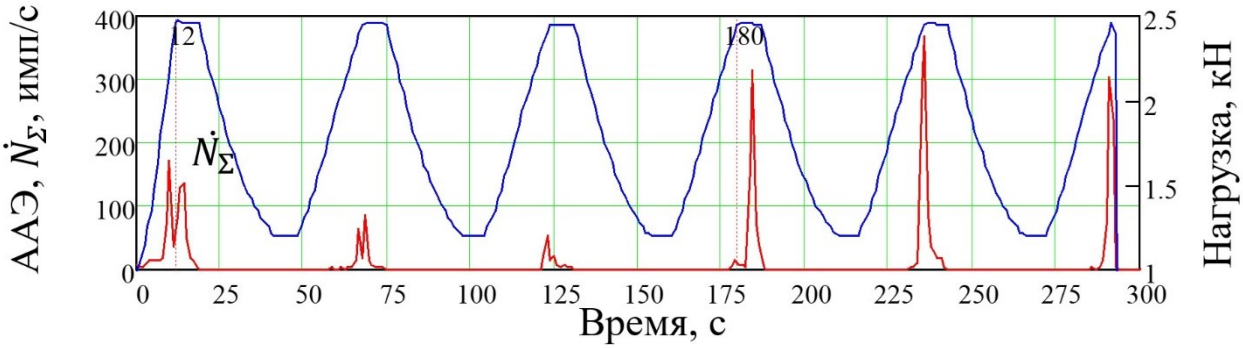
б

Рисунок 3.8 – Графики зависимостей от времени нагрузки (*а*) и деформаций $\varepsilon_т$ (*б*), а также ААЭ $\dot{N}_\Sigma$ при циклических изгибных нагружениях с максимальной нагрузкой 2,40 кН, в серии, предшествующей разрушению

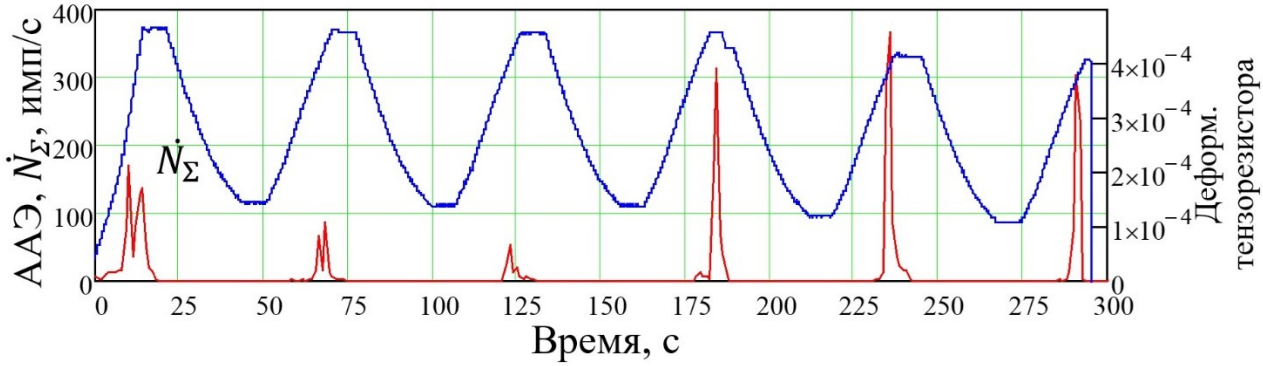
Каждая серия нагружения состояла из 100 циклов нагрузки-разгрузки, что отмечено на рисунке 3.8*а*. На этом же графике показана зависимость ААЭ $\dot{N}_\Sigma$, максимальное значение которой 103 имп./с, а затем уменьшалось с каждым

циклом до 1–2 имп./с. На графике рисунка 3.8*б* показаны соответствующие изменения показаний тензорезистора *Т*. Верхняя часть графика соответствует растяжению, а нижняя – сжатию тензорезистора. По своей форме они повторяют график изменения нагрузки, что свидетельствует о значительной степени деформировании образца в упругой области.

На рисунках 3.9*а* и 3.9*б* показаны графики изменения нагрузки и показаний тензорезистора при 2,45 кН. Здесь образец разрушился на 6-м цикле в отличие от предыдущей ступени.



а



б

Рисунок 3.9 – Графики зависимостей от времени нагрузки (*а*), и относительных деформаций тензорезистора $\varepsilon_т$ (*б*), а также ААЭ $\dot{N}_\Sigma$ при циклических изгибных нагружениях с максимальной нагрузкой 2,45 кН в серии, в которой произошло разрушение образца

На графиках рисунке 3.9, *а* в момент времени 12 с. заканчивается увеличение нагрузки и происходит ее стабилизация. График $\dot{N}_{\Sigma}$ показывает возрастание перед этим моментом, снижение, а затем последующее возрастание и уменьшение, которое связано со стабилизацией нагрузки, осуществляемое системой управления прессом. Первая часть по амплитуде больше, чем вторая. Аналогичное увеличение $\dot{N}_{\Sigma}$ на 4-м цикле при 180 с демонстрирует обратное соотношение. Величина $\dot{N}_{\Sigma}$ в первой части меньше, чем во второй части. Это говорит о приближении разрушения образца. На этой же ступени происходит сжатие тензорезистора, что говорит о снижении растягивающих напряжений из-за прорастания трещины, которая выходит в стороне, как это показано на рисунке 3.10.



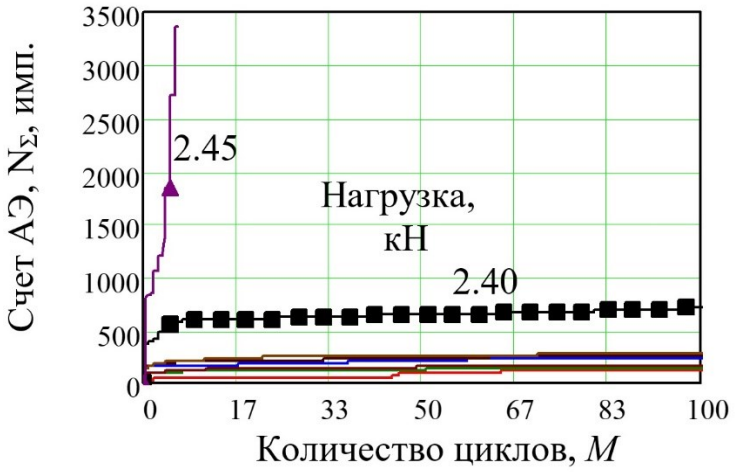
а *б*

Рисунок 3.10 – Вид сбоку (*а*) и вид снизу со стороны тензорезистора (*б*) на среднюю часть балки после разрушения, стрелкой и прямоугольником показано положение нижнего тензорезистора

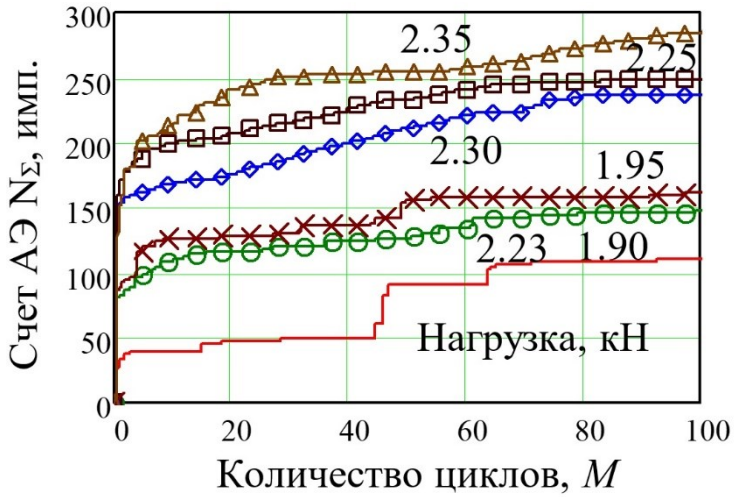
Результаты регистрации числа импульсов АЭ N_{Σ} от количества циклов в расширенном масштабе представлены на рисунке 3.11, *а*. Кроме того, кривые, полученные при нагрузках от 1,90 до 2,35 кН, для отчетливого изображения показаны также и на рисунке 3.11, *б* в растянутом масштабе по вертикальной оси.

Графики на рисунке 3.11, *а* показывают незначительное нарастание счета АЭ на ступенях при нагрузках от 1,90 до 2,35 кН по сравнению с нагрузкой 2,40 кН и, в особенности, 2,45 кН. Графики на рисунке 3.11, *б* показывают,

что на первой ступени наблюдается дискретный характер АЭ, выражающийся в ступенчатом, скачкообразном ходе кривых. Характер изменения кривой при нагрузке 2,35 кН демонстрирует более плавное ее изменение. Следует отметить также плавный ход кривых при большом количестве циклов. В начале цикла после увеличения нагрузки по сравнению с предыдущей ступенью наблюдается нестационарный режим проявления АЭ. Ближе к окончанию ступени проявляет себя стационарный режим АЭ, когда счет АЭ увеличивается линейно, что может быть использовано для прогнозирования времени жизни образца.



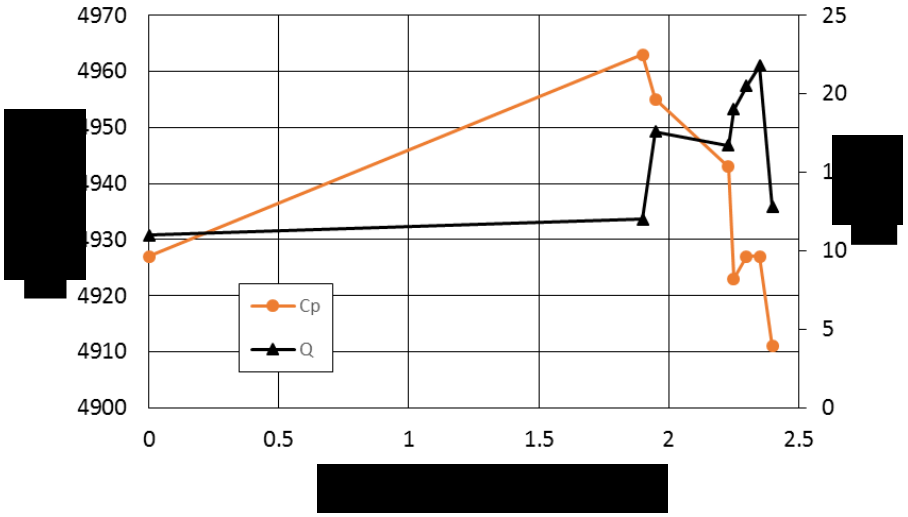
а



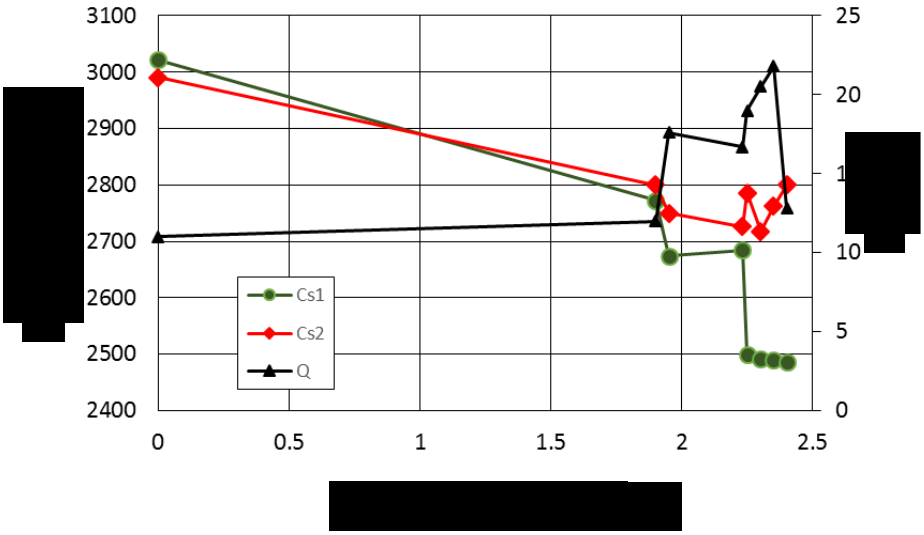
б

Рисунок 3.11 – График счета импульсов АЭ от количества циклов нагружений в обзорном (*а*) и увеличенном (*б*) масштабах

На рисунке 3.12 представлены результаты измерений акустических свойств в зависимости от нагрузки на ступенях испытаний. Скорость продольных волн C_p при увеличении нагрузки в ступени вначале возрастает, а затем снижается и становится меньше первоначального значения.



а



б

Рисунок 3.12 – Изменение скорости продольных волн C_p и акустической добротности Q (*а*) а также скоростей поперечных волн C_{s1} и C_{s2} и добротности Q (*б*) в зависимости от нагрузки на ступенях

Скорости поперечных волн C_{s1} и C_{s2} вначале уменьшаются на участке до 1,95 кН, а затем их направления расходятся. Скорость C_{s1} продолжает снижаться, а скорость C_{s2} остается около значения, достигнутого при 1,95 кН.

Акустическая добротность Q демонстрирует увеличение вплоть до нагрузки 2,35 кН, а затем снижается.

3.3.4 Анализ и обсуждение результатов испытаний

Механические предвестники разрушения

Сравнение графиков нагрузки и деформации тензодатчика при 2,40 кН, представленных на рисунке 3.8, с графиками при более низких нагрузках, показало их полную идентичность. То есть чисто механические измерения не могут предсказать разрушение на ранних стадиях.

Начальная часть до 3 циклов графиков зависимостей нагрузки и деформации при 2,45 кН, представленная на рисунке 3.9, также качественно не отличается от графиков, полученных на ступенях с меньшей максимальной нагрузкой в циклах. В то же время на 4-м цикле наблюдалось резкое снижение показаний тензорезистора, что соответствует уменьшению растягивающей деформации. Это указывает на прорастание макротрещины при разрушении образца с ее выходом за пределы тензорезистора, что было подтверждено на 6-м цикле, когда образец был разрушен. Изображение трещины показано на рисунке 3.10.

Можно сделать вывод, что во время усталостных циклических изгибных нагрузках механические наблюдения не могут выявить близость разрушения на ранних стадиях, но могут предоставить информацию об этом непосредственно перед разрушением, когда этот процесс уже активно развивается.

Акустико-эмиссионный анализ и оценка поврежденности

Регистрация АЭ позволила определить нагрузку, при которой произошло разрушение в режиме малоцикловой усталости. Эта нагрузка составила 2,45 кН. Снижение активности АЭ произошло на первых трех циклах в этой

серии, после чего она возросла на последующих трех циклах непосредственно перед разрушением, как показано на рисунках 3.9*а* и 3.9*б*.

Дополнительно это дало возможность оценить параметр поврежденности после каждой из серий нагружений. Для этого были рассчитаны общее количество АЭ событий после каждой *i*–той серии $\Sigma N_{\Sigma i}$ и эта же величина после разрушения образца N_f , в данном случае N_f = 5226 имп. Результаты расчетов представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Максимальное число АЭ событий после каждой серии циклических нагружений и прогноз параметра поврежденности ω*

Номер серии, *i*	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$P_{\max i}$, кН	0	1,90	1,95	2,23	2,25	2,30	2,35	2,40	2,45
Число импульсов АЭ в серии, $N_{\Sigma i}$, имп.	0	110	238	150	249	164	238	711	3366
Число импульсов АЭ с начала эксперимента, $\Sigma N_{\Sigma i}$, имп.	0	110	348	498	747	911	1149	1860	$\underline{N_f = 5226}$
Параметр поврежденности ω	0	0,021	0,067	0,095	0,143	0,174	0,220	0,356	1,000

* В таблице 3.5 $N_{\Sigma i}$ – число импульсов АЭ в *i*-ой серии, $\Sigma N_{\Sigma i}$ – число импульсов АЭ с начала эксперимента до конца *i*-ой серии.

Предел прочности характеризует максимально допустимые напряжения, а для промежуточных оценок используются параметр поврежденности ω [74], введенный Ю.Н. Работновым, и параметр целостности ψ [75], введенный Л.М.

Качановым, позволяющие оценивать прочность в диапазоне между ее исходным значением и полным отсутствием.

В данном случае оценка влияния нагружений осуществлялась по параметру поврежденности ω. Этот параметр характеризует эффективное уменьшение площади поперечного сечения образца. Значение $\omega = 0$ характеризует ненарушенный материал, а $\omega = 1$ его же при разрушении. Метод оценки структурной поврежденности технических объектов по акустической эмиссии использовался с конца 1950-х и уже широко применялся в промышленности с 1970-х годов [76]. В нашем случае параметр поврежденности оценивался как [77]

$$\omega_i = \frac{\sum N_{\sum i}}{N_f},$$

где ω_i – текущее значение параметра поврежденности после каждой серии нагружений; $\sum N_{\sum i}$ – текущее значение суммарной АЭ с начала эксперимента; N_f – суммарная АЭ при разрушении, N_f = 5226 имп. Значения поврежденности после каждой серии циклических нагружений образца G2-5 графически показаны на рисунке 3.13. Построения производились с шагом 100 циклов, соответствующим каждой серии. Полученная связь используется ниже в зависимостях акустических параметров от поврежденности.

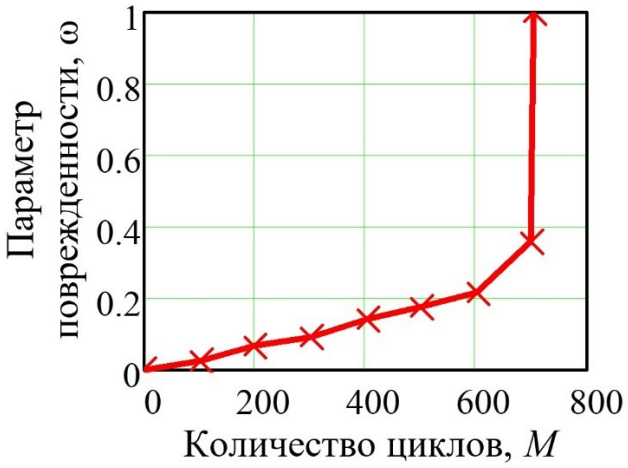


Рисунок 3.13 – Изменение параметра поврежденности ω в процессе испытания образца G2-5

Связи между поврежденностью и акустическими свойствами

В таблице 3.6 приведены данные по параметру поврежденности, максимальной нагрузке в циклах и акустических свойствах в зависимости от числа циклов усталостного нагружения от начала эксперимента *M*.

Таблица 3.6 – Параметр поврежденности и акустические свойства в зависимости от количества циклов

M	ω	P, кН	C_{p1}, м/с	C_{s1}, м/с	C_{s2}, м/с	Q	Q_d, 1/цикл
0	0	0	4923	3022	2991	11,0	0
100	0,021	1,9	5000	2773	2800	12,0	0,010
200	0,067	1,95	4988	2674	2750	17,6	0,056
300	0,095	2,23	4996	2685	2726	16,7	–0,009
400	0,143	2,25	4939	2500	2786	19,0	0,023
500	0,174	2,3	4952	2491	2718	20,5	0,015
600	0,220	2,35	4943	2490	2762	21,8	0,013
700	0,356	2,4	4951	2487	2800	12,8	–0,090
706	1,000	2,45	–	–	–	–	–

Последняя строка содержит незаполненные ячейки, т. к. она соответствует разрушению, когда измерение акустических параметров не производилось.

На рисунке 3.14 показаны графики скорости продольных волн C_p в зависимости от параметра поврежденности ω. На этих же рисунках представлены графики измеренной Q и модельной Q_{mod} акустических добротностей по отношению к первому измеренному значению. Зависимость модельной добротности Q_{mod} от ω была получена с помощью моделирования методом конечных элементов, что описано ниже. Индекс 0 в обозначениях информативных параметров означает первое измеренное значение при испытании образца. Увели-

чение как C_p, так и Q при возрастании ω обращают на себя внимание. Это может объясняться строением образца, содержащего в верхней части более прочный прослоек доломита, обладающей более высокими скоростью и модулем упругости, меньшим затуханием упругих волн и большей добротностью по сравнению с гипсом, расположенным преимущественно в нижней части образца-балки при ее изгибе. При этом увеличение нарушенности образца в первую очередь приводит к отделению линз гипса от слоя ангидрита и к преимущественному распространению по нему упругих волн, что приводит к общему результату – повышению как скорости, так и добротности. Т. е. здесь информативные параметры меняются за счет изменения строения, когда нарушаются связи между отдельными компонентами образца. Описанный механизм был промоделирован численными методами, что подтвердило его достоверность.

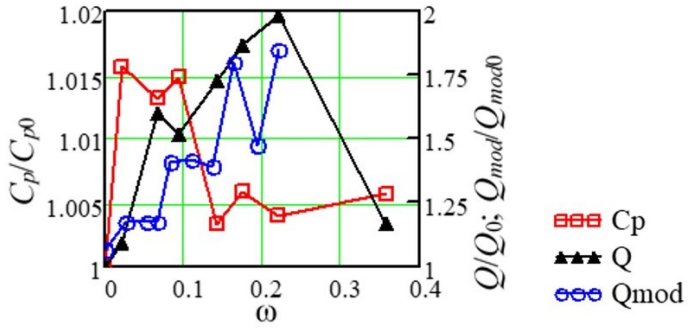


Рисунок 3.14 – Связи относительных величин скорости продольных волн C_p, а также измеренной Q и модельной Q_{mod} акустической добротности с параметром поврежденности ω

При дальнейшем увеличении поврежденности происходит не только нарушение связей между гипсом и доломитом, но и их деструкция, что вызывает снижение акустической добротности непосредственно перед разрушением при ω = 0,356. Следует отметить, что скорость продольных волн реагирует на поврежденность только на ранних стадиях накопления дефектов. Она не проявляет заметных изменений непосредственно перед разрушением. Кроме того, относительные изменения C_p невелики и не превышают ±1 % от

среднего значения, т. е. сравнимы с погрешностями измерений такого рода, что говорит о низкой информативности этого параметра.

Относительные изменения Q доходят до ±30 %, что существенно больше, чем у C_p. Резкое снижение добротности на участке между ω = 0,220 и ω = 0,356 служит признаком приближения разрушения. Более отчетливо это видно на рисунке 3.15, где представлен график зависимости производной $Q_d = \mathrm{d}Q/\mathrm{d}M$. Отрицательные значения Q_d в указанной области четко прогнозируют последующее разрушение образца.

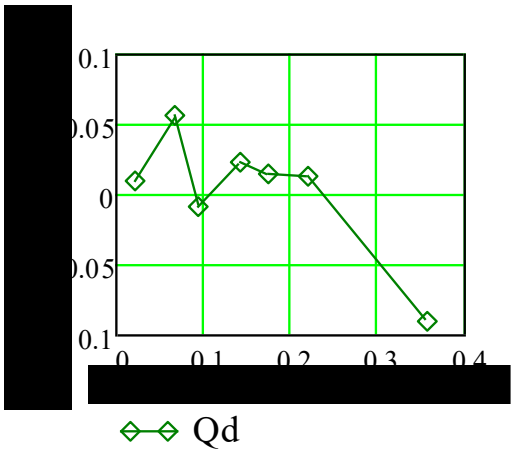


Рисунок 3.15 – Связь производной акустической добротности Q с параметром поврежденности ω

На рисунке 3.15 представлены аналогичные зависимости скоростей поперечных упругих волн C_{s1} и C_{s2}, измеренные при направлении поляризации вдоль и поперек направления нагружения образца соответственно. Для сравнения на этом же рисунке представлен и график Q.

Эти параметры проявляют высокую чувствительность при малых значениях поврежденности и слабо отражают влияние поврежденности при ω > 0,14, как и для скорости продольных волн C_p. Относительные изменения скоростей поперечных волн находятся в пределах ±10 %, что больше, чем у продольной волны, но меньше, чем у добротности.

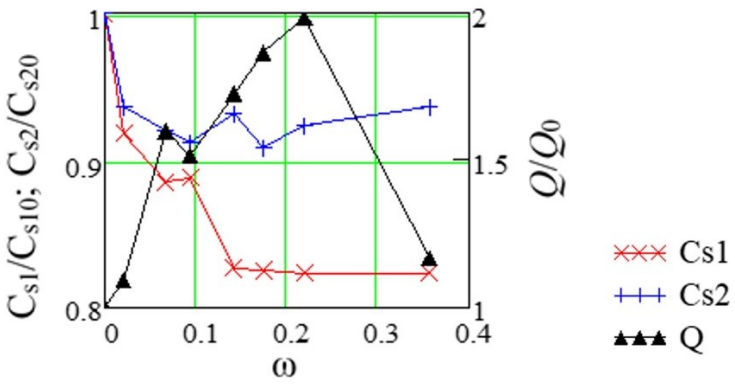


Рисунок 3.16 – Связи относительных величин скоростей поперечных волн C_{s1} (вдоль направления нагружения) и C_{s2} (поперек направления нагружения) и акустической добротности Q с параметром поврежденности ω

С точки зрения качественной оценки поврежденности и прогнозирования разрушения при изгибных нагружениях гипсосодержащей породы акустическая добротность обладает максимальной информативностью, затем следуют скорости поперечных волн, при этом параметр C_{s1} более информативен, чем C_{s2}. Скорости продольных волн наименее информативны для оценки поврежденности горных пород при изгибе.

Экспериментальные графики, представленные на рисунках 3.14 и 3.16, дают представление об изменении скоростей упругих волн и акустической добротности при увеличении нарушенности образцов в процессе циклических нагружений.

Скорость продольных волн C_p демонстрирует снижение в диапазоне нагрузок от 1,90 до 2,40 кН, хотя на последних ступенях наблюдается отклонение от этой закономерности.

Скорость поперечных волн C_{s1} монотонно снижается в этом диапазоне. наибольшие изменения отмечаются в начале, но при подходе к разрушению на последних ступенях ее изменение становится незначительным. Это говорит о слабой информативности этой величины при прогнозе ступени, на которой произойдет разрушение.

Скорость поперечных волн C_{s2} демонстрирует хорошую чувствительность к максимальной нагрузке в цикле до 1,95 кН, но практически не меняется при больших значениях т.е. ее информативность по отношению к разрушению мала.

Информативность скорости C_{s1} по сравнению с информативностью скорости C_{s2} выше. Это можно объяснить, учитывая, что направление поляризации волн C_{s1} совпадает с направлением нагружения и при допущении, что в образце появляются плоскости ослабления, перпендикулярные направлению приложения нагрузки и направлению поляризации C_{s1}, что будет сказываться на этой скорости в значительной мере. Такие поверхности освобождают также слой доломита от связи с гипсом и приводят к повышению добротности. Поверхности ослабления, плоскость которых будет совпадать с направлением поляризации волны, не будут сильно влиять на скорость C_{s2}.

Увеличение добротности при усталостных нагружениях связано с разрушением определенных элементов конструкции и «освобождением» доломита от связи с гипсом, а ее снижение связано с деструкцией несущей части образца. Это позволит осуществлять мониторинг объектов и оценивать приближение разрушения. Увеличение добротности при одновременном уменьшении скоростей упругих волн позволяет сделать вывод о ранних стадиях разрушения образца. Уменьшение добротности при слабых изменениях скоростей упругих волн может свидетельствовать о приближении разрушения. Для более точного прогнозирования момента разрушения необходимо использование адекватных компьютерных моделей, способных описывать как увеличение, так и уменьшение информативных параметров в процессе усталостного нагружения и осуществлять достоверную интерпретацию экспериментальных результатов.

Следует отметить, что схожие зависимости увеличения добротности Q при увеличении поврежденности с последующим уменьшение перед серией,

на которой произошло разрушение, отмечены для всех трех образцов. Указанные зависимости на участке возрастания Q образцов аппроксимированы линейными функциями

$$\delta_Q = 2{,}74\delta_P - 1{,}39,\ R = 0{,}64 \text{ для G-2-04-AE;}$$

$$\delta_Q = 5{,}03\delta_P - 4{,}40,\ R = 0{,}95 \text{ для G-2-18-AE;}$$

$$\delta_Q = 3{,}68\delta_P - 2{,}63,\ R = 0{,}93 \text{ для G-2-05-AE,}$$

где $\delta_Q = Q(P)/Q_0$ – относительная добротность, $\delta_P = P/P_0$ – относительная максимальная нагрузка, Q_0, P_0 – первые значения добротности и максимальной нагрузки при испытаниях каждого образца.

Разброс в значениях коэффициента пропорциональности при δ_P, в основном, обусловлен различием в свойствах образцов, а также в меньшей степени первым значением максимальной нагрузки, к которого начинались испытания. Т. е. все три образца показали наличие участка возрастания акустической добротности, что дает основание для предположения об одинаковом механизме такого явления.

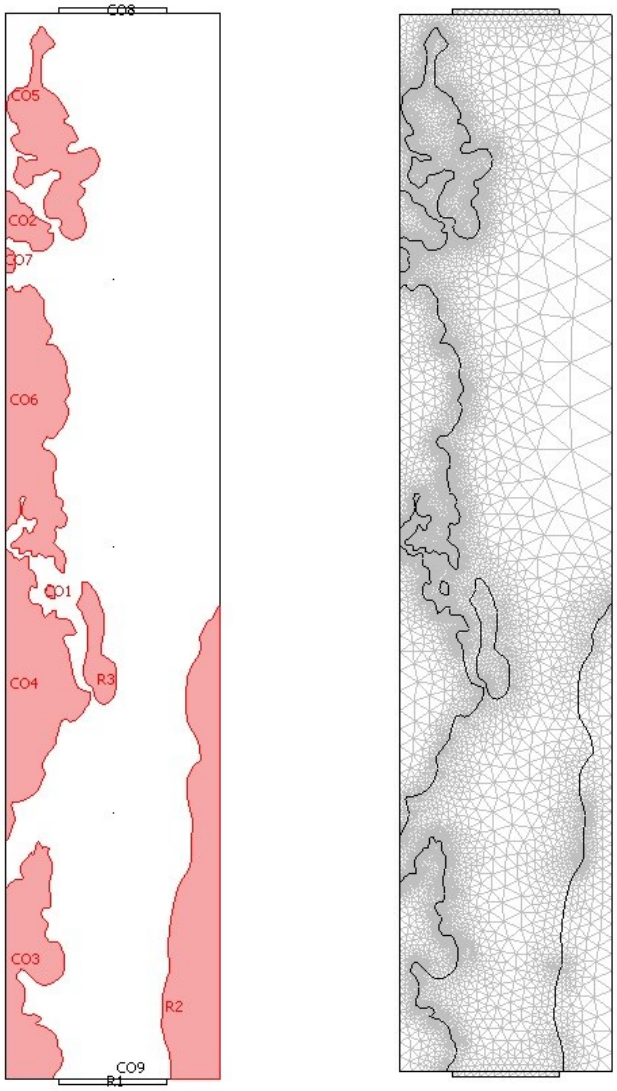
3.3.5 Моделирование зависимости акустической добротности от нарушенности границ между доломитом и гипсом

Численная модель была разработана в среде COMSOL Multiphysics для проверки гипотезы о влиянии разрушения границ между доломитом и гипсом на увеличение акустической добротности. Модель имела размеры 0,04 × 0,04 × 0,2 м. На рисунке 3.17*а* представлена расчетная схема модели, а на рисунке 3.17*б* ее разбивка по сетке. Сверху и снизу расположены пьезопреобразователи. Механические свойства пород были взяты из предварительных экспериментов.

Задача решалась в среде Comsol Multiphysics с использованием МКЭ. Уравнение, описывающие происходящие при этом процессы, имеет вид волнового уравнения с учетом затухания.

$$e_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (-c\nabla u) = f,$$

где e_a –плотность; d_a – коэффициент потерь; c – матрица жесткости; f – функция, описывающая сигнал прозвучивания.



а *б*

Рисунок 3.17 – Модель образца гипсосодержащей породы с подобластями (*а*) и разбивкой по сетке конечных элементов (*б*) при исследовании АЧХ, белые области – доломит, закрашенные области – гипс, пьезопреобразователи расположены сверху и снизу

Ввиду необходимости большого объема оперативной памяти компьютера для моделирования в 3D, задача решалась в двумерной постановке.

Физические свойства доломита и гипса взяты близкими к значениям, полученным из экспериментов. Они приведены в таблице 3.7. Для пьезопреобразователей был выбран пьезокерамический материал PZT-5A, аналог ЦТС-19, со стандартными свойствами.

Таблица 3.7 – Физические свойства пород для моделирования

Минерал	Модуль упругости, E, ГПа	Коэффициент Пуассона, ν	Плотность, ρ, кг/м^3	Частотный коэффициент затухания, β_{dK}, с
Доломит	50	0,25	2700	$1 \cdot 10^{-7}$
Гипс	40	0,22	2400	$5 \cdot 10^{-7}$

На внутренних границах в зависимости от поврежденности задавались различные условия, внешние границы оставались свободными. Модельный параметр поврежденности в данном случае определялся как отношение длины скользящего контакта на внутренних границах к суммарной длине сплошного и скользящего контактов.

Для определения акустической добротности использовался резонансный метод. На возбуждающий преобразователь в верхней части модели подавался гармонический линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ) модельный электрический сигнал амплитудой 100В в диапазоне частот от 30 до 60 кГц. Выходное напряжение U приемного преобразователя в нижней части модели было частотным откликом. Его зависимость от частоты приведена на рисунке 3.18.

Акустическая добротность определялась как отношение частоты максимума АЧХ к его ширине на уровне 0,707 от максимума. Начальное значение акустической добротности образца равно $Q_0 = 14{,}0$. Для исследования влияния на акустическую добротность нарушения контактов между гипсом и доломитом в модели изменялись граничные условия на контактах гипс-доломит.

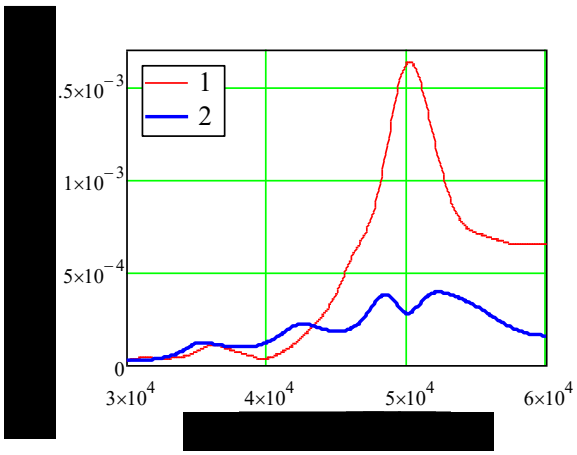


Рисунок 3.18 – Модельная АЧХ образца доломита и гипса со скользящими условиями на внутренних границах между доломитом и гипсом (1) и с неразрывными границами (2)

На рисунке 3.19 показано изменение акустической добротности модельного образца от параметра поврежденности $\omega_{мод}$. Эта же зависимость в относительных единицах приведена выше на рисунке 3.14. Как видно из графика, при увеличении параметра поврежденности акустическая добротность возрастает, как и при лабораторных испытаниях на образцах гипсосодержащих пород.

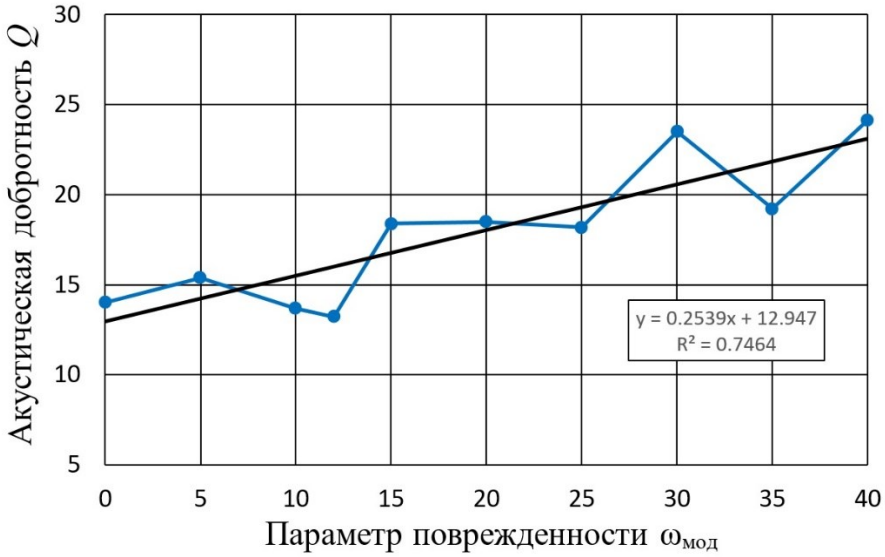


Рисунок 3.19 – Зависимость абсолютной акустической добротности модельного образца в зависимости от параметра поврежденности $\omega_{мод}$

Такой результат имеет свое физическое объяснение. Подобласти гипса с большими потерями и, соответственно, с меньшей акустической добротностью в структуре без повреждений, демпфирует слой доломита, что приводит к снижению его акустической добротности. Появление трещин на границах снижает демпфирование доломита и увеличивает его акустическую добротность. Доломит в этом случае играет основную роль в резонансных явлениях и величине амплитуды на выходном преобразователе, что и отражается на уменьшении эффективных потерь и увеличении добротности.

Таким образом, разрушение двухкомпонентного геоматериала при изгибных усталостных нагружениях может привести как к снижению, так и к увеличению акустической добротности образца. На начальных стадиях происходит разрушение на границах между доломитом и известняком, что приводит к увеличению добротности. Затем происходит разрушение самих минеральных компонентов и снижение добротности.

3.3.6 Регрессионные зависимости для расчета параметра поврежденности по акустическим свойствам и оценка точности

Коэффициенты корреляции R, детерминации R^2 и среднеквадратическая ошибка (СКО) служат для оценки точности регрессионных зависимостей между величинами. СКО служит количественной оценкой абсолютной погрешности регрессионных зависимостей, по которым один или несколько информативных параметров позволяют рассчитать другие. В данном случае различные сочетания акустических параметров с помощью регрессионных зависимостей позволяют оценить параметр поврежденности ω образцов исследуемых пород с различной точностью, которая оценивается с помощью СКО. Чем она меньше, тем точнее зависимость. Для ее уменьшения следует увеличивать количество информативных параметров, например, с помощью учета пористости пород [78]. Для оценки погрешностей были использованы уравнения ли-

нейной множественной регрессии. Результаты расчета коэффициента корреляции R, коэффициента детерминации R^2 и СКО, а также отношения этих величин для соответствующего сочетания акустических параметров и скорости продольных волн $СКО_i/СКО_{Vp}$ представлены в таблице 3.8.

Как следует из данных таблицы 3.8, наибольшей погрешностью обладает зависимость расчета поврежденности по скорости продольных волн $\omega(V_p)$. Значения погрешностей других сочетаний информативных параметров по отношению к погрешности зависимости $\omega(V_p)$ приведены в последней колонке справа. Все они меньше 1.

Таблица 3.8 – Абсолютная и относительная СКО

i	Информативный параметр	Вид зависимости	R	R^2	СКО$_i$	СКО$_i$/СКО$_{Vp}$
1.	V_p	$\omega = 5{,}858862 - 0{,}001154V_p$	0,287	0,083	0,1116	1
2.	V_{s1}	$\omega = 1{,}424369 - 0{,}000489V_{s1}$	0,799	0,639	0,0700	0,627
3.	V_{s2}	$\omega = 1{,}524428 - 0{,}000498V_{s2}$	0,369	0,136	0,1083	0,970
4.	Q	$\omega = -0{,}004770 + 0{,}008479Q$	0,296	0,088	0,1113	0,997
5.	Q_d	$\omega = 0{,}13863 - 1{,}83831Q_d$	0,661	0,437	0,0874	0,783
6.	V_p, V_{s1}	$\omega = 6{,}396241 - 0{,}001006V_p - 0{,}000481V_{s1}$	0,838	0,702	0,0637	0,570
7.	V_p, V_{s2}	$\omega = 16{,}49441 - 0{,}00274V_p - 0{,}00099V_{s2}$	0,684	0,468	0,0850	0,762
8.	V_p, Q	$\omega = 5{,}216811 - 0{,}001050V_p + 0{,}007763Q$	0,394	0,155	0,1071	0,960
9.	V_{s1}, Q	$\omega = 2{,}282165 - 0{,}000718V_{s1} - 0{,}015281Q$	0,884	0,782	0,0544	0,488
10.	V_{s2}, Q	$\omega = 1{,}279984 - 0{,}000424V_{s2} + 0{,}002291Q$	0,374	0,140	0,1081	0,968
11.	V_p, Q_d	$\omega = 3{,}50639 - 0{,}00068V_p - 1{,}74984Q_d$	0,682	0,465	0,0853	0,764
12.	V_{s1}, Q_d	$\omega = 1{,}28343 - 0{,}00043V_{s1} - 1{,}51415Q_d$	0,963	0,927	0,0314	0,281
13.	V_{s2}, Q_d	$\omega = 1{,}97099 - 0{,}00066V_{s2} - 2{,}05328Q_d$	0,817	0,668	0,0672	0,602
14.	Q, Q_d	$\omega = -0{,}20867 + 0{,}02127\,Q - 2{,}76451Q_d$	0,936	0,877	0,0409	0,366
15.	V_p, V_{s1}, V_{s2}	$\omega = -8{,}22238 + 0{,}00141V_p - 0{,}00099V_{s1} + 0{,}00142V_{s2}$	0,896	0,802	0,0518	0,464

16.	V_p, V_{s1},Q	$\omega = 8{,}016935 - 0{,}001149V_p - 0{,}000726V_{s1} - 0{,}016300Q$	0,929	0,863	0,0432	0,387
17.	V_p, V_{s1},Q_d	$\omega = 4{,}41501 - 0{,}00063V_p - 0{,}00043V_{s1} - 1{,}43295Q_d$	0,975	0,951	0,0257	0,230
18.	V_p, V_{s2},Q	$\omega = 37{,}72147 - 0{,}00594V_p - 0{,}00270V_{s2} - 0{,}03503Q$	0,897	0,804	0,0516	0,463
19.	V_p, V_{s2},Q_d	$\omega = 14{,}76088 - 0{,}00235V_p - 0{,}00107V_{s2} - 1{,}88187Q_d$	0,937	0,878	0,0407	0,365
20.	V_p, V_{s1}, V_{s2}, Q	$\omega = 14{,}53051 - 0{,}00219V_p - 0{,}00059V_{s1} - 0{,}00059V_{s2} - 0{,}02094Q$	0,931	0,867	0,0425	0,381
21.	V_p, V_{s1}, V_{s2}, Q_d	$\omega = 3{,}72130 - 0{,}00052V_p - 0{,}00046V_{s1} + 0{,}00007V_{s2} - 1{,}40486Q_d$	0,975	0,952	0,0256	0,230
22.	V_p, V_{s1},Q,Q_d	$\omega = 3{,}94084 - 0{,}00057V_p - 0{,}00039V_{s1} + 0{,}00261Q - 1{,}58810Q_d$	0,976	0,953	0,0254	0,227
23.	V_p, V_{s2},Q,Q_d	$\omega = 3{,}94084 - 0{,}00057V_p - 0{,}00039V_{s2} + 0{,}00261Q - 1{,}58810Q_d$	0,953	0,908	0,0355	0,317
24.	V_p, V_{s1}, V_{s2}, Q, Q_d	$\omega = -4{,}75611 + 0{,}00081\ V_p - 0{,}00052\ V_{s1} + 0{,}00074\ V_{s2} + 0{,}01072\ Q - 1{,}77719\ Q_d$	0,979	0,958	0,0239	0,214

Увеличение количества информативных параметров в целом приводит к уменьшению СКО. Наилучший результат показывает сочетание всех пяти информативных параметров, для которого погрешность существенно меньше, чем для зависимости $\omega(V_p)$. Эта зависимость имеет вид

$$\omega = -4.75611 + 0.00081 \cdot V_p - 0.00052 \cdot C_{s1} + 0.00074 \cdot C_{s2} + 0.01072 \cdot Q - 1.77719 \cdot Q_d ,$$

при этом $R = 0{,}979$, а $R^2 = 0{,}958$, СКО = 0,0239. Для значения параметра поврежденности $\omega = 0{,}356$ после серии циклов, предшествующих разрушению, относительная погрешность расчета ω составляет $\delta_\omega = 0{,}0239/0{,}356 = 0{,}067$, т. е. менее 7%.

3.4 Выводы по главе 3

1. Анализ публикаций показал, что объектами массива горных пород, испытывающими изгиб и растяжение с последующим обрушением, являются участки кровли, в особенности имеющие поверхности ослабления в виде трещин и прослойков. Источниками циклических и повторяющихся нагружений здесь могут быть сейсмоволны от горных ударов и землетрясений, от бурения и взрывов, от массивного транспорта при его движении по выработкам. На угольных и соляных месторождениях это могут быть упругие волны от рабочих органов машин, отделяющих полезное ископаемое от массива. Этим обусловлена необходимость исследования свойств горных пород при циклических нагружениях. Расчетами с помощью МКЭ-моделирования показано, что от горных ударов вполне реально вибрационное воздействие на породы кровли, составляющее 20–40% от предела прочности при растяжении. При добыче полезных ископаемых и проходке тоннелей пиковое значение напряжений в прилегающих областях может превышать 5 МПа, а усредненное значение сейсмоамплитуд находится в диапазоне от 0,1 до 1,0 МПа, что при повторении может оказать серьезное ослабляющее воздействие на массив горных пород.

2. Рассмотрено изменение скоростей упругих волн C_p, C_{s1}, C_{s2} и акустической добротности Q образцов-балок горных пород сложной текстуры доломит-гипс при циклическом изгибном нагружении в зависимости от количества циклов нагружения и параметра поврежденности ω. Скорости упругих волн уменьшались, а акустическая добротность возрастала при увеличении количества усталостных циклов. Непосредственно перед разрушением добротность Q показала резкое снижение, связанное с разрушением компонентов. Моделирование методом конечных элементов подтвердило гипотезу, что увеличение добротности связано с ослаблением прочности контактов на границах между высокодобротным доломитом и низкодобротным гипсом.

3. Получены уравнения линейной регрессии, которые позволяют прогнозировать параметр поврежденности ω в зависимости от различных комбинаций акустических свойств, таких как скорость продольной и двух поперечных упругих волн, акустическая добротность и ее производная на количество циклов загрузки. Оценена точность полученных регрессионных зависимостей. Минимальная ошибка достигается при использовании всех информативных акустических параметров.

4. Представленные экспериментальные результаты позволяют сделать общий вывод о том, что скорости продольных и поперечных упругих волн не позволяют выявить многие особенности изучаемых пород, связанные с текстурой самого образца, и имеют только ограниченное использование в этом случае. Акустическая добротность отражает различия в текстуре горных пород и может использоваться в качестве дополнительного информативного параметра.

4 Закономерности изменения прочностных и акустических свойств горных пород при медленных циклических и импульсных повторяющихся нагружениях

4.1 Оценка циклических силовых воздействий на массив каменной соли вокруг хранилища газа в процессе эксплуатации

В процессе эксплуатации подземных хранилищ газа в соляных отложениях происходит увеличение давления газа при закачке газа и уменьшение давления при его отборе, что вызвано локальными и сезонными изменениями потребления. Давление газа поддерживается в пределах между максимальным и минимальным значениями, определяемыми из условий обеспечения устойчивости массива. Приведем расчет максимального и минимального давлений на типичном примере. Примем среднюю плотность вышележащих пород $\rho_г = 2600$ кг/м^3.

Для подземных газонефтехранилищ максимально допустимое давление $P_{мах}$ на уровне башмака обсадной колонны определяется по формуле [79]

$$P_{мах} = \rho_г g\,(H_k - H_н) \qquad (4.1)$$

где $H_к$ – расстояние от поверхности земли до кровли выработки; $H_k = 800$ м;

$H_н$ – длина не обсаженного участка скважины, м; $H_н = 20$ м.

Минимально допустимое давление P_{min} на уровне кровли выработки-емкости, создаваемое в резервуаре продуктом, определяется по формуле:

$$P_{min} = \rho_r g H_K - \frac{2}{\sqrt{3}}\frac{C+1}{C}\,\sigma_i^{\infty}, \qquad (4.2)$$

где C и σ_i^{∞}– параметры уравнения состояния каменной соли.

Расчетные параметры, характеризующие свойства каменной соли, получены из лабораторных экспериментов. В нашем случае σ_i^{∞} – интенсивность касательных напряжений, соответствующая пределу длительной прочности, принята равной σ_i^{∞} =11 МПа, а коэффициент C был рассчитана по формуле

$$C = \frac{1}{1-2\frac{\sigma_i^{\infty}}{E\varepsilon_i^{\infty}}(1+\nu)}, \qquad (4.3)$$

где σ_i^{∞} – интенсивность касательных напряжений, соответствующая пределу длительной прочности;

ε_i^{∞} – интенсивность предельной деформации сдвига, из экспериментов получено значение ε_i^{∞}=0,05;

E – Модуль деформации, Па, E = 24 ГПа;

ν – коэффициент Пуассона, ν = 0,25.

График зависимости максимального и минимального давлений в выработке-емкости от глубины представлен на рисунке 4.1.

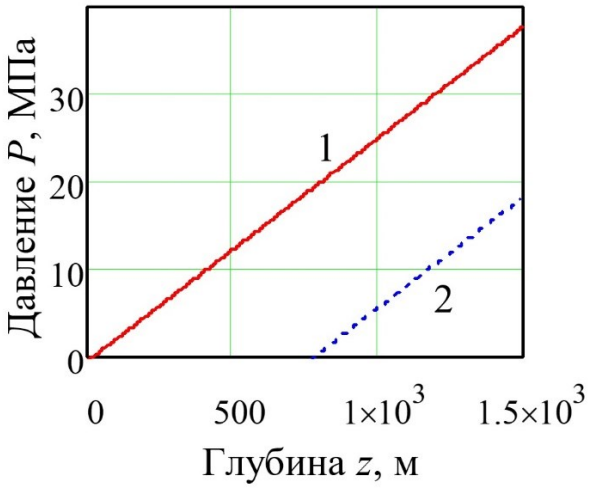


Рисунок 4.1 – Максимальное (1) и минимальное (2) значение эксплуатационных давлений в выработке-емкости

Для глубины 800 м, на который планируется сооружения ПХГ, P_{max} = 19,87 МПа и P_{min} =0,47 МПа. Близкие к этим величинам напряжения задавались в экспериментах.

4.2 Результаты испытаний образцов каменной соли при медленных циклических нагружениях

Целью испытаний [80] являлось исследование зависимостей предела прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$ и акустической добротности Q каменной

соли от количества циклических нагружений M, имитирующих изменение давления в подземных хранилищах углеводородов, зависимостей $\sigma_{сж}(Q)$ и их сравнение с аналогичными зависимостями, полученными для других типов пород. Для испытаний использовались оборудование и методики, описанные в главе 2.

В проведенных ранее исследованиях [81, 82, 83] было установлено, что для известняков, травертина, габбро, гипсосодержащих пород при увеличении M происходит уменьшение как предела прочности, так и добротности. В то же время для мрамора наблюдалось их немонотонное изменение, вначале уменьшение, а затем увеличение, что объясняется пластическим упрочением. Ниже рассмотрены особенности аналогичных зависимостей для образцов каменной соли Новомосковского месторождения, показана их схожесть с зависимостями, полученными для мрамора.

Зависимости $\sigma_{сж}(M)$, $Q(M)$ и $\sigma_{сж}(Q)$ рассмотрены на примере испытания образцов пород Новомосковского месторождения каменной соли.

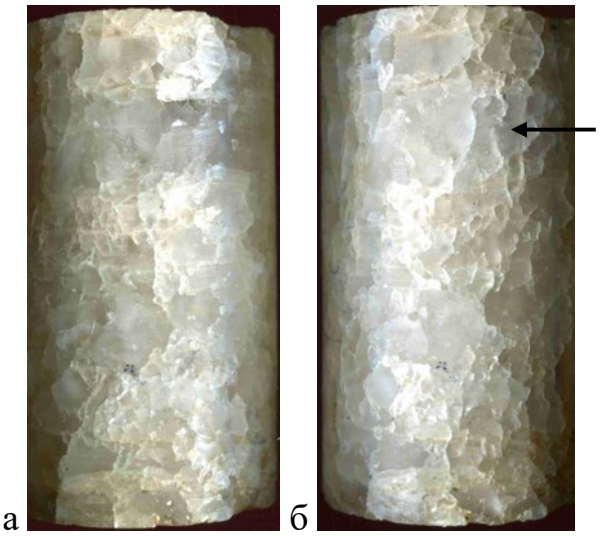
Это месторождение по размерам и морфологии соляных залежей, сложности их внутреннего строения и условий залегания, выдержанности мощности, качества и технологических свойств соли относится к пластовым [84]. Месторождение залегает практически горизонтально на глубине 870-890 м. Соляная залежь простирается на десятки и сотни километров. Мощность пласта каменной соли на участке расположения разведочных скважин изменяется от 30 до 44,7 м. Стратиграфический разрез участка месторождения представлен девонскими, каменноугольными, меловыми и четвертичными отложениями [85]. Соляной пласт надежно изолирован от потери герметичности и проникновения пластовых вод в подземные выработки пласта как снизу, так и сверху. На месторождении находится Новомосковский рассолопромысел, ведущий добычу каменной соли путем ее подземного растворения через скважины. В настоящее время рассматривается возможность использования отработанных камер рассолопромысла для создания подземных хранилищ газа (ПХГ).

Образцы каменной соли были извлечены из поисковой скважины 3П, пробуренной в 1996-97 гг. с отбором керна по соляным отложениям и вмещающим их нерастворимым горным породам предполагаемой рабочей толщи ПХГ. Это залегающие на кристаллических породах верхнего протерозоя и распространенные повсеместно на территории соленосного бассейна девонские терригенные и хемогенные морские и лагунные отложения, в частности, породы ряжского, морсовского и мосоловского горизонтов, которые представляют собой каменную соль в интервале глубин 835,6–887,7 м и вмещающие её породы в интервалах 775,0–835,6 м и 887,7–949 м. Соль из этой скважины имеет разнозернистую структуру и слоистую текстуру. Из кернов, извлеченных из скважин, изготавливались образцы цилиндрической формы диаметром 36,6 мм и высотой 73,2 мм с отношением высоты к диаметру 2:1 по ГОСТ 21153.2–84.

На рисунках 4.2–4.4 для примера представлен ряд фотографий образцов каменной соли до и после циклических нагружений. Фотографии получены на сканере с разрешающей способностью 600 dpi. Здесь можно выделить три группы, отличающиеся по своему строению. Образцы группы *A* (рисунок 4.2) имеют однородное строение и состоят из галита без примесей, средней трещиноватости. После проведения циклических нагружений трещиноватость увеличилась, но образец не разрушился. Образцы группы *B* (рисунок 4.3) содержат прослои с примесями, нарушающие однородное строение. Образцы группы *C* (рисунок 4.4) содержат прослои, отличающиеся друг от друга по трещиноватости. Нижняя и верхняя части таких образцов уже в исходном состоянии нарушены в большей степени, чем средняя, что заметно по более светлому оттенку этих частей по сравнению со средней частью.

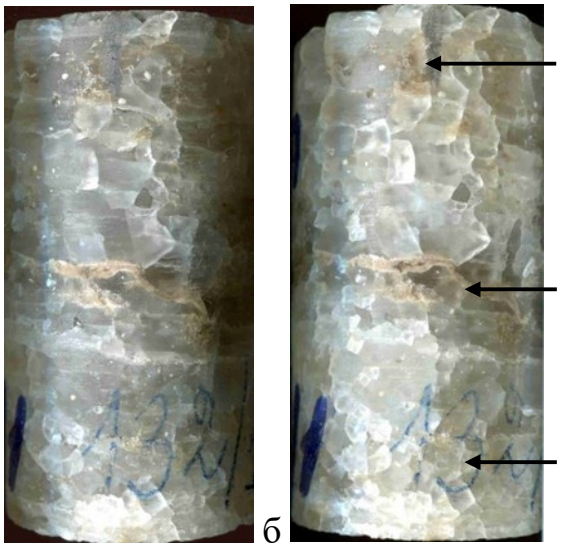
Сразу же следует сказать, что образцы групп *B* и *C* в процессе усталостных циклических нагружений монотонно снижали свою прочность и разрушались. Поэтому эксперименты, проводимые с ними, не принимались во внима-

ние. Дальнейшие результаты касаются исключительно образцов группы *A*, состоящих из галита, прочность и другие свойства которых в процессе нагружений изменялись немонотонно.



а б

Рисунок 4.2 – Образец группы *A* однородного строения и трещиноватости до (а) и после (б) испытаний, стрелкой показана область прорастающих макротрещин



а б

Рисунок 4.3 – Образец группы *B* слоистого строения с внедрением примесей до (а) и после (б) испытаний при M=5, стрелками показаны прорастающие макротрещины

а)  б) 

Рисунок 4.4 – Образец группы *C* с одной (а) и другой (б) сторон до испытаний, стрелками показаны области исходной повышенной трещиноватости, в процессе усталостных нагружений был разрушен

В соответствии с изложенной в главе 2 методикой на трех образцах были проведены первичные измерения акустической добротности и предела прочности, а также скоростей упругих волн, позволивших рассчитать динамический модуль Юнга. Результаты представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты измерения акустических и механических свойств образцов соли до циклических нагружений

Образец	Скорость, м/с		Модуль Юнга *E*,	σ_0, МПа	Добротность *Q*	Кол.-во циклов
	P-волна	*S*-волна				
112	4260	2864	38,2	22,2	45,30	0
43-1	4080	2706	34,4	24,8	20,06	0
46-6	4111	2759	35,4	22,4	45,26	0
Среднее	4150	2776	36,0	23,1	36,87	0

Полученные значения были взяты далее в качестве начальных величин при количестве усталостных циклов, равном нулю.

В таблицах 4.2–4.4 представлены результаты циклических испытаний при верхней границе нагружений γ_{max}, равной 40, 60 и 80 % от разрушающих напряжений.

Таблица 4.2 – Результаты измерений акустических и механических свойств образцов каменной соли после циклических испытаний при $\gamma_{max} = 40\%$ от первоначального предела прочности

Образец	Скорость, м/с		Модуль Юнга E, ГПа	$\sigma_{сж}$, МПа	Добротность Q	Кол.-во циклов
	P-волна	S-волна				
180-5	4094	2789	35,9	20,9	20,00	5
124-3	3349	2276	23,9	20,0	19,00	10
152-3	3933	2734	35,9	18,1	18,00	15
140-3	3691	2582	29,5	13,0	13,00	20
185-6	3978	2723	33,9	23,0	10,00	40
182-3	4080	2829	36,2	20,08	3,46	60
166-1	4057	2752	35,0	21,45	6,43	80
163-3	4057	2829	35,3	24,9	12,00	100

Таблица 4.3 – Результаты измерений акустических и механических свойств образцов каменной соли после циклических испытаний при $\gamma_{max} = 60\%$ от первоначального предела прочности

Образец	Скорость, м/с		Модуль Юнга E, ГПа	$\sigma_{сж}$, МПа	Добротность Q	Кол.-во циклов, шт.
	P-волна	S-волна				
7	3460	2292	24,5	22,17	5,66	5
66-1	3204	2184	21,7	20,13	5,95	10
61-2	2218	1496	10,2	20,46	4,17	15
27/3-2	2813	1875	16,4	15,92	4,12	20
132-1	3174	2104	20,8	20,72	2,9	40
118-2	4360	2907	39,7	22,83	8,81	60
186-3	3401	2210	23,2	19,4	7,00	80
119-2	2615	1743	14	24,65	4,52	100

Таблица 4.4 – Результаты измерений акустических и механических свойств образцов каменной соли после циклических испытаний при $\gamma_{max} = 80\%$ первоначального предела прочности

Образец	Скорость, м/с		Модуль Юнга *E*, ГПа	$\sigma_{сж}$, МПа	Добротность Q	Кол.-во циклов, шт.
	P-волна	*S*-волна				
186-4	3936	2659	30,2	21,02	17,29	5
108-1	3757	2515	29,4	22,63	10,31	10
83-3	3615	2435	27,4	16,97	10,29	15
144-1	3534	2352	26,2	19,02	5,31	20
71	4023	2672	33,5	22,31	8,91	40
146-2	3340	2164	22,6	20,94	7,46	60
100-1	4539	3037	43,2	20,65	7,4	80
61-1	3339	2226	23	21,27	6,88	100

Полученные результаты для наглядности далее представлены графически.

На рисунке 4.5 представлены графики зависимостей предела прочности от количества циклов усталостного нагружения при максимальной нагрузке γ_{max}, равной 40, 60, 80 % от первоначального предела прочности. Обращают на себя внимание несколько особенностей хода этих кривых. При увеличении *M* от 0 до 100 все кривые демонстрируют вначале снижение предела прочности, а затем его увеличение. Для большей максимальной нагрузки ($\gamma_{max} =$ 80 %) минимум предела прочности наблюдается при меньшем числе циклов *M*. Наименьшее значение предела прочности наблюдается при действии меньшей ($\gamma_{max} = 40$ %) максимальной усталостной нагрузке. Следует отметить также, что при максимальном значении *M* получены значения предела прочности, превышающие его первоначальное значение. Это может быть понятно, если учесть, что каждая точка соответствует различным образцам, и это увеличение может быть связано как с пластическим упрочнением, так и с высокими индивидуальными значениями предела прочности отдельных образцов.

Еще одной особенностью является значение предела прочности в минимуме при $\gamma_{max} = 80$ %, равное 16,97 МПа, т.е. меньшее, чем в цикле нагружения. Это может быть связано с уменьшением нагрузки до нуля при снятии образца с установки нагружения для исследования акустических свойств, что оказывает дополнительное разрушающее воздействие.

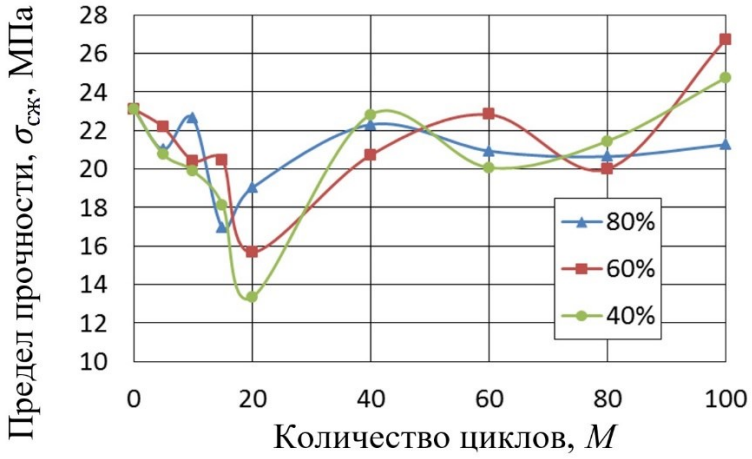


Рисунок 4.5 – Зависимость предела прочности при одноосном сжатии образцов каменной соли от количества усталостных циклов нагружения при максимальной относительной нагрузке в цикле γ_{max}, составляющей 40, 60 и 80% от разрушающих напряжений

На рисунке 4.6 показана зависимость добротности от количества циклов усталостного нагружения. Здесь обращают на себя также несколько особенностей, связанных с усталостным нагружением образцов каменной соли.

Первое же нагружение до M=5 резко снижает добротность, причем, это снижение для уровня $\gamma_{max} = 40$ % меньше, чем для других нагрузок. Дальнейшее снижение Q сменяется ее увеличением. Аналогичные изменения добротности отмечаются и для других уровней максимальной нагрузки в цикле. Следует также отметить, что число M_{min}, соответствующее минимуму добротности, уменьшается с увеличением максимальной нагрузки в цикле, т. е. при $\gamma_{max} = 40\%$ M_{min}= 60; при $\gamma_{max} = 60\%$ M_{min}= 40; при $\gamma_{max} = 80\%$ M_{min}= 20.

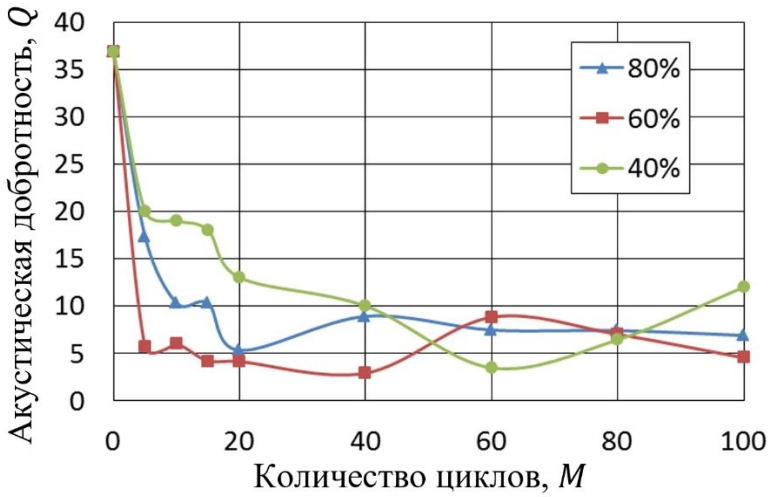


Рисунок 4.6 – Зависимость акустической добротности Q от количества циклов усталостного нагружения M

Кроме измерений предела прочности и акустической добротности был выбран один образец, на котором измерены скорости P- и S-волн в зависимости от M, что позволило рассчитать динамические модули упругости и построить соответствующие графики. На рисунке 4.7 показаны графики зависимостей изменения скоростей P- и S-волн, которые демонстрируют уменьшение в области 15-20 циклов нагружений и некоторое увеличение и стабилизацию своих значений при большем числе M. По этим данным рассчитан динамический модуль упругости, график которого представлен на рисунке 4.8. В зависимости $E(M)$ также наблюдается уменьшение при $M = 20$ и последующее увеличение с ростом M.

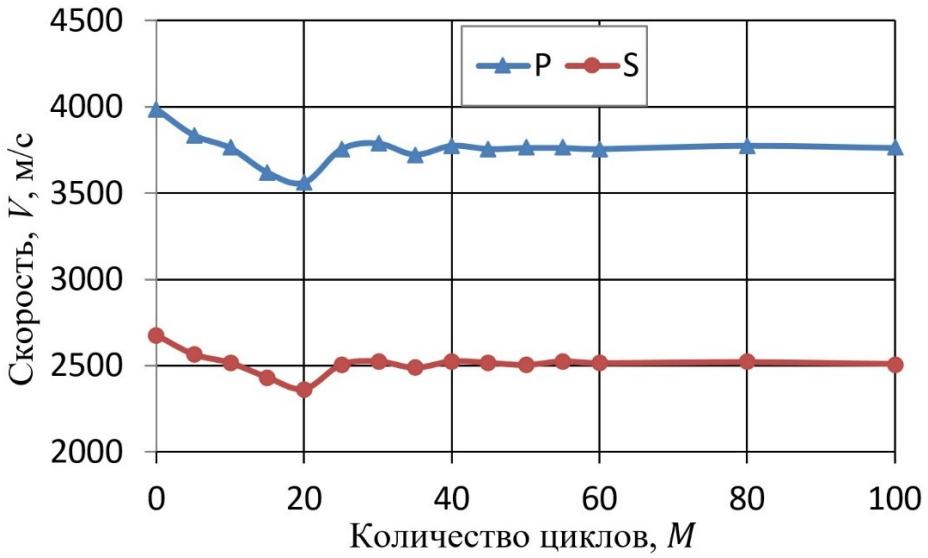


Рисунок 4.7 – Зависимости скоростей *P*- и *S*-волн от количества циклов усталостного нагружения *M*

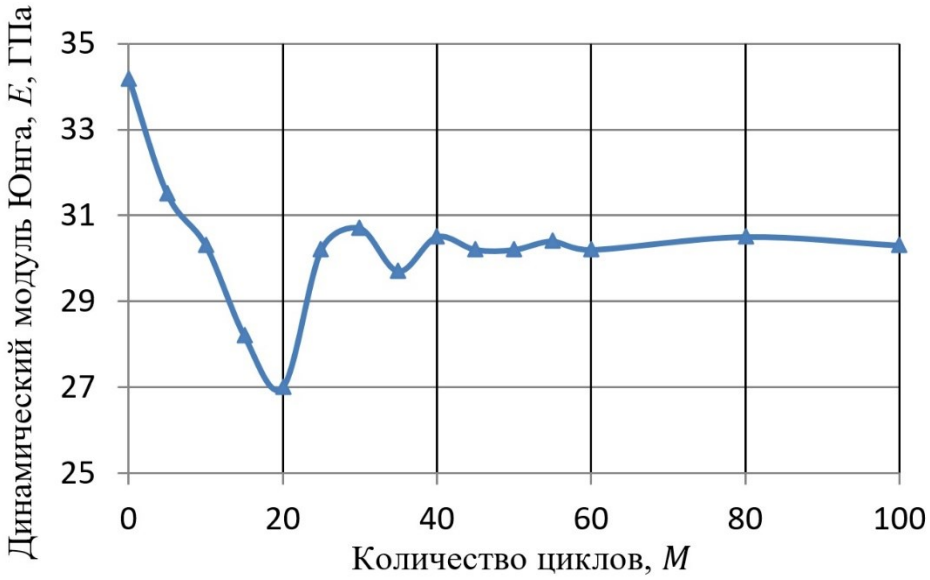


Рисунок 4.8 – Зависимости динамического модуля упругости от количества циклов усталостного нагружения *M*

По сравнению с начальным значением добротности ее минимальные значения составили 90, 92, 86% для относительных максимальных напряжений в цикле γ, равными 40, 60, 80% соответственно.

На рисунке 4.9 представлены результаты измерений предела прочности и соответствующих значений добротности, аппроксимированные логарифмическими зависимостями

$$\sigma_{сж}(Q) = 6{,}9117+4{,}947\cdot\ln(Q),\ R^2 = 0{,}7663 \text{ для } \gamma = 40\%;$$

$$\sigma_{сж}(Q) = 7{,}5144+6{,}7074\cdot\ln(Q),\ R^2 = 0{,}8339 \text{ для } \gamma = 60\%;$$

$$\sigma_{сж}(Q) = -21{,}488+13{,}768\cdot\ln(Q),\ R^2 = 0{,}9253 \text{ для } \gamma = 80\%.$$

Эти зависимости построены по всем экспериментальным точкам снижающейся части графиков $\sigma_{сж}(M)$ трех групп образцов, начиная от $M = 0$ до минимального значения предела прочности. Часть точек, соответствующих возрастающей части графиков $\sigma_r(M)$ не рассматривалась ввиду неоднозначности.

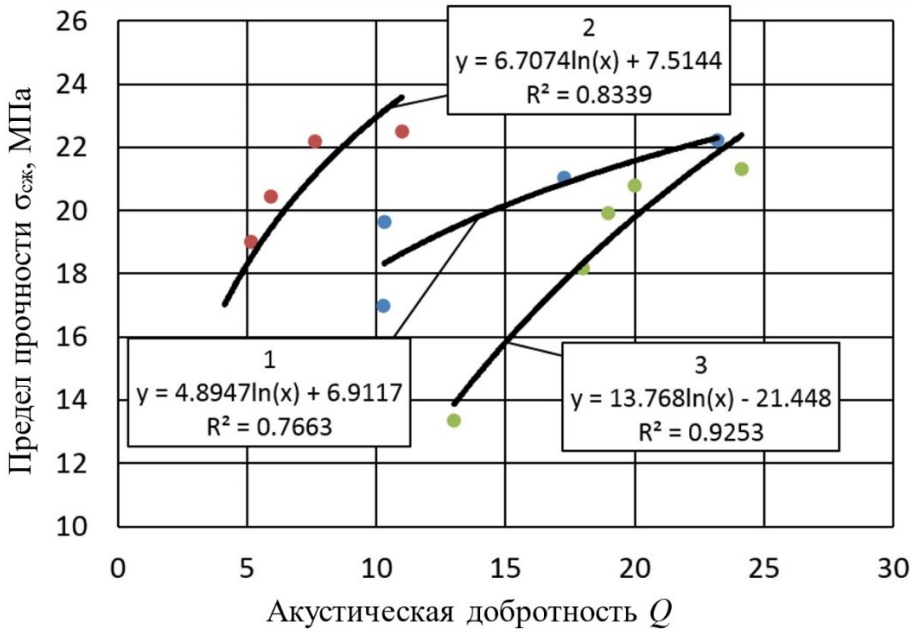


Рисунок 4.9 – Взаимосвязи между прочностью и акустической добротностью при различной максимальной нагрузке в цикле

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

При циклических усталостных испытаниях в отличие от ряда других исследованных пород (известняки, габбро, травертин, гипсосодержащие и другие породы) каменная соль (галит) проявляет ряд особенностей, которые по некоторым проявлениям объединяют ее в одну группу с мрамором.

При увеличении числа усталостных циклов M для каменной соли наблюдается не только снижение предела прочности и акустической добротности, но и их дальнейшее увеличение, т. е. кривые $\sigma_{сж}(M)$ и $Q(M)$ имеют минимумы, наблюдающиеся при различном числе M. При $\gamma = 80$ % минимум отмечен при 15 циклах, при $\gamma = 40$ и 60 % минимум наблюдается при 20 циклах. При числе

циклов более 20 прочность галита возвращается к значениям, близким к первоначальным.

Проанализируем эти проявления по отдельности.

Согласно теории сопротивления материалов [86] данное явление снижения прочности при циклических нагружениях, наблюдаемое для некоторых типов горных пород, может быть отнесено к малоцикловой усталости, для которой в отличие от обычной усталости, наблюдаемой у металлов при упругих деформациях, характерно наличие макропластических деформаций в области разрушения. Такие деформации с образованием и развитием трещин, выходивших на внешнюю поверхность образцов, показаны на рисунках 4.2 и 4.3. Они характерны для горных пород, содержащих природную трещиноватость.

Увеличение предела прочности галита в результате циклических нагружений при количестве циклов $M > 30$ отмечается в результатах работ других исследователей, в частности в [87], что дает основание для подтверждения правильности полученных значений предела прочности образцов. Причиной такого явления может быть пластическое упрочение материала. Таким образом, для каменной соли обнаружено как уменьшение предела прочности при количестве циклов до $M = 15$ для $\gamma = 80$ % и до $M = 20$ для $\gamma = 40$ и 60 %, так и последующее его увеличение при большем количестве циклов нагружения.

Для проверки немонотонного изменения свойств галита на отдельном образце были проведены измерения динамического модуля упругости E в зависимости от количества циклов усталостного нагружения, результаты которых представлены на рисунке 4.8. Они также показали уменьшение E при $M = 20$ и последующее его увеличение при $M > 20$. Т. е. при 20 циклах происходит внутренняя перестройка материала образца, приводящая к уменьшению и последующему увеличению как предела прочности, так и динамического модуля упругости.

В работах [88, 89], описывающих циклические испытания различных типов горных пород, вначале до десятого цикла нагружения отмечается увели-

чение модуля упругости на 25% и затем его резкое снижение в момент разрушения примерно на 30% от начального значения. В данном случае для галита при $M = 20$ также наблюдается уменьшение модуля упругости от 34 до 27 ГПа (т. е. на 20 %), что согласуется с результатами других исследователей. В отличие от других пород для галита, начиная с 20 циклов нагружения и более, отмечено увеличение модуля упругости до 30 ГПа, что согласуется с увеличением предела прочности для этой породы. Согласованность с результатами других исследователей при M от 0 до 20 подтверждает достоверность полученных результатов. Немонотонное изменение предела прочности при увеличении M отмечалось в ранее проведенных исследованиях и для мрамора.

Испытания при трех уровнях нагрузок дает возможность сделать еще один вывод, что при уменьшении максимальной нагрузки в цикле γ предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ также уменьшается. Это следует учесть, в частности, при формировании режима изменения давления в ПХГ. После значительного снижения и циклического изменения давления вокруг малой величины поднимать его следует не сразу, а, производя циклические изменения с постепенным увеличением средней величины до требуемого значения во избежание разрушения соляного массива вокруг емкости из-за снижающейся прочности.

Акустическая добротность Q представляет интерес с точки зрения неразрушающего контроля предела прочности горных пород. При количестве усталостных нагружений до $M = 5$ она демонстрирует резкое уменьшение по сравнению с первоначальным значением и далее в своем минимуме она падает на 90, 92, 86 % для нагрузок с $\gamma = 40$, 60 и 80 % соответственно. Резкое снижение добротности является ранним признаком уменьшения предела прочности породы и является более чувствительным по сравнению со скоростями упругих волн. Заметим также, что минимум добротности наблюдается при большем числе нагружений, чем минимум предела прочности.

Следует также обратить внимание, что при увеличении максимальных относительных напряжений в цикле γ минимумы предела прочности и добротности сдвигаются в сторону меньших значений M, что должно быть учтено при оценке предела прочности по добротности.

Полученные результаты и, в частности, зависимости $\sigma_{сж}(M)$, $Q(M)$ и $\sigma_{сж}(Q)$ могут найти применение для мониторинга массива при создании и эксплуатации подземных хранилищ газа в соляных отложениях, а также при добыче каменной соли подземным способом.

4.3 Результаты испытаний образцов каменной соли при импульсных повторяющихся нагружениях

Для сравнения особенностей поведения каменной соли при медленных циклических нагружениях с длительностью одного цикла 10-30 с были проведены испытания образцов при импульсных кратковременных повторяющихся воздействиях на установке с разрезным стержнем Гопкинсона [90], описание которой, и методика работы приведены в главе 2. Испытания были проведены на образцах каменной соли, описанных в п. 4.2.

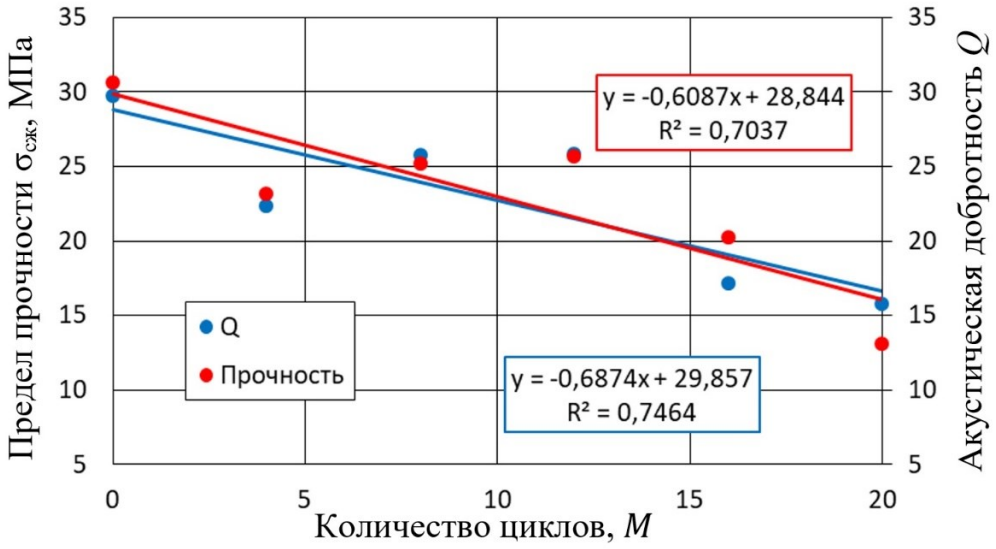


Рисунок 4.10 – Зависимость предела прочности при одноосном сжатии образцов каменной соли от количества циклов ударного воздействия

На рисунках 4.10 и 4.11 представлены зависимости пределов прочности, а также скоростей *P*- и *S*-волн при одноосном сжатии образцов каменной соли в зависимости от количества импульсных повторяющихся воздействий.

На рисунке 4.10 представлены графики изменения предела прочности и акустической добротности о количества циклов импульсных повторяющихся нагружений. Анализируя их стоит отметить тот факт, что, по сравнению с аналогичными зависимостями при медленных циклических нагружениях, восстановления предела прочности и акустической добротности не наблюдается. С увеличением количества циклов наблюдается их монотонное снижение.

Между циклами импульсных повторяющихся нагружений на образцах измерялись скорости прохождениях упругих волн. На рисунке 4.11 представлены графики зависимостей скоростей продольных и поперечных упругих волн от количества циклов импульсных повторяющихся нагружений. Значения скоростей, также, как и предела прочности и акустической добротности монотонно снижаются с увеличением количества нагружений, что свидетельствует о том, что в образцах происходят только процессы деструкции.

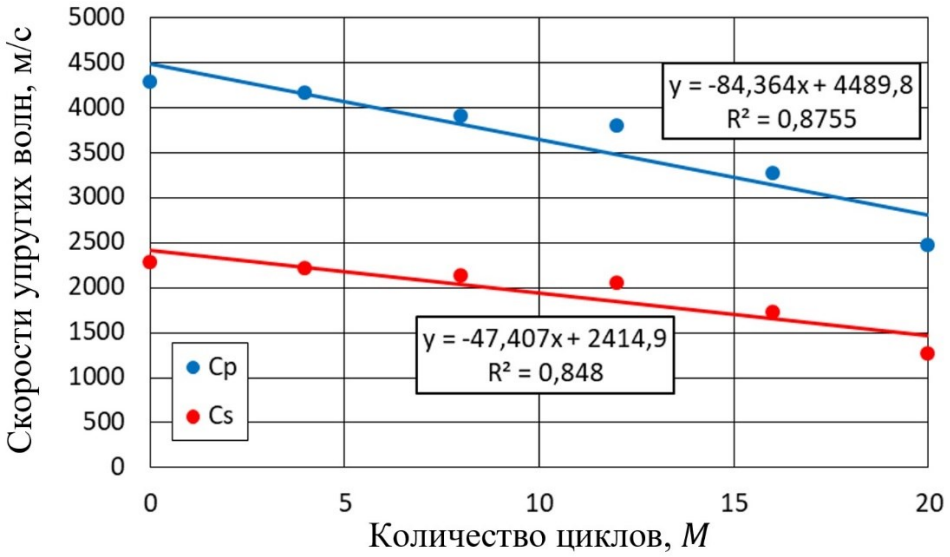


Рисунок 4.11 – Зависимости скоростей *P*- и *S*-волн от количества циклов ударного воздействия

Результатом экспериментов служит взаимосвязь предела прочности и акустической добротности, представленная на рисунке 4.12.

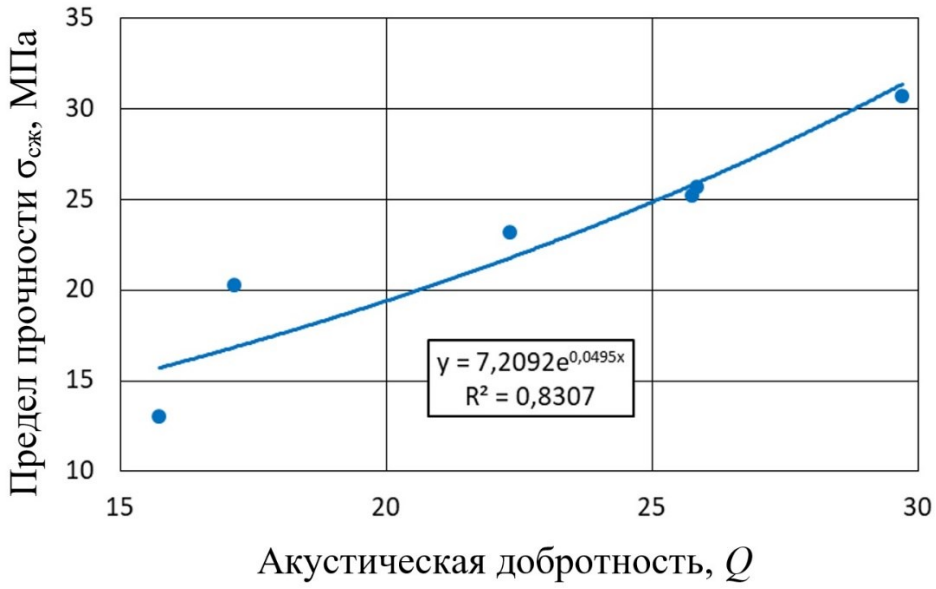


Рисунок 4.12 – Взаимосвязь предела прочности и акустической добротности при импульсных повторяющихся испытаниях образцов каменной соли

Данная зависимость аппроксимируется экспоненциальной функцией вида $\sigma_{сж} = 7{,}2092 \cdot e^{0{,}0495 \cdot Q}$. В сравнении с аналогичными взаимосвязями при медленных циклических нагужениях данная взаимосвязь аппроксимируется экспоненциальной зависимостью, а не логарифмической, что свидетельствует о различном механизме появления дефектов и разрушения. Еще одним доказательством является характер разрушения образцов. При медленных циклических нагружениях наблюдается разрушение по схеме «песочные часы», это говорит о том при данных испытаниях происходит процесс перераспределения напряжений внутри образца. В свою очередь при импульсных повторяющихся испытаниях скорость нагружений высока, что приводит к что напряжения внутри образца не успевают перераспределится и образец разрушатся по образующей.

4.4 Результаты испытаний образцов мраморизованного известняка при медленных циклических нагружениях

На рисунке 4.13 представлены графики изменения добротности и предела прочности образцов мраморизованного известняка месторождения «Перевальное» (Дагестан) при медленных циклических нагружениях [91] в зависимости от количества циклов *M*, при этом минимальное и максимальное значение нагрузки составляло 5 и 60% от предела прочности при сжатии. Проявляется немонотонный характер изменения как прочности, так и добротности.

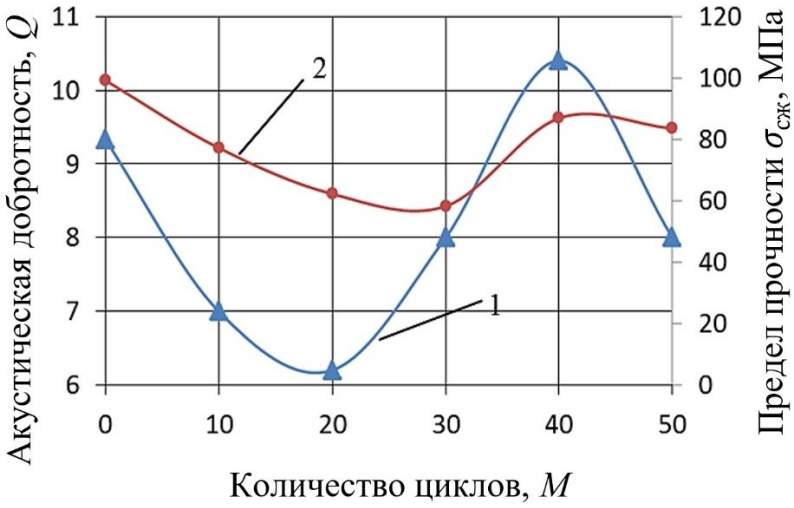


Рисунок 4.13 – Зависимости акустической добротности *Q* (1) и предела прочности (2) при медленных циклических испытаниях образцов мраморизованного известняка

На графиках рисунка 4.13 обращает на себя ряд особенностей изменения предела прочности и акустической добротности при увеличении количества циклов усталостных воздействий. При количестве циклов от 0 до 20 уменьшение акустической добротности происходит быстрее уменьшения предела прочности. Это свидетельствует о высокой чувствительности добротности при прогнозе предела прочности на ранних стадиях накопления повреждений. При количестве циклов от 20 до 40 происходит увеличение акустической добротности и предела прочности. Дальнейшее увеличение циклов нагрузки-разгрузки приводит к уменьшению обеих величин.

После достижения своих минимумов как предел прочности, так и добротность возрастают, т.е. происходит упрочнение, сопровождающееся повышением добротности. Аналогичный эффект наблюдался авторами и при испытании образцов мрамора [92]. Схожие явления упрочнения/разупрочнения наблюдаются в металлах в зависимости от их структурного состояния. Механизмы деформационного упрочнения при усталости связаны с взаимодействием движущихся дислокаций с различного рода препятствиями — с другими дислокациями, границами зерен, растворенными чужеродными атомами. В [93, 94, 95] отмечены три типа характерных кривых циклического упрочнения/разупрочнения.

Монотонное циклическое упрочнение под действием циклической нагрузки, например, наблюдается в нормализованных конструкционных сталях, которые испытываются на усталость при амплитудах, больших макроскопического предела текучести. Монотонное циклическое разупрочнение характерно для высокопрочных и холоднодеформированных металлических материалов при амплитудах напряжения ниже предела текучести.

Первоначальное циклическое разупрочнение и последующее циклическое упрочнение типично для нормализованных конструкционных сталей, если величина приложенной нагрузки не превышает макроскопический предел текучести. Изменение предела прочности, наблюдающееся у мраморизованного известняка, на наш взгляд схоже с третьим случаем. Оно связано с циклической микротекучестью и негомогенным пластическим течением материала.

После достижения максимума при 40 циклах происходит снижение обеих величин.

На рисунке 4.14 показан график зависимости между акустической добротностью и пределом прочности образцов мраморизованного известняка при медленных циклических испытаниях.

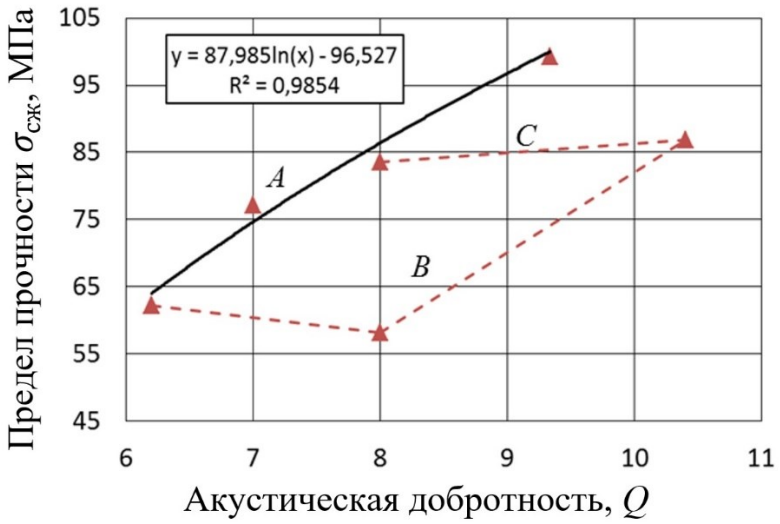


Рисунок 4.14 – Взаимосвязь предела прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ и акустической добротности Q при медленыхциклических испытаниях образцов: A – количество циклов от 0 до 20, B – количество циклов от 20 до 40, C – количество циклов от 40 до 50

Первый участок зависимости соответствует снижению прочности и добротности и аппроксимируется логарифмической функцией вида $\sigma_{сж} = 87{,}99 \cdot \ln(Q) - 96{,}53$.

4.5 Результаты испытаний образцов мраморизованного известняка при импульсных повторяющихся нагружениях

Аналогично описанному ранее в пункте 4.3 были проведены импульсные повторяющиеся испытания образцов мраморизованного известняка. На рисунке 4.15 показаны зависимости акустической добротности и предела прочности от количества импульсных повторяющихся воздействий. В отличие от кривых, представленных на рисунке 4.13, оба графика на рисунке 4.15 демонстрируют уменьшение значений как добротности, так и предела прочности при увеличении количества импульсных повторяющихся нагружений.

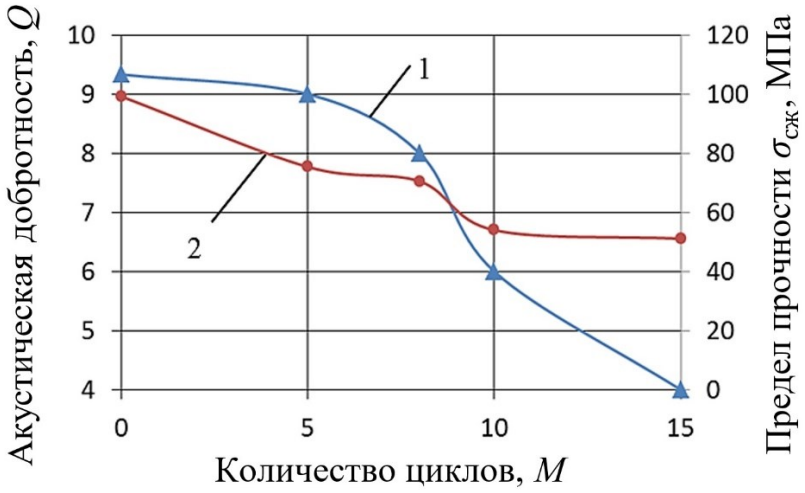


Рисунок 4.15 – Зависимости акустической добротности Q (1) и предела прочности (2) при импульсных повторяющихся испытаниях образцов мраморизованного известняка

Как и при испытаниях образцов каменной соли результатом экспериментов служит взаимосвязь предела прочности и акустической добротности, представленная на рисунке 4.16. По сравнению с аналогичными взаимосвязями при медленных циклических нагружениях данная зависимость аппроксимируется экспоненциальной функцией вида $\sigma = 30{,}56 \cdot e^{0{,}11 \cdot Q}$. Характер разрушения образцов схож с разрушением образцов каменной соли при импульсных нагружениях.

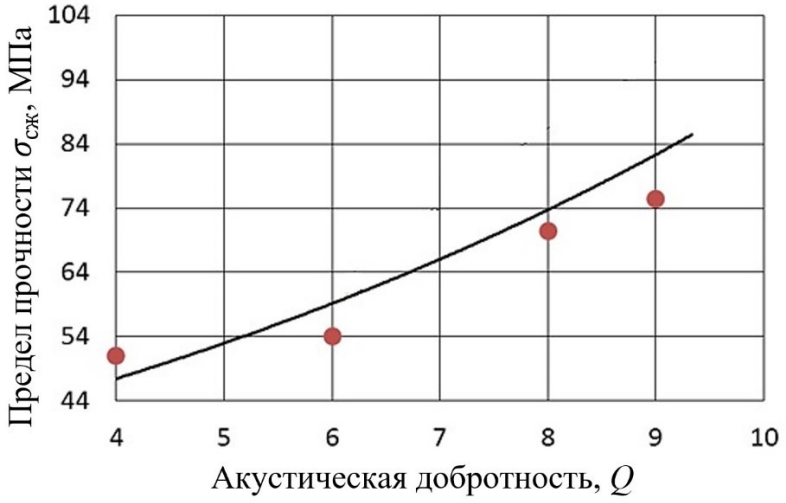


Рисунок 4.16 – Взаимосвязь предела прочности и акустической добротности Q при импульсных повторяющихся испытаниях образцов мраморизованного известняка

При импульсных повторяющихся нагружениях образцов мраморизованного известняка процессов восстановления значений акустических свойств и предела прочности не наблюдается. В отличие от аналогичных взаимосвязей при медленных циклических нагружениях данная взаимосвязь аппроксимируется экспоненциальной функцией вида $\sigma = \mathrm{a0} \cdot e^{\mathrm{a1} \cdot Q}$. В результате разрушения образцов при импульсном повторяющихся воздействии магистральные трещины образуются вдоль линии нагружения, в отличие от квазистатического, когда разрушение происходит по косому сколу.

4.6 Выводы по главе 4

1. При увеличении числа циклов медленных нагружений для образцов каменной соли наблюдалось не только снижение предела прочности и акустической добротности, но и их последующее увеличение, наблюдаемое при различном числе циклов. При относительном максимальном напряжении γ = 80 % от первоначального предела прочности минимум отмечен при 15 циклах, при γ = 40 и 60 % минимум наблюдался при 20 циклах. При числе циклов более 20 предел прочности галита возвращается к значениям, близким к первоначальным. Взаимосвязи между акустической добротностью и пределом прочности на начальных стадиях аппроксимирована логарифмическими зависимостями вида $\sigma(Q) = a_0 + a_1 \cdot \ln(Q)$.

2. При импульсных повтряющихся нагружниях образцов каменной соли процессов восстановления значений акустических свойств и предела прочности не наблюдалось. В сравнении с аналогичными взаимосвязями при медленных циклических нагужениях данная взаимосвязь аппроксимирована экспоненциальной функцией вида $\sigma = a_0 \cdot \exp(a_1 \cdot Q)$.

3. Изменения акустической добротности и предела прочности образцов мраморизованного известняка при медленных циклических механических нагружениях в зависимости от количества циклов схожи с аналогичными зависимостями при испытаниях каменной соли. При увеличении количества

циклов медленных циклических нагружений наблюдается не только снижение предела прочности и акустической добротности, но и их дальнейшее увеличение. Взаимосвязи между акустической добротностью и пределом прочности на начальных стадиях аппроксимируются логарифмическими зависимостями вида $\sigma(Q) = a0+a1 \cdot \ln(Q)$.

4. При импульсных повторяющихся нагружниях образцов мраморизованного известняка процессов восстановления значений акустических свойств и предела прочности не наблюдается. В сравнении с аналогичными взаимосвязями при медленных циклических нагужениях данная взаимосвязь аппроксимируется экспоненциальной функцией вида $\sigma = a0 \cdot e^{a1 \cdot Q}$.

5 Сравнение прочностных и акустических свойств известняка при циклических нагружениях в одном, а также в одном и перпендикулярном направлениях

5.1 Сравнительная оценка степени воздействия на массив горных пород повторяющихся взрывов из одного, а также последовательно из одного, а затем из другого направлений

При горных работах на карьерах или в подземных выработках могут возникать ситуации, когда волновое воздействие взрывов происходит по одному или по нескольким направлениям. В данной главе сравнивается влияние на поврежденность образцов пород одинакового количества взрывных нагружений, проводимых как в одном, так и в двух направлениях.

Рекомендации по выбору режимов одноосного или многоосного нагружений связаны с тем, что в одних случаях необходимо обеспечивать эффективное разрушение пород, например, для дробления при производстве щебня, а в других – сохранение определенных участков массива пород неразрушенными для последующего изготовления строительных блоков или декоративных изделий.

Рассмотрим модель волнового взрывного воздействия на участок в массиве пород взрывов от двух скважин, расположенных от точки измерения в двух перпендикулярных направлениях, как показано на рисунке 5.1.

Рассчитаем сейсмограммы в точке 3, возникающие при взрывах в скважинах, расположенных в точках 1 и 2. По ним рассчитаем энергию двух последовательных взрывов в двух случаях:

1) по сейсмограммам в точке 3 от двух взрывов из точки 1;

2) по сейсмограммам в точке 3 от первого взрыва из точки 1, а второго из точки 2.

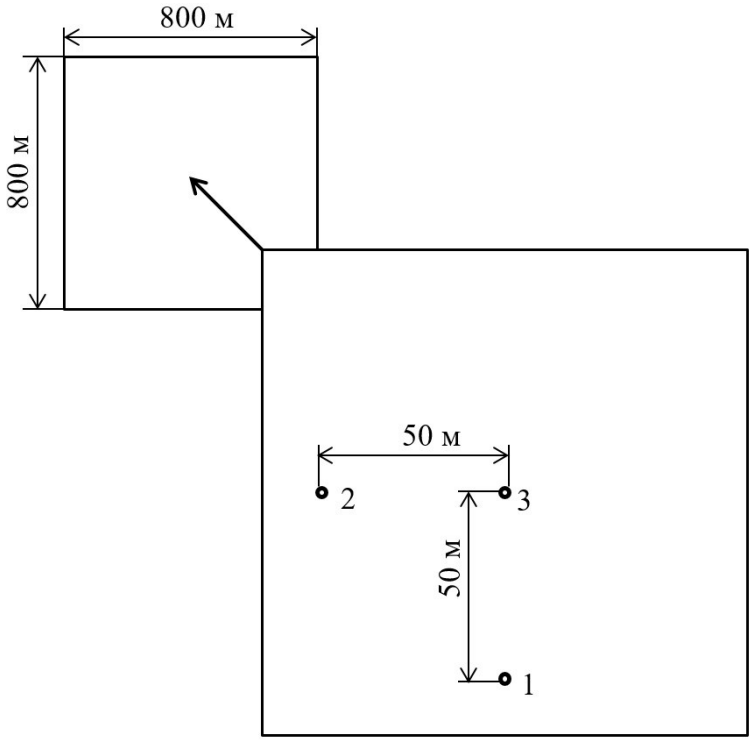


Рисунок 5.1 – Расчетная схема воздействия взрывов из скважин 1 и 2 на участок массива в точке 3; отдельно в увеличенном виде показан участок массива пород со скважинами в центральной части массива

Поскольку поврежденность массива пород, вызванная силовым воздействием, как отмечено в упомянутой выше работе Л.М. Качанова, является тензорной величиной, расчет проведен для составляющей колебательного движения частиц по основному направлению от точки 1 к точке 3. В качестве крите-

рия рассмотрена энергия первой, наиболее активной части сейсмограмм в диапазоне времени от 0 до 20 мс. Для общности рассмотрены их величины, нормированные к энергии компоненты сейсмосигнала, направленной из точки 1 в точку 3 при взрыве в точке 1.

Моделирование осуществлено в среде COMSOL Multiphysics в двумерном режиме. В качестве прототипа взят известняк, усредненные свойства которого следующие: модуль упругости E_a = 20 ГПа; коэффициент Пуассона ν = 0,22; плотность ρ = 2400 кг/м^3; частотный коэффициент затухания волн рэлеевской модели $\beta_{dK} = 1 \cdot 10^{-5}$ с. Масса ВВ в скважине определялась по формуле (5.1)

$$Q = \pi R^2 H \rho_{\text{ВВ}}, \tag{5.1}$$

где Q – масса ВВ; R, H – радиус и глубина скважины, R = 0,1 м, H = 10 м; $\rho_{\text{ВВ}}$ – насыпная плотность ВВ, $\rho_{\text{ВВ}}$ = 1000 кг/м^3.

Давление газа на стенки скважины при взрыве определялось по методике, изложенной в документации к системе COMSOL Multiphysics [96], по формуле (5.2)

$$P(t) = P_0 \exp\left(-\gamma \frac{t}{t_0}\right) \sin\left(\frac{4\pi}{1+\frac{t_0}{t}}\right), \tag{5.2}$$

где $P(t)$, P_0 – текущее и максимальное давление газа на стенки скважины; γ – параметр, γ = 1,86; t_0 – параметр масштаба времени,

$$P_0 = 140 \cdot 10^6 Q^{\frac{2}{3}}, \text{ Н/м}^2,$$

$$t_0 = 0{,}81 \cdot 10^{-3} Q^{\frac{1}{3}}, \text{ с.}$$

Для устранения отражений от краев модели введена функция увеличения затухания при приближении к краям модели в виде (5.3)

$$dam = \beta_{dK}\left(1 + \sqrt{\left(\frac{x}{x_m}\right)^n + \left(\frac{y}{y_m}\right)^n}\right), \tag{5.3}$$

где *dam* – параметр затухания рэлеевской модели с учетом возрастания на краях модели; β_{dK} – частотный коэффициент затухания волн рэлеевской модели; x, y – текущие координаты; x_m, y_m – границы резкого увеличения затухания, $x_m = y_m = 350$ м; n – показатель степени возрастания затухания, $n = 20$.

При задании параметров расчета с использованием метода конечных элементов были учтены требования к соотношению между интервалом дискретизации по времени Δt и шагом дискретизации по пространству h. В расчете использовалась сетка с переменным шагом. В области скважин размеры элементов не превышали 0,15 м, а на пути от скважины до места регистрации не превышали 1-1,5 м.

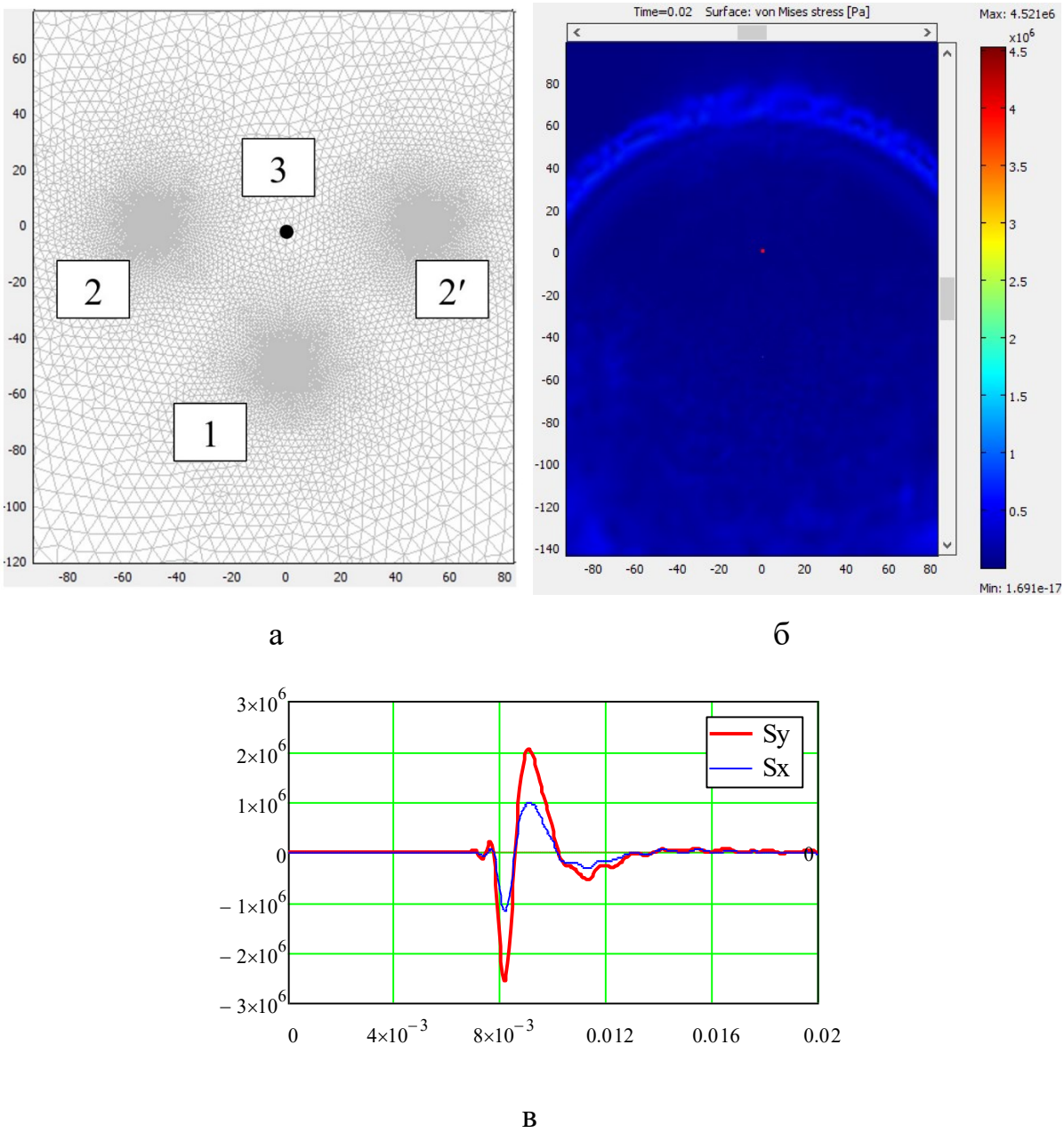
Для обеспечения моделирования, адекватного натурному процессу, необходимо выполнение двух условий. Во-первых, это условие правильной дискретизации непрерывных процессов, согласно которому в пространстве на длине волны должно укладываться не менее 4-6 элементов сетки. При скорости c=4500 м/с и максимальной частоте 400 Гц длина волны 11,25 м, максимально допустимый размер элемента сетки 11,25/6 = 1,875 м. Максимальный размер сетки 1,5 м, что меньше, чем 1,875 м, т.е. указанное условие выполняется. Вторым условием согласно критерию Куранта–Фридрихса–Леви (*CFL*) [97, 98, 99] является соответствие друг другу шагов дискретизации по времени и пространству при решении дифференциальных уравнений численными методами, оцениваемое параметром

$$CFL = c\Delta t / h, \tag{5.4}$$

где *CFL* – параметр соответствия, он не должен превышать 1; c – скорость упругих волн, $c = 4500$ м/с; Δt – шаг дискретизации по времени, $\Delta t = 50$ мкс; h – максимальный размер элемента сетки, $h = 1{,}5$ м. В нашем случае $CFL = 0{,}15$, т.е. шаг дискретизации по времени меньше, чем минимально необходимый. Это допустимо, при этом модельные сейсмограммы будут изображены даже более подробно, чем требуется.

На рисунке 5.2 представлены расчетная сетка, результаты моделирования распространения взрывной волны в плане, а также формы, составляющих

сигнала волн напряжений вдоль (S_y) и поперек (S_x) направления распространения волны. На рисунке 5.2, *а* показаны также скважина 1, волна из которой распространяется вдоль оси *y*, скважины 2 и 2′, волны из которых распространяются вдоль оси *x*. Кроме того, цифрой 3 здесь отмечена точка с координатами (0,0), в которой оцениваются напряжения, вызванные взрывными волнами.



а б

в

Рисунок 5.2. – Расчетная сетка в центральной части модели (а), результаты моделирования взрывной волны в единицах напряжений по Мизесу (б) и сейсмограммы напряжений вдоль (S_y) и поперек (S_x) направления действия волны в точке с координатами (0,0)

Проведем предварительную энергетическую оценку сейсмических воздействий сейсмоволн одного и двух направлений на участок массива с координатами (0,0). Как следует из приведенных сейсмограмм, амплитуда волны S_y равна 2,55 МПа и она больше амплитуды волны S_x, равной 1,17 МПа. Но даже от одного взрыва участок массива подвергается колебательному воздействию. Поэтому правильнее оценить энергии таких воздействий. Для расчета была взята первая часть сигнала от 0 до 20 мс, после которой амплитуда сигнала уменьшалась в значительной степени. Энергия аналогового сигнала за время T, рассчитывалась по формуле (5.5) [100]

$$E = \int_0^T x(t)^2 \, dt, \tag{5.5}$$

где E – энергия сигнала; $x(t)$ – функция, описывающая значения сигнала в момент времени t.

Энергия сигнала, записанного в цифровой форме, рассчитывалась по формуле (5.6)

$$E = \sum_{i=0}^{N-1} x_i^2 \Delta t, \tag{5.6}$$

где E – энергия сигнала; x_i – отсчеты сигнала; N – количество отсчетов; Δt – интервал дискретизации по времени.

В нашем случае оценена суммарная энергия сигналов от двух воздействий в относительных единицах. Для расчета была взята часть сигнала от 0 до 20 мс, после которой амплитуда сигнала уменьшалась. Воздействия в одном направлении вдоль координаты y обозначим как $\eta_{yy} = E_{yy}/E_{yy} = 1$, а в двух направлениях как $\eta_{yx} = E_{yx}/E_{yy}$. Здесь $E_{yy} = E_y + E_y$ энергия двух взрывов с одной стороны из точки 1, $E_{yx} = E_y + E_x$ – энергия двух взрывов с двух сторон из точек 1 и 2 или 2′. Расчеты дают значение $\eta_{yx} = 0{,}618$, т. е. при воздействии двух взрывов с двух сторон энергия воздействия меньше, чем при воздействии двух взрывов с одной стороны. Поэтому можно ожидать, что поврежденность массива, оцениваемая по одному направлению, будет меньше при двухсторон-

нем воздействии, чем при одностороннем при одинаковом их количестве. Такие расчеты являются оценочными, поэтому были проведены эксперименты на образцах пород по циклическому воздействию нагрузок в одном и двух направлениях при одинаковом количестве воздействий.

Следует отметить, что размер образца в данном случае значительно меньше, чем длина волны от взрыва в натурных условиях. Поэтому представляется возможным для оценки взрывного или другого аналогичного динамического воздействия проведение испытаний образцов при медленных циклических одно- и двухосных нагружениях, результаты которых отражены ниже [101].

5.2 Образцы, используемые при сравнительных нагружениях в одном, а также в одном, а затем в другом направлениях, и режимы их испытаний

Для исследований были взяты пары образцов известняка Касимовского месторождения (Рязанская область, Россия). Предварительно были испытаны при сжатии до разрушения 5 образцов для определения среднего предела прочности. Для циклических испытаний из каждого образца размером 50×50×50 мм изготавливалась одна пара образцов размерами 25×50×50 мм. Для исследования выбирались образцы по близости скоростей упругих волн, разница между которыми не превышала 2%. Перечень испытанных образцов представлен в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Перечень испытанных образцов

M	Одноосное нагружение	Двухосное нагружение
50	LM3-11-1-50	LM3-11-2-50
75	LM3-12-1-76	LM3-12-2-76
100	LM3-9-1-100	LM3-9-2-100
125	LM3-7-1-126	LM3-7-2-126
150	LM3-17-1-150	LM3-17-2-126

Так, например, образцы LM3-11-1-50 и LM3-11-2-50 были испытаны при одноосном и двухосном последовательном циклическом нагружении, соответственно, при общем количестве циклов нагружения 50. Для образца LM3-11-1-50 испытание состояло из одной серии 50 циклов нагрузки/разгрузки. Испытание образца LM3-11-2-50 состояло из двух серий по 25 нагрузочных циклов в одном направлении и 25 циклов в перпендикулярном.

Минимальная нагрузка в цикле была равна 2 МПа (около 10% от предела прочности). Максимальная нагрузка для образцов была выбрана равной 10 МПа (50% от предела прочности).

Во время серии циклических нагружений регистрировались осевые нагрузки и деформации образца в направлении первых нагружений, а также активность АЭ (число импульсов за секунду).

Активность АЭ пересчитывалась в число импульсов АЭ (суммарное число импульсов с начала эксперимента). Перед началом испытаний и после каждой полной серии циклических нагружений измерялись акустическая добротность и скорости продольных и поперечных упругих волн.

Методика проведения экспериментов включала в себя:

– предварительные измерения акустической добротности и скоростей продольных и поперечных упругих волн всех пар образцов;

– определение среднего значения предела прочности при сжатии на 5 образцах известняка;

– испытания пар образцов сериями по $M = 50, 76, 100, 126$ и 150 циклов при нагружении по одному направлению и по $M/2$ циклов по двум направлениям с максимальной нагрузкой в цикле равной 10 МПа (65% от предела прочности) и минимальной, равной 2 МПа (10% от предела прочности); при этом во время серий циклических нагружений регистрировались осевые нагрузки и деформации образцов, а также активность акустической эмиссии, которая затем пересчитывалась в количество импульсов АЭ;

– измерение акустической добротности и скоростей продольных и поперечных упругих волн после каждой полной серии циклических нагружений;

– определение значений предела прочности после серии циклических нагружений путем увеличения нагрузки на образец до его разрушения.

5.3 Влияние последовательных циклических нагружений в одном, а также в одном, а затем в перпендикулярном направлениях на прочностные и акустические свойства образцов известняка

В лабораторных экспериментах прочностные свойства и поврежденность по определенным направлениям оценивались по пределу прочности при одноосном сжатии и скоростям упругих волн, а общая (эффективная) поврежденность – по параметрам акустической эмиссии и акустической добротности. Всего было испытано 5 пар образцов, каждая из которых соответствовала определенному числу циклов усталостных нагружений.

Результаты измерения акустических свойств представлены на рисунках 5.3–5.6. Эти измерения производились для каждой пары образцов первый раз до испытаний, и затем после каждой серии нагружений. После этого образцы разрушались для измерения предела прочности при одноосном сжатии.

На рисунке 5.3 представлены результаты измерения продольных скоростей ультразвуковых волн C_{ij} в зависимости от количества циклов нагружения M. Первая цифра индекса обозначает направление нагружения. Цифра 1 означает то, что все M циклов нагрузки/разгрузки были произведены в одном направлении, а цифра 2 – что $M/2$ нагружений были произведены в одном (условно первом) направлении, и такое же количество – в перпендикулярном. Вторая цифра индекса обозначает направление измерения информативного параметра. Цифра 1 обозначала то, что измерения производились в направлении первого нагружения, а цифра 2 – в перпендикулярном направлении.

Например:

C_{p11} означает скорость продольных волн при нагружениях в одном направлении, измеренную в направлении этого нагружения;

C_{p12} означает скорость продольных волн при нагружениях в одном направлении, измеренную в направлении, перпендикулярном нагружению;

C_{p21} означает скорость продольных волн при нагружениях в двух направлениях, измеренную в направлении первого нагружения;

C_{p22} означает скорость продольных волн при нагружениях в двух направлениях, измеренную в направлении второго нагружения.

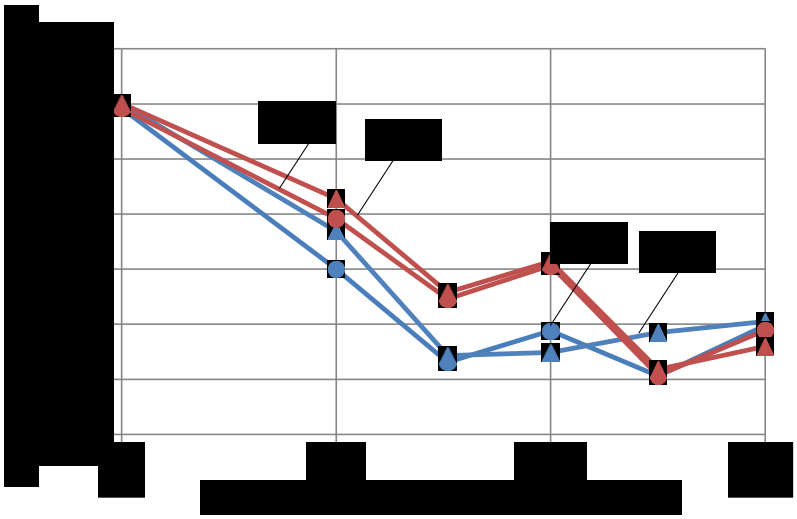


Рисунок 5.3 – Графики зависимостей скоростей продольных волн C_p от количества циклов M

На рисунке 5.4 показаны результаты измерения скоростей поперечных упругих волн C_{s11}, C_{s12}, C_{s21}, C_{s22}. Плоскость поляризации поперечных волн параллельна плоскости наибольшей стороны образца.

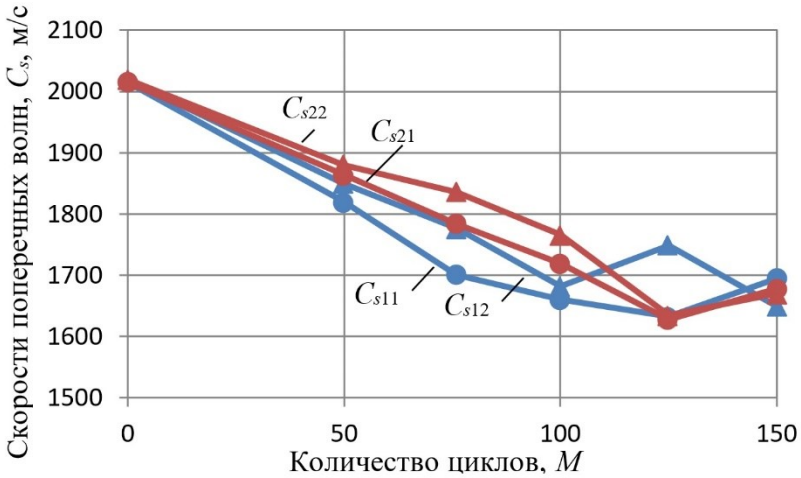


Рисунок 5.4 – Результаты измерения скоростей поперечных упругих волн C_s от количества циклов M

Скорости упругих волн демонстрируют постепенное снижение при увеличении M. При этом значения скоростей при нагружении в двух направлениях, как правило, больше, чем скоростей, измеренных при воздействии в одном.

Большие значения скоростей упругих волн при двухосных нагружениях свидетельствуют о меньшей поврежденности в направлении измерения по сравнению с одноосными нагружениями.

На рисунке 5.5 представлены аналогичные графики изменения акустических добротностей Q_1 и Q_2. Измерения добротностей производились только в одном направлении первого нагружения. При увеличении M они также, как и скорости, уменьшаются. При 150 циклах это уменьшение составляет 1,8 раз для Q_1 и 1,4 раза для Q_2. При количестве циклов до M<150 Q_2<Q_1, что свидетельствует о большей эффективной поврежденности образцов при двухосных нагружениях, чем при одноосных.

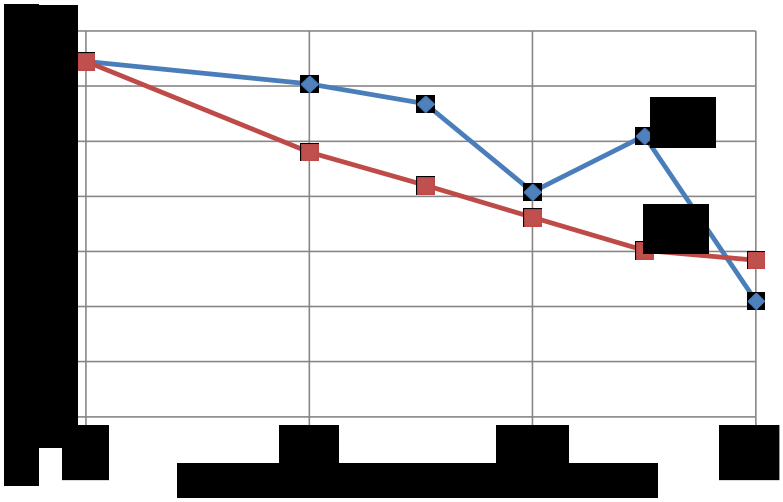


Рисунок 5.5 – Графики акустических добротностей при одноосном (Q_1) и двухосном (Q_2) нагружениях от количества циклов M

На рисунке 5.6 представлены графики изменения предела прочности при одноосном нагружении. Наибольшие изменения предела прочности наблюда-

лись на первом участке от начала до 50 циклов. Следует отметить, что прочность при одноосном сжатии, определенная после двухосного циклического нагружения, была больше, чем после одноосного нагружения.

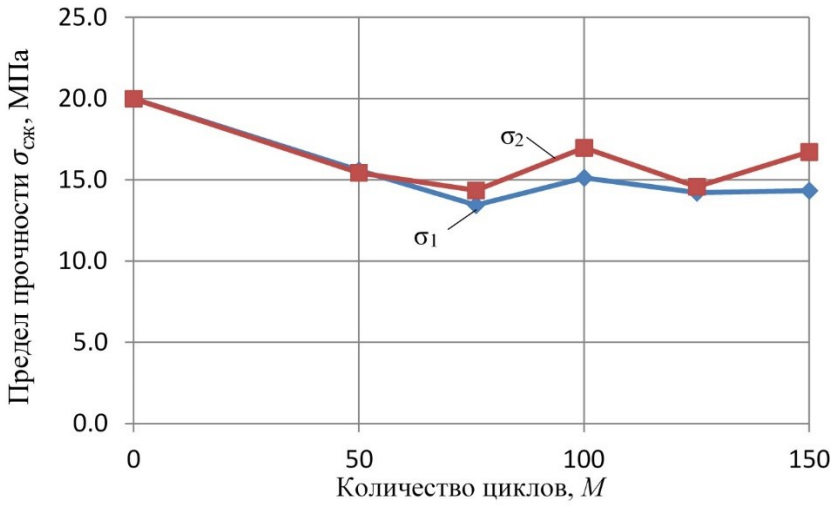


Рисунок 5.6 – Результаты измерения предела прочности образцов после циклических нагружений в одном ($\sigma_{сж1}$) и в двух ($\sigma_{сж2}$) направлениях в зависимости от количества циклов M

На рисунке 5.7 представлены графики изменения динамических модулей упругости E_{din} после одно- и двухосных циклических нагружений.

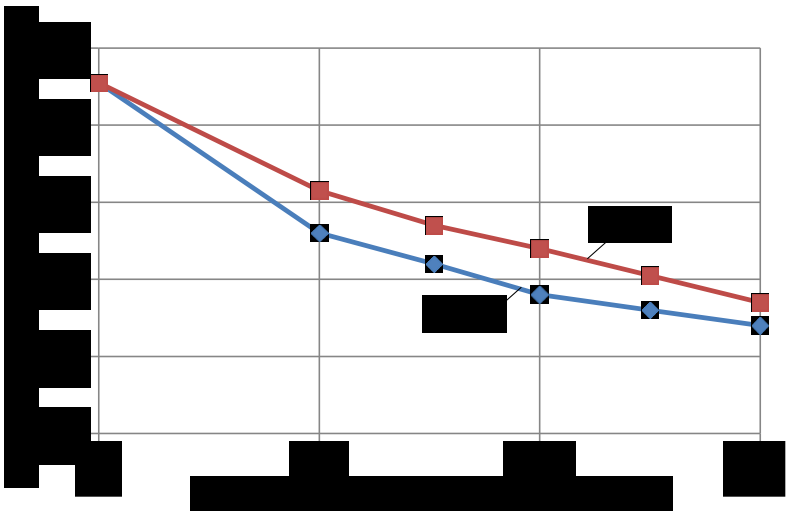


Рисунок 5.7 – Результаты измерения динамического модуля упругости образцов после циклических нагружений в одном (E_{din1}) и в двух (E_{din2}) направлениях в зависимости от количества циклов M

Динамические модули также уменьшались с увеличением M, при этом динамический модуль после двухосных нагружений E_{din2} оставался больше, чем E_{din1} после одноосных нагружений.

На рисунке 5.8 для примера показаны графики изменения нагрузки (а) и продольной деформации (б) совместно с числом импульсов акустической эмиссии образца LM3-11-1-50 от начала испытания. Число импульсов АЭ N_Σ показывало значительный рост на первых 2–3 циклах, затем скорость нарастания N_Σ существенно уменьшалась.

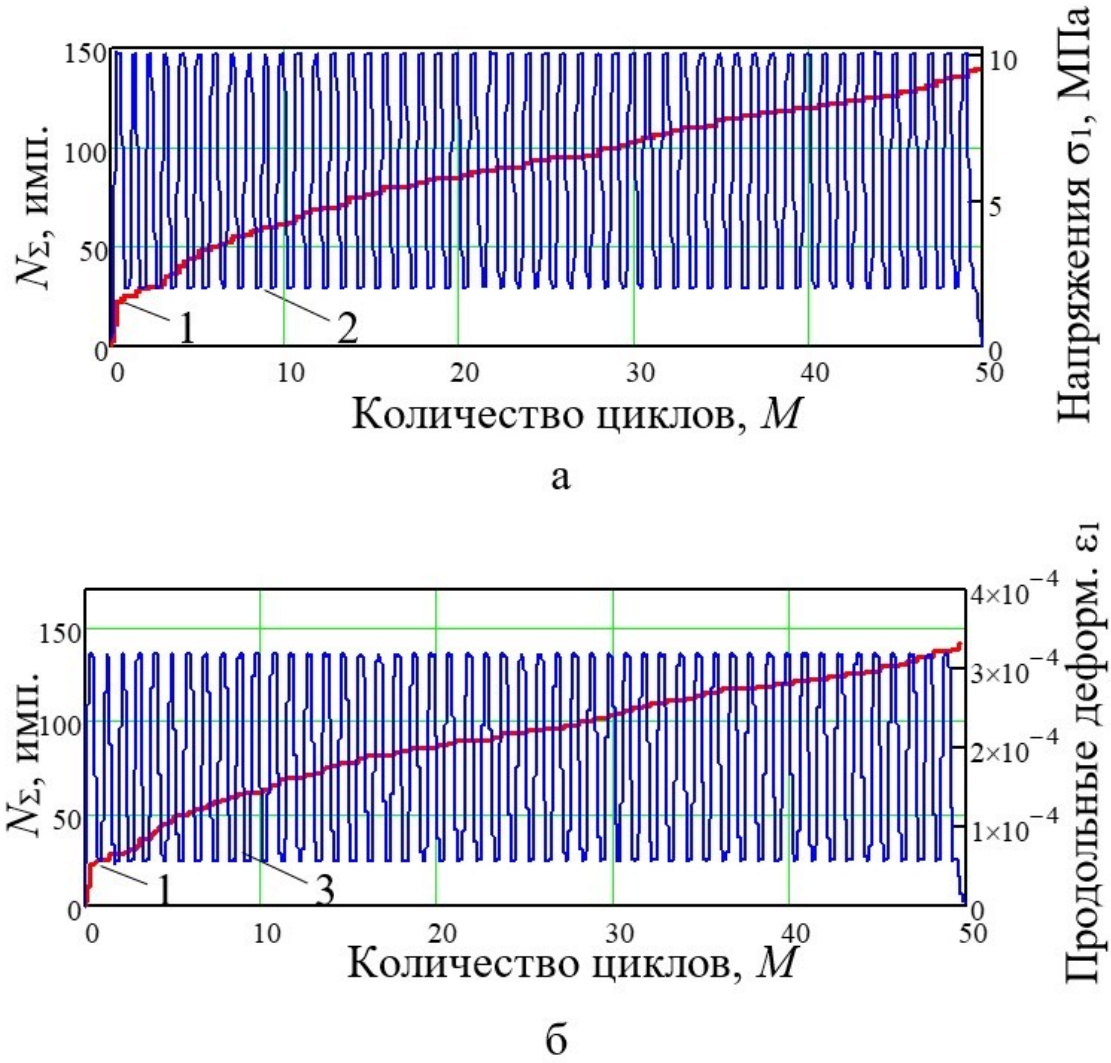


Рисунок 5.8 – Графики зависимостей числа импульсов АЭ N_Σ (кривая 1, рис. а) и напряжений σ_1 (кривая 2, рис. а), а также числа импульсов АЭ N_Σ (кривая 1, рис. б) и продольных деформаций ε_1 (кривая 3, рис. б) образца известняка LM3-11-1-50

Такой параметр, как число импульсов акустической эмиссии N_Σ, значительно возрастает на первых 2-3 циклах, а затем идет более медленное его увеличение при относительно низкой скорости 1–3 имп./цикл и ее возрастания не отмечается. Т. е. процесс деструкции образца и накопления пластических деформаций при данном уровне максимальной нагрузки происходит сравнительно медленно, а деформирование образцов в основном происходит в упругой области. Усталость материала, при которой усталостное повреждение или разрушение происходит в основном при упругом деформировании, относится к многоцикловой усталости [102].

В таблице 5.2 приведены суммарные значения числа импульсов акустической эмиссии, накопленной всеми образцами при испытаниях. Поскольку их количество характеризует степень эффективной (общей) поврежденности, можно сделать вывод, что при двухосных нагружениях, для которых $N_\Sigma = 5984$, эффективная поврежденность больше, чем для одноосных при $N_\Sigma = 4690$.

Таблица 5.2 – Количество импульсов АЭ, накопленное образцами при испытаниях, и их суммарные значения

M	Нагружение в одном направлении		Нагружение в двух направлениях			
	Образец	N_Σ	Образец	$N_{\Sigma1}$	$N_{\Sigma2}$	N_Σ
50	LM3-11-1-50	140	LM3-11-2-50	312	936	1248
75	LM3-12-1-76	1749	LM3-12-2-76	1244	1206	2450
100	LM3-9-1-100	933	LM3-9-2-100	498	532	1030
125	LM3-7-1-126	1253	LM3-7-2-126	420	447	867
150	LM3-17-1-150	615	LM3-17-2-126	194	195	389
	Всего	**4690**	Всего	**2668**	**3316**	**5984**

Приведенные результаты говорят о том, что изменение прочностных и акустических свойств образца известняка различно при воздействии на него $2M$ циклов одноосного механического нагружения и воздействии M циклов сначала в одном, а затем M циклов во втором, перпендикулярном первому, направлении. При этом в условиях нагружения в двух перпендикулярных направлениях по сравнению с нагружением в одном направлении предел прочности при сжатии, скорости распространения упругих волн и число импульсов акустической эмиссии больше, а акустическая добротность меньше, что подтверждает *третье научное положение*.

5.4 Выводы по главе 5

1. Анализ показал, что при горных работах на карьерах или в подземных выработках циклическое волновое воздействие взрывов на массив пород может происходить по одному или по нескольким направлениям. Повторяющиеся воздействия от серии взрывов даже меньше предела прочности могут привести к увеличению поврежденности и снижению прочности массива пород. Показано, что суммарная энергия динамических воздействий от двух взрывов с разных направлений меньше суммарной энергии от двух взрывов, осуществленных по одному и тому же направлению.

2. При одинаковом числе циклических нагружений нагружение по одному и затем по другому, перпендикулярному направлению приводит к меньшему снижению предела прочности, чем нагружения в одном направлении. При нагружении по одному, а затем по другому направлению, трещины образуются в двух направлениях, а на предел прочности при одноосном сжатии влияют трещины только одного направления. Кроме того, трещины, ориентированные в одном направлении, препятствуют прорастанию трещин в другом направлении, что приводит к сохранению большей прочности при периодических усталостных силовых воздействиях в двух направлениях.

3. Скорости продольных и поперечных упругих волн отражают поврежденность материала в одном направлении. После нагружений в одном, а затем в другом направлениях, они демонстрируют б*о*льшие значения и меньшую поврежденность при прозвучивании в каждом направлении, чем при нагружении в одном направлении.

4. Акустическая добротность образцов известняка характеризует эффективную (общую) поврежденность образцов. Показано, что акустическая добротность после нагружений в одном, а затем в другом направлении ниже, чем после нагружений только в одном направлении, что говорит о большей эффективной (суммарной) поврежденности при циклических нагружениях в двух направлениях, чем при нагружении в одном.

5. Суммарное количество импульсов акустической эмиссии в случае циклических нагружений в одном, а затем в другом, перпендикулярном направлении больше, чем в случае нагружений только в одном, что говорит о большей эффективной поврежденности образцов в первом случае, что обусловлено трещинами, ориентированными в нескольких направлениях.

6. По результатам последовательных серий циклических нагружений и акустических измерений можно сделать общий вывод, что изменение прочностных и акустических свойств образца известняка различно при воздействии на образец $2M$ циклов одноосного механического нагружения и воздействии M циклов сначала в одном, а затем M циклов во втором, перпендикулярном первому, направлении. При этом в условиях нагружения в двух перпендикулярных направлениях по сравнению с нагружением в одном направлении предел прочности при сжатии, скорости распространения упругих волн и число импульсов акустической эмиссии больше, а акустическая добротность меньше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержится решение актуальной научной задачи установления закономерностей изменения прочностных и акустических свойств осадочных горных пород при различных схемах и режимах циклических механических нагружений для создания новых способов неразрушающего контроля прочностных свойств горных пород, что имеет значение для информационного обеспечения горного производства, повышения его безопасности и эффективности.

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

1. Показана актуальность исследования взаимосвязей прочностных и акустических свойств при повторяющихся или циклических механических нагружениях при сжатии, растяжении и изгибе для разработки новых методов неразрушающего контроля массива пород вокруг выработок ввиду присутствия таких нагружений в породных массивах на карьерах и вокруг подземных выработок при различных техногенных воздействиях, вокруг подземных хранилищ углеводородов, тоннелей, на горных предприятиях в областях повышенной сейсмичности и на других объектах горного производства.

2. Разработан лабораторный исследовательский комплекс, состоящий из двух установок для нагружения и позволяющий проводить испытания образцов горных пород в широком диапазоне скоростей циклических и повторяющихся нагружений. Одна установка позволяет проводить испытания с регистрацией механических и акустических информативных параметров при медленных нагружениях с длительностями каждого цикла от нескольких единиц до нескольких десятков и более секунд, а другая – при импульсных динамических нагружениях с длительностями каждого цикла от единиц до нескольких десятков и более миллисекунд

3. Установлены закономерности изменения прочностных и акустических свойств пород сложной текстуры доломит–гипс при их циклических механических нагружениях при изгибе. Скорости упругих волн уменьшались, а акустическая добротность возрастала при увеличении количества усталостных циклов. Непосредственно перед разрушением добротность Q резко снижалась, что связано с разрушением компонентов породы. Моделирование методом конечных элементов подтвердило гипотезу, что увеличение добротности при увеличении поврежденности связано с ослаблением прочности контактов на границах между высокодобротным доломитом и низкодобротным гипсом.

4. Установлены закономерности изменения прочностных и акустических свойств каменной соли и мраморизованного известняка при циклических нагружениях при одноосном сжатии. При увеличении числа циклов медленных нагружений для образцов обеих пород наблюдалось не только снижение предела прочности и акустической добротности, но и их последующее увеличение. При импульсных повторяющихся нагружениях образцов каменной соли процессов восстановления значений акустических свойств и предела прочности не наблюдалось.

5. Изменение прочностных и акустических свойств образца известняка различно при воздействии на него $2M$ циклов одноосного механического нагружения и воздействии M циклов сначала в одном, а затем M циклов во втором, перпендикулярном первому, направлении. При этом в условиях нагружения в двух перпендикулярных направлениях по сравнению с нагружением в одном направлении предел прочности при сжатии, скорости распространения упругих волн и число импульсов акустической эмиссии больше, а акустическая добротность меньше, что объясняется повышенной чувствительностью прочности и скоростей упругих волн к поврежденности одного направления, а добротности и числа импульсов акустической эмиссии – к эффективной (общей) поврежденности.

6. Разработаны «Методические рекомендации по исследованию прочностных и акустических свойств горных пород на образцах при различных

схемах и режимах циклических механических нагружений», переданные в ООО «Газпром геотехнологии» для практического использования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Mets Y.S. Study of blasting fatigue in rocks // Soviet Mining Science – 1983. – Vol. 19. P.37–42. doi:10.1007/BF02497962.

2 Мец Ю.С. Исследование влияния взрывных нагрузок различной интенсивности на сопротивляемость механическому разрушению крепких магнетитовых кварцитов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.– 1982.– № 3.– с. 58 61.

3 Zhi Yu, Xiuzhi Shi, Jian Zhou, Xin Chen, Xianyang Qiu Effective Assessment of Blast-Induced Ground Vibration Using an Optimized Random Forest Model Based on a Harris Hawks Optimization Algorithm // Applied Sciences – 2020. – Vol. 10, Iss. 4. P. 1403. https://doi.org/10.3390/app10041403.

4 Мазуров В.А. Подземные газонефтехранилища в отложениях каменной соли.– М.: Недра, 1982.– 212 с.

5 Labaune P., Rouabhi A. Dilatancy and tensile criteria for salt cavern design in the context of cyclic loading for energy storage // Journal of Natural Gas Science and Engineering – 2019. – Vol. 62. P. 314–329. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.10.010.

6 Ma L.-J., Liu X.-Y., Wang M.-Y., Xu H.-F., Hua R.-P., Fan P.-X., Jiang Sh.-R, Wang G.-A., Yi Q.-K. Experimental investigation of the mechanical properties of rock salt under triaxial cyclic loading // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.– 2013.– Vol. 62.– P. 34 – 41. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.04.003.

7 Guo Yi., Yang Ch., Mao H. Mechanical properties of Jintan mine rock salt under complex stress paths // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences – 2012. – Vol. 56. P. 54 – 61. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.07.025.

8 Калиниченко И.В., Тавостин М.Н. О деформируемости песчано-алевритовых пород-коллекторов при циклической эксплуатации подземных хранилищ газа // Сергеевские чтения. Международный год планеты земля: задачи

геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии / Москва, (20-21 марта 2008 г).– 2008. – с.41–45.

9 Kun Guo, Hailong Li, Zhixin Yu In-situ heavy and extra-heavy oil recovery: A review // Fuel.– 2016. – Vol. 185. P. 886–902. http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.047.

10 Dong X., Liu H., Chen Z., Wu K., Lu N., Zhang Q. Enhanced oil recovery techniques for heavy oil and oilsands reservoirs after steam injection // Applied Energy. – 2019. – Vol. 239. P. 1190–1211. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.244.

11 Зайнагабдинов Д.А., Быкова Н.М. Транспортные тоннели и геодинамика горных массивов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» – 2014.– Выпуск 5 (24). Доступ: http://naukovedenie.ru/PDF/13KO514.pdf.

12 Zimmermann G., Zang A., Stephansson O., Klee G., Semiková H. Permeability Enhancement and Fracture Development of Hydraulic In Situ Experiments in the Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden // Rock Mechanics and Rock Engineering – 2019. – Vol. 52. P. 495–515. https://doi.org/10.1007/s00603-018-1499-9.

13 Yang D., Zhang D., Niu S., Dang Y., Feng W., Ge S. Experiment and Study on Mechanical Property of Sandstone Post-peak Under the Cyclic Loading and Unloading // Geotechnical and Geological Engineering – 2018. – Vol. 36. P. 1609 – 1620. https://doi.org/10.1007/s10706-017-0414-6.

14 ГОСТ ИСО 10816–3–2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 мин$^{-1}$.

15 Ивановский И.Г. Шахтные вентиляторы.– Издательство ДВГТУ, 2003.– 191 с.

16 Papuga J. A survey on evaluating the fatigue limit under multiaxial loading // International Journal of Fatigue – 2011. – Vol. 33. P. 153 – 165. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2010.08.001.

17 Nordby G.N. Fatigue of concrete. Review of research.– J. Amer. Concr. Inst. Proc. – 1958. Vol. 30, Iss. 2. P. 191 – 219.

18 Миндели Э.О., М.П. Мохначев Методика определения прочностных и деформационных свойств горных пород при статических многократных и динамических пульсирующих нагрузках.– М.: Ротапринтный цех Института горного дела им. А.А. Скочинского, 1970.– 17 с.

19 Roberts L.A., Buchholz S.A., Mellegard K.D., Düsterloh U. Cyclic Loading Effects on the Creep and Dilation of Salt Rock // Rock Mechanics and Rock Engineering – 2015. – Vol.48, Iss. 6. P.2581–2590. https://doi.org/10.1007/s00603-015-0845-4.

20 Jinyang Fan,Deyi Jiang, Wei Liu, Fei Wu, Jie Chena, JJk Daemen Discontinuous fatigue of salt rock with low-stress intervals // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences – 2019. – Vol. 115. P.77–86. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.01.013.

21 Min Zhang, Linming Dou, Heinz Konietzky, Zhengyang Song, Shan Huang Cyclic fatigue characteristics of strong burst-prone coal: Experimental insights from energy dissipation, hysteresis and micro-seismicity // International Journal of Fatigue – 2020. – Vol. 133. P. 105429. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105429.

22 Chongfeng Chen, Tao Xu, Michael J. Heap, Patrick Baud Influence of unloading and loading stress cycles on the creep behavior of Darley Dale Sandstone // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences – 2018. – Vol. 112. P. 55 – 63. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.09.002.

23 Momeni A., Karakus M., Khanlari G.R., Heidari M. Effects of cyclic loaing on the mechanical properties of a granite // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences – 2015. – Vol. 77. P. 89 – 96. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.03.029.

24 Cerfontaine B., Collin F. Cyclic and Fatigue Behaviour of Rock Materials: Review, Interpretation and Research Perspectives // Rock Mechanics and Rock

Engineering – 2018.– Vol. 51. P. 391 – 414. https://doi.org/10.1007/s00603-017-1337-5.

25 Venkatesh N., Heeralal M., Pillai RJ. Resilient and permanent deformation behaviour of clayey subgrade soil subjected to repeated load triaxial tests // European Journal of Environmental and Civil Engineering – 2018.

26 Kang Peng, Jiaqi Zhou, Quanle Zou, Xiao Song Effect of loading frequency on the deformation behaviours of sandstonessubjected to cyclic loads and its underlying mechanism // International Journal of Fatigue – 2020. – Vol. 131. P. 105349. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105349.

27 Jamali S., Hashemolhosseini H., Baghbanan A., Khoshkam M. HH. Evaluating Fatigue in Crystalline Intact Rocks under Completely Reversed Loading // Geotechnical Testing Journal – 2017.– Vol. 40, Iss. 5. P. 789 – 797. https://doi.org/10.1520/GTJ20160250.

28 He C., Yang J. Dynamic crack propagation of granite subjected to biaxial confining pressure and blast loading // Latin American Journal of Solids and Structures. – 2018.– Vol. 15. № 6. http://dx.doi.org/10.1590/1679-78254463.

29 Wang Yasong, Ma Linjian, Fan Pengxian, Chen Yan A fatigue damage model for rock salt considering the effects of loading frequency and amplitude // International Journal of Mining Science and Technology – 2016. – Vol. 26, Iss. 5. P. 955 – 958. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmst.2016.05.054.

30 Wang C.H., Brown M.W. Life Prediction Techniques for Variable Amplitude Multiaxial Fatigue—Part 1: Theories // Journal of Engineering Materials and Technology – 1996. – Vol. 118, Iss. 3. P. 367-370. https://doi.org/10.1115/1.2806821.

31 Scholz C.H., Koczynski T.A. Dilatancy anisotropy and the response of rock to large cyclic loads // Journal of Geophysical Research – 1979. – Vol. 84, Iss. B10. P. 5525 – 5534. https://doi.org/10.1029/JB084iB10p05525.

32 Chen Y., Watanabe K., Kusuda H., Kusaka E., Mabuchi M. Crack growth in Westerly granite during a cyclic loading test // Engineering Geology – 2011.– Vol. 117, Iss. 3–4. P. 189 – 197. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.10.017.

33 Taheri A., Royle A., Yang Z., Zhao Y. Study on variations of peak strength of a sandstone during cyclic loading // Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources – 2016. – Vol. 2, Iss. 1. P. 1 – 10. https://doi.org/10.1007/s40948-015-0017-8.

34 Åkesson U., Hansson J., Stigh J. Characterisation of microcracks in the Bohus granite, western Sweden, caused by uniaxial cyclic loading // Engineering Geology – 2004.– Vol. 72, Iss. 1–2. P. 131 – 142. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2003.07.001.

35 Skallerud B. Constitutive modelling of cyclic plasticity and some implications for the computation of biaxial low cycle fatigue damage // Engineering Fracture Mechanics – 1992.– Vol. 41, Iss. 5. P. 753 – 769. https://doi.org/10.1016/0013-7944(92)90158-B

36 Ma C., Li X., Chen F., Xu J. Fracturing behavior study of biaxial compression of rock subjected to dynamic disturbance load // Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering – 2010.– Vol. 29, Iss. 6. P. 1238 – 1244.

37 Zuo Y.-J., Li X.-B., Tang C. A., Wang W.-H., Ma C.-D. Experimental investigation on failure of statically loaded rock subjected to periodic load // Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics – 2007.– Vol. 28, Iss. 5. P. 927–932.

38 Мохначев М. П., Присташ В. В. Динамическая прочность горных пород // Академия наук СССР, Институт горного дела им. А.А. Скочинского. - Москва: Наука, 1971. - 139 с.

39 Мохначев М.П. Усталость горных пород [Текст]. - Москва : Наука, 1979. - 151 с.

40 Ягодкин, Г. И. Прочность и деформируемость горных пород в процессе их нагружения / Г. И. Ягодкин, М. П. Мохначев, М. Ф. Кунтыш ; М-во угол. пром-сти СССР, Ин-т горн. дела им. А. А. Скочинского. - Москва : Наука, 1971. - 148 с.

41 Лавров А.В., Шкуратник В.Л., Филимонов Ю.Л. Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – 450 с.

42 Lavrov A. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences – 2003. – Vol. 40. P. 151 – 171. DOI:10.1016/S1365-1609(02)00138-7.

43 Eberhardt E., Stead D., Stimpson B. Quantifying progressive pre-peak brittle fracture damage in rock during uniaxial compression // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences – 1999. – Vol. 36, Iss. 3. P. 361 – 380. https://doi.org/10.1016/S0148-9062(99)00019-4.

44 Jiang Xu, Shu-chun Li, Yun-qi Tao, Xiao-jun Tang, Xin Wu Acoustic emission characteristic during rock fatigue damage and failure // Procedia Earth and Planetary Science – 2009. – Vol. 1, Iss. 1. P. 556 – 555. https://doi.org/10.1016/j.proeps.2009.09.088.

45 Третьякова К.В., Бельтюков Н.Л. Опыт применения метода акустической эмиссии при оценке нарушенности горных пород // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования – 2015. – № 1. с. 160 – 166.

46 Rao M.V.M.S., Ramana Y.V. A Study of Progressive Failure of Rock Under Cyclic Loading by Ultrasonic and AE Monitoring Techniques // Rock Mechanics and Rock Engineering – 1992. – Vol. 25, Iss. 4. P. 237 – 251.

47 Lockner D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts – 1993. – Vol. 30, Iss. 7. P. 883 – 899. https://doi.org/10.1016/0148-9062(93)90041-B.

48 Chow T.M., Meglis I.L., Young R.P. Progressive Microcrack Development in Tests on Lac du Bonnet Granite II. Ultrasonic Tomographic Imaging // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences – 1995. – Vol. 32, Iss. 8. P. 751 – 761.

49 Ding Qi-Le, Song Shuai-Bing. Experimental Investigation of the Relationshipbetween the P-Wave Velocity and the Mechanical Properties of Damaged Sandstone // Advances in Materials Science and Engineering – 2016.

Vol. 2016. Article ID 7654234. P. 1 – 10. http://dx.doi.org/10.1155/2016/7654234.

50 Umrao RK, Sharma LK, Singh R, Singh TN. Determination of strength and modulus of elasticity of heterogenous sedimentary rocks: An ANFIS predictive technique. Measurement 2018;126:194–201. doi:10.1016/j.measurement.2018.05.064.

51 Matin SS, Farahzadi L, Makaremi S, Chelgani SC, Sattari G. Variable selection and prediction of uniaxial compressive strength and modulus of elasticity by random forest. Appl Soft Comput 2018;70:980–7. doi:10.1016/j.asoc.2017.06.030.

52 Ündül Ö., Er S. Investigating the effects of micro-texture and geo-mechanical properties on the abrasiveness of volcanic rocks. Eng Geol 2017;229:85–94. doi:10.1016/j.enggeo.2017.09.022.

53 El-Sherbiny SMM, Hassanin AGG, Nofal HAA, Abd-Alkader SMM. Ultrasonic attenuation measurements in Egyptian dry compact rocks, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2003, p. B51–7. doi:10.1109/NRSC.2003.1217316.

54 Ma R, Ba J, Wang E, Zhao H, Qian W, Yu C, et al. Experimental analysis on P-wave attenuation in tight oil rocks. 79th EAGE Conf. Exhib. 2017, European Association of Geoscientists and Engineers, EAGE; 2017.

55 Rao MVMSVMS, Prasanna Lakshmi KJJ. Shear-wave propagation in rocks and other lossy media: An experimental study. Curr Sci 2003;85:1221–5.

56 Hennah SJJ, Astin TRR, Sothcott J, McCann C. Relationships between rock heterogeneity, attenuation and velocity dispersion at ultrasonic and sonic frequencies. vol. 22. Society of Exploration Geophysicists; 2003. doi:10.1190/1.1817619.

57 Guo MQM-Q, Fu LYL-Y, Ba J. Comparison of stress-associated coda attenuation and intrinsic attenuation from ultrasonic measurements. Geophys J Int 2009;178:447–56. doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04159.x.

58 Куткин, Я. О. Обоснование и разработка метода неразрушающего контроля остаточной прочности горных пород по их акустической добротности : дис.

... кандидата технических наук : 25.00.20 / Куткин Ярослав Олегович; [Место защиты: Нац. исслед. технол. ун-т «МИСиС»]. - Москва, 2015. – 119 с.

59 Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники / Рос. акад. наук. Объед. ин-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта. – М. : Наука, 2003. – 269 с.

60 Соболев Г.А. Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования – ЛНТ // Физика Земли, 2019, № 1. С. 166–179. DOI: https://doi.org/10.31857/S0002-333720191166-179.

61 Вознесенский А. С., Красилов М. Н., Куткин Я. О., Тавостин М. Н. Лабораторная система для расширенных испытаний образцов горных пород при изгибе. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) 2018; 10: 132–137. doi: 10.25018/0236-1493-2018-10-0-132-137.

62 ГОСТ 30629-2011. Материалы и изделия облицовочные из горных пород. Методы испытаний. М: Стандартинформ.–2012.– 29 с.

63 Voznesenskii AS, Krasilov MN, Kutkin YO, Tavostin MN, Osipov YV. Features of interrelations between acoustic quality factor and strength of rock salt during fatigue cyclic loadings. Int J Fatigue 2017;97:70–8. doi:10.1016/j.ijfatigue.2016.12.027.

64 Hopkinson B. A Method of Measuring the Pressure Produced in the Detonation of High Explosives or by the Impact of Bullets // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Math. or Phys. Character (1896-1934).– 1914.– A 213.– P. 437–456.

65 Kolsky H. An investigation of mechanical properties at very high rates of loading // Proceedings of the Royal Society of London, Philosophical Transactions of the Royal Society.– B62.– 1949.– P. 676–700. DOI: 10.1088/0370-1301/62/11/302

66 Куткин Я.О., Красилов М.Н., Насибуллин Р.Р. Установка для изучения свойств горных пород при динамических воздействиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 12. С. 146-152.

67 Zhao J., Wu W., Zhang Q. B., Sun L. Some recent developments on rock dynamic experiments and modeling // Rock Dynamics and Applications – State of the Art, 2013, Taylor & Francis Group, London, pp. 25—40.

68 Беседина А. Н., Кабыченко Н. В., Кочарян Г. Г. Особенности сейсмического мониторинга слабых динамических событий в массиве горных пород // ФТПРПИ.–2013.– № 5 .– С. 20–36.

69 Stec K. Seismic dynamic influence of rock mass tremors on roadways according to the orientation of the rupture plane in the tremor source / Proceeding of the 8th Intemational Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines / Ed. A. and D. Malovichko.– Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, Mining Institute of Ural Branch of Russian Academy of Sciences.– Obninsk – Repn.– 2013.– p. 83–92. ISBN 978-5-903258-28-4.

70 Красилов М.Н. Влияние параметров Рэлеевской модели затухания упругих волн на характеристики сейсмограмм и акустическую добротность массива горных пород // Ученые записки Физического факультета Московскго университета. – 2017. - №5. – С. 1750807.

71 Voznesenskii A. S., Krasilov M. N., Kutkin Ya. O., Tavostin M. N. Reliability Increasing of an Estimation of Rocks Strength by Non-destructive Methods of Acoustic Testing Due to Additional Informative Parameters / Proceedings: The Minerals, Metals & Materials Society 2019. B. Li et al. (eds.). Characterisation of Minerals, Metals, and Materials 2019. The Minerals, Metals & Materials Series, pp. 411-423. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05749-7_41.

72 ГОСТ 30629-99. Материалы и изделия облицовочные из горных пород. Методы испытаний. Межгосударственный стандарт. Дата введения 2001-01-01. М.: Госстрой России.–2000.–71 с.

73 ГОСТ 23207-78. Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения. М.: Изд. стандартов, 1981.– 48 с.

74 Работнов Ю.Н. Введение в механику разрушения.– М.: Наука, 1987.– 80 с.

75 Качанов. Л.М. Основы механики разрушения.– М: Наука, 1974.– 312 с.

76 Ono K. Structural integrity evaluation using acoustic emission // Journal of Acoustic Emission.– 25.– 2007.– 20 p. DOI: 10.1201/9780203892220.pt1.

77 Пономарев С.В., Рикконен С.В., Азин А.В., Каравацкий А.К., Марицкий Н.Н., Пономарев С.А. Применение метода акустической эмиссии для моделирования долговечности металлических элементов строительных конструкций // В сб.: Перспективные материалы в строительстве и технике (ПМСТ-2014). Материалы Международной научной конференции молодых ученых. Томск, 15-17 октября 2014 г. Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет.– С. 557–565.

78 Вознесенский А.С., Красилов М.Н., Куткин Я.О. Об увеличении точности прогноза прочности горных пород при циклических нагружениях за счет учета влияния пористости и трещиноватости / В сборнике: Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле Материалы Девятнадцатой международной конференции. 2018. С. 65-68.

79 Смирнов В.И. Строительство подземных газонефтехранилищ: Учебн. пособие для вузов.– М.: Газойл пресс.– 2000.– 250 с. ISBN 5–87719–016–4.

80 Voznesenskii A. S., Krasilov M. N., Kutkin Ya. O., Tavostin M. N., Osipov Yu. V. Features of interrelations between acoustic quality factor and strength of rock salt during fatigue cyclic loadings. International Journal of Fatigue, Volume 97, April 2017, pp 70-78. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.12.027.

81 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, pp. 186-193.

82 Вознесенский А.С., Куткин Я.О., Красилов М.Н. Взаимосвязь акустической добротности и прочности горных пород различных типов // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2017. № 5. С. 1750801.

83 A. S. Voznesenskii, M. N. Krasilov, Ya. O. Kutkin Features and the Ability to Replace the Interdependencies between the Acoustic Quality Factor and the

Strength of Limestone under the Influence of Different Physical Nature // International Journal of Mining Science (IJMS) – 2018. – Vol. 4, №2. P.31-43.

84 Гроховский Л. М., Гроховская М. А. Поиски и разведка месторождений минеральных солей.– М.: Недра.– 1980.– 163 с.

85 Коробейник В.М., Сластунов Д.С. Прогнозная геодинамическая оценка породного массива Новомосковского рассолопромысла с помощью газогеохимических методов (первый этап – рекогносцировка) // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал).– 2005.- №1.- С. 257-260.

86 Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов.– М.: Наука.– Гл. ред. физ-мат лит.– 1986.– 560 с.

87 Liang W., Zhang Ch., Gao H., Yang X., Xu S., Zhao Ya. Experiments on mechanical properties of salt rocks under cyclic loading // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.– 1012.– 4(1).– P. 54-61.

88 Берон А.И. Свойства горных пород при разных видах нагружения.- М.- Недра.- 1983.- 276 с.

89 Определение параметров сопротивляемости угольного пласта вибрационному внедрению индентора для активного управления состоянием пласта / С.А. Курносов // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. — Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2004. – Вип. 51. – С. 312-317.

90 Куткин Я.О., Красилов М.Н., Насибуллин Р.Р. Особенности деформирования каменной соли при импульсных нагрузках / В сборнике: XIX Уральская молодежная научная школа по геофизике сборник научных материалов. 2018. С. 92-94.

91 Куткин Я.О., Красилов М.Н., Насибуллин Р.Р., Тютчева А.О. Влияние статической и динамической механической нагрузки на взаимосвязь между изменениями прочности и акустической добротности образцов известняка // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 12. С. 127-133. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-127-133.

92 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. Pp. 186–193.

93 Иванова В. С., Терентьев В. Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.

94 Терентьев В. Ф. Усталость металлических материалов. – М.: Наука, 2002. – 248 с.

95 Терентьев В. Ф., Оксогоев А. А. Циклическая прочность металлических материалов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 61 с.

96 Sönnerlind H. Beräkningsmetoder för spänningar i explosionsbelastad berg. Rapport nr 001202 (in Swedish), Epsilon HighTech Innovation AB, 2005.

97 R. Courant, K.O. Friedrichs, and H. Lewy. On the partial difference equations of mathematical physics.– IBM Journal.– 1956.– vol. 11.– pp. 215–234.

98 R. Courant, K. Friedrichs, H. Lewy. Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik // Mathematische Annalen. – 1928. – Т. 100, № 1. – С. 32–74.

99 Курант Р., Фридрихс К., Леви Г. О разностных уравнениях математической физики // УМН. – 1941. – № 8. – С. 125–160.

100 Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: В 2-х томах. Пер. с франц. – М.: Мир, 1983. – Т. 1. 312 с.

101 Voznesenskii A. S., Krasilov M. N., Kutkin Ya. O., Tavostin M. N. Peculiarities of the impact of consecutive periodic biaxial cyclic loading on the strength and acoustic properties of limestone. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2019;(10):117-130. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-117-130.

102 ГОСТ 23207-78. Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения. М.: Изд. стандартов.– 1981.– 48 с.